

Pour la Science

Avril 1998



POUR LA

SCIENCE

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

La rougeole
Les drakkars
Après la théorie
des cordes
Le sang artificiel
La physique du bruit
La glace du Groenland
Science et espionnage

L'origine des oiseaux

Canada 11.75



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

5



JEU-CONCOURS

Multiplications curieuses

par Pierre Tougne

6

TRIBUNE DES LECTEURS

7



POINT DE VUE

Le fait et l'opinion

par Serge Lang

10



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Le moteur des frères Niépce

par Horst Hardenberg

12



SCIENCE ET GASTRONOMIE

La mastication

par Hervé This

15

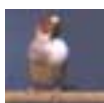


SCIENCE ET FINANCE

Les choix sociaux

par Christian Walter

16



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

22

■ La fin des labours ■ Microlentille ■ Les insectes, indics d'un genre nouveau ■ Attracteurs d'onde

■ Gravure préhistorique ■ Curiosités d'élevage ■ Accent natif
■ Retour à la nature ■ La lutte contre les filarioses ■ L'énigme du second nombre de Plutarque



L'EXPERIENCE DU MOIS

La pratique du billard

par Régis Petit

94



LOGIQUE ET CALCUL

Les fractions et leurs mystères

par Jean-Paul Delahaye

100



SAVOIR TECHNIQUE

Le courrier électronique sur l'Internet

par Paul Hoffman

107



L'IMAGE DU MOIS

Les expressions chimériques

par Monique de Bonis et Monique Nahas

108



ANALYSES DE LIVRES

110

■ Les planètes géantes, de Thérèse Encrenaz
■ Les forêts d'Europe, de Paul Arnould, Micheline

Hotyat et Laurent Simon ■ Histoire des sciences de la vie, de Pascal Duris et Gabriel Gohau ■ On a perdu la moitié de l'Univers, de Jean-Pierre Petit

L'origine des oiseaux et de leur vol

30

par Kevin Padian
et Luis Chiappe

Les dinosaures n'ont pas tous disparu : les oiseaux sont les descendants de certains d'entre eux.

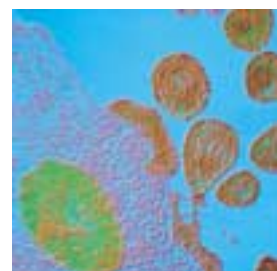


Pourquoi la rougeole tue encore en Afrique

40

par Gilles Pison et Peter Aaby

Les enfants d'une même famille sont souvent très malades : la contagion entre frères et sœurs est plus grave qu'entre enfants non apparentés.



Les navires vikings

48

par John Hale

Entre le IX^e et le XII^e siècle, les Vikings ont dominé l'Europe, en grande partie grâce à des bateaux longs et étroits, remplis de guerriers.



Des scientifiques dans l'ombre

58

par Jeffrey Richelson

Quelques spécialistes des sciences de la Terre collaborent avec les services secrets américains. Ils accèdent à des informations importantes et, jusqu'à présent, confidentielles.



Les nouvelles théories des cordes

par Michael Duff

Les physiciens qui cherchent à décrire tous les types de forces par un même formalisme ont amalgamé la théorie des membranes à une théorie des trous noirs.

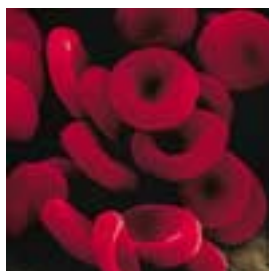


66

Le sang artificiel

par Mary Nucci
et Abraham Abuchowski

La menace d'une pénurie de sang et les craintes de contamination ont relancé les recherches de substituts du sang. Plusieurs produits sont prometteurs.



74

Le climat dans les glaces

par Richard Alley
et Michael Bender

La glace du Groenland, accumulée depuis des dizaines de milliers d'années, révèle le climat du passé.



80

Le bruit en 1/f

par Edoardo Milotti

L'origine de ce signal aléatoire, particulièrement intéressant par le nombre de processus physiques où il intervient, reste partiellement énigmatique. On sait cependant en établir certains modèles généraux.



88

É D I T O R I A L

L'origine des oiseaux

Cent millions d'années avant la technologie, la Nature résolvait une nouvelle fois le problème du vol du plus lourd que l'air. Il y avait déjà les insectes ou les ptérosaures, mais la plume apparaissait, cette fois, par le jeu des mutations aléatoires adaptées. Les réflexions humaines, elles, ont d'abord pensé l'aérostation de plus légers que l'air, solution qui, semble-t-il, n'a pas été envisagée dans le monde animal : il n'existe pas d'oiseaux montgolfières. À de rares exceptions près, les inventions humaines ne sont pas inspirées par la Nature, et les évolutions naturelles ont une toute autre dynamique, fruit des adaptations du plan d'ensemble des organismes reconstruit par Geoffroy Saint-Hilaire (voir le remarquable ouvrage d'Hervé Le Guyader, *Geoffroy Saint-Hilaire*, Belin, 1998). «La nature a formé tous les êtres vivants sur un plan unique», a découvert Geoffroy Saint-Hilaire, fondant l'anatomie comparée, qui permettra de retracer l'historique des variations.

Extraordinaires paléontologues : ils flairent les sites fossilifères, ils utilisent la géologie pour dater ces sites, ils discernent les particularités dénotant l'appartenance du fossile à une espèce, ils interprètent en termes évolutifs les différences anatomiques relevées après un minutieux nettoyage des ossements fossilisés, ils retracent, dans le silence de leurs cabinets, les histoires des espèces, ils repartent sur le terrain pour trouver les preuves étayant leurs présomptions (voir *L'origine des oiseaux et de leur vol*, page 30).

Bien que leurs évidences paraissent ténues, ils ne se trompent que rarement, pas plus souvent que les disciplines des sciences expérimentales qui ont tout loisir d'expérimenter et de modifier les paramètres : la biologie moléculaire a confirmé le plan unique de Geoffroy Saint-Hilaire, validé les études d'anatomie comparée et conforté les hypothèses des paléontologues.

Philippe BOULANGER

Prévenir l'antiprévention

La médecine, la justice ne sont plus seules à tenter la prévention. La psychologie s'y est mise aussi. On cite désormais des cas de personnes qui se sont vu proposer l'intervention de psychologues alors qu'elles ne ressentaient aucune souffrance psychologique, mais qu'elles se trouvaient placées dans des situations où le risque qu'une telle souffrance survienne était réel. Tout être bien portant...

Il y a là une piste à explorer. Les statistiques d'espérance de vie étant ce qu'elles sont, les femmes sont dans leur quasi-totalité destinées à faire une expérience qui – j'ai la faiblesse toute masculine de le croire – leur causera une grande souffrance : celle du veuvage. Prévention, prévention : organisons des stages de préparation psychologique à ce dur moment. Il n'est jamais trop tôt. Toutes menacées de veuvage, les femmes seront donc toutes prêtes à se payer de tels stages. Clientèle suffisamment large pour faire la fortune des organisateurs.

La froideur humaine

Pour peu que l'humour de chambrée ne vous dégoûte pas, voici un paradoxe de physique sur lequel je vous propose de réfléchir. Si vous ne trouvez pas, téléphonez à nos prix Nobel.

Imaginons un pays chaud, très chaud, et, dans ce pays, un baraquement en plein soleil. Supposons que, à l'intérieur du baraquement, la température atteigne 40 degrés. Un bon moyen, alors, de rafraîchir l'atmosphère dans le baraquement est d'y entasser le plus grand nombre possible d'hommes : leur température étant de 37 degrés, ils jouent le rôle de source froide.

Je n'ai pas fait l'expérience, mais quelque chose me dit qu'elle ne donnerait pas le résultat prévu ci-dessus. Qu'est-ce donc qui cloche dans le raisonnement ?

Credo quia absurdum

Une émouvante cérémonie vient d'avoir lieu dans les jardins de l'Institut mathématique de Paris : l'inauguration d'une statue érigée en hommage à Labsurde. Dévoilant la statue en présence des plus hautes autorités scientifiques, politiques et artistiques du pays, le directeur de l'Institut a prononcé une allocution riche d'enseignements et porteuse d'espoirs. «De tous les mathématiciens que la Terre a portés, le plus fécond est sans aucun doute Labsurde. Depuis l'aube des temps, toujours productif, il a su éviter les pièges de la spécialisation : les raisonnements par Labsurde interviennent de façon décisive aussi bien en algèbre, en géométrie, en analyse. Sans eux, la majeure partie des mathématiques s'effondrerait. Beaucoup plus nombreux

sont les théorèmes démontrés par Labsurde que par Gauss, Poincaré et Hilbert réunis. Gauss, Poincaré, Hilbert ont leurs monuments, Labsurde ne l'avait pas. Rendons hommage à ce créateur entre tous, ce *princeps mathematicorum*, cette étoile polaire de nos recherches.»

La statue, intitulée *Séquentielle III*, est due au sculpteur suisse Ludwig Stickelberger. Elle représente un ultrafiltre fractal chevauchant une suite récursive. Selon le sculpteur, une telle matérialisation d'objets purement abstraits est parfaitement absurde, donc parfaitement fidèle à l'esprit des mathématiques

C'est le contraire

Une citation. «La philosophie donne l'impression de s'occuper seulement de la vérité, mais peut-être ne dit-elle que des fantaisies, et la littérature donne l'impression de s'occuper seulement de fantaisies, mais peut-être dit-elle la vérité.»

Une devinette. L'auteur de la citation ci-dessus est-il philosophe ou écrivain ?

Une réponse trop prévisible. Écrivain, bien sûr. C'est un personnage du roman d'Antonio Tabucchi, *Pereira prétexté* (éditions Christian Bourgois, 1995, p. 33) qui tient ce propos.

Une extension. Il existe d'autres couples de frères ennemis que celui formé par le philosophe et l'écrivain. Par exemple, le physicien et le mathématicien. Imaginons donc un physicien inspiré par Tabucchi. Il écrira : «Les mathématiques donnent l'impression de prouver de grandes vérités, mais peut-être leurs vérités sont-elles dépourvues de toute utilité, et la physique donne l'impression de se limiter à l'utilité, mais peut-être atteint-elle aux vérités les plus profondes.» Évidemment, inspiré du même Tabucchi, le mathématicien écrira quelque chose comme : «La physique donne l'impression d'être réaliste, mais peut-être est-elle trop approximative pour l'être véritablement, et les mathématiques donnent l'impression d'être de pures abstractions, mais peut-être sont-elles à la source de toutes les applications possibles.»

Un jeu proposé. Chercher d'autres couples de frères ennemis et, sur le modèle de la phrase de Tabucchi, faire dire à chacun d'eux ce qu'on doit penser de l'autre.

Le but de cette chronique. Promouvoir l'entente entre les divers spécialistes.

L'euro minimisé

Le choix du nom de la future monnaie européenne n'a pas été sans difficulté. Longtemps fixé sur écu, il l'est désormais sur euro, et ne devrait plus avoir le temps de changer. Nos ministres, toujours prévoyants, ont même songé à donner un nom au sous-multiple de l'euro. Une brochure gratuite – tendrement intitulée *L'euro et moi* – informe la population que, en France, ce sous-multiple s'appellera le «cent» et qu'on pourra, dans l'usage courant, l'appeler «centime».

Là quelque chose ne va pas. Parce que les Anglais, j'imagine, prendront de leur côté l'habitude de parler d'euroshilling (abréviation : shilling), les Allemands d'europfennig (abréviation : pfennig), etc. Bref, après comme avant la mise en vigueur de la monnaie unique, nous risquons de connaître, financièrement parlant, la tour de Babel en Europe.

Cela serait inacceptable. Il faut donc doter ce sous-multiple d'un nom qui satisfasse tout le monde, et soit facile à prononcer dans toutes les langues européennes. Ai-je une idée ? Bien sûr. Puisque l'Europe a cru devoir donner un nom géographique à son unité de monnaie, le sous-multiple doit également avoir un nom géographique. Un sous-multiple de l'Europe qui devrait ne pas susciter trop de craintes ni de rivalités, c'est le Liechtenstein. Je propose donc que, à l'image du Liechtenstein qui représente environ la dix millième partie de l'Europe, la dix millième partie de l'euro s'appelle le liechtensto. Je me vois très bien acheter tous les matins mon journal, mon pain et mon lait pour un prix total de 3 euros et 95 liechtenstos.

JEU-CONCOURS N° 46

PIERRE TOUGNE

Multiplications curieuses

Observez les six multiplications par 4 suivantes :

$102\,564 \times 4 = 410\,256$
 $128\,205 \times 4 = 512\,820$
 $153\,846 \times 4 = 615\,384$
 $179\,487 \times 4 = 717\,948$
 $205\,128 \times 4 = 820\,512$
 $230\,769 \times 4 = 923\,076$

Elles présentent toutes la particularité que le résultat s'obtient très facilement en faisant passer le chiffre des unités du multiplicande de la droite vers la gauche du nombre. L'existence de ces nombres n'est pas particulière au multiplicateur 4. Sauriez-vous trouver

un exemple d'un tel nombre pour les multiplicateurs 2 et 7?

Coup de pouce : a) le chiffre des unités du nombre cherché est supérieur ou égal au multiplicateur : b) bien que ces nombres soient relativement grands (toujours pas plus de 23 chiffres!), un ordinateur n'est pas nécessaire.

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'avril 1998, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 44

Ce jeu-concours était très facile, mais beaucoup plus que je ne le pensai. En effet, quelques lecteurs ont traité le problème par l'informatique en remplissant aléatoirement le carré et ils ont trouvé qu'environ 1,3 pour cent des carrés d'ordre 4 et 2 pour cent d'ordre 5 étaient panantimagiques. Ce qui fait pour les carrés d'ordre 4 environ 400 milliards de solutions! Parmi tous les résultats envoyés, j'ai sélectionné la solution du «moindre effort» où l'on part d'un carré rempli dans l'ordre naturel des nombres que l'on modifie afin d'obtenir la panantimagic. La solution minimale (au sens du déplacement des nombres) semble être :

1	2	3	4
5	6	7	8
9	14	12	13
15	11	16	10

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	25	22	23
20	19	21	24	18

Mr. Jacquelin, trouvant le problème trop simple, s'est imposé la contrainte supplémentaire que les nombres voisins dans toutes les directions ne soient pas consécutifs. Il a ainsi obtenu le carré d'ordre 4 (écart entre voisins ≥ 2) et le carré d'ordre 5 (écart entre voisins ≥ 3) :

1	3	5	7
9	11	13	16
4	15	6	2
10	8	12	14

1	5	9	2	6
10	14	18	13	17
3	22	8	25	21
16	12	4	15	7
20	24	19	23	11

Néanmoins, bien que le nombre de solutions soit immense, il reste à trouver une méthode systématique de construction de tels carrés pour chaque ordre.

Babous

Didier Nordon nous interroge (voir *Bloc-notes, Pour la Science*, janvier 1998) : d'où vient le mot babou ? Les Babous étaient des Indiens employés comme « cadres » par de grandes maisons commerciales anglaises à l'époque de la colonisation. Ils jouissaient de bons revenus et cherchaient à copier le mode de vie des Anglais, ce qui conduisait à une forme de snobisme.

Henri PAYE, Waismes

Rudyard Kipling donne une définition du babou dans *Kim* (à la page 397 de l'édition du *Livre de poche*) : c'est un employé indigène qui écrit l'anglais, un indigène du Bengale ayant reçu une éducation anglaise. Une lecture attentive de l'ouvrage montre que ce babou, esprit fin et vif, espion pour l'Angleterre, laisse croire qu'il est effectivement un pédant prétentieux. Il trouva donc la suprême jouissance, qui est de passer pour un idiot auprès d'imbéciles.

Yves CHEVALLEY, Commercy

Mécanisme et indéterminisme

Dans *Le monde des machines*, (voir *Pour la Science*, janvier 1998), Jean-Paul Delahaye présente les travaux de Bruno Marchal, en particulier à propos du « paradigme du télétransporteur », une des expériences de pensée la plus intéressante par les variations qu'elle permet. Dans l'une des variantes, il y a duplication de la personne ; si l'on admet l'hypothèse mécaniste, il y a aussi duplication de l'esprit. Mais là où je ne suis plus, c'est lorsqu'il y voit la cause d'un indéterminisme : la personne qui pénètre dans le télétransporteur en *T* (sur Terre) ne s'attend pas à « sortir » en *A* (sur la Lune) ou en *B* (sur Mars), mais bien aux deux points en même temps.

Serge BOISSE

Je ne suis pas d'accord avec la conclusion d'un « indéterminisme absolu » sur l'emplacement final de l'individu. A l'instant où l'opération est réalisée, et avec l'hypothèse où l'individu initial (se trouvant sur la Terre) a été simultanément détruit, deux copies subsistent, sur la Lune et sur Mars. Ces deux copies ont autant de « valeur » l'une que l'autre, et peuvent aussi bien l'une que l'autre prétendre être l'original. Je ne vois pas comment B. Marchal peut affirmer, en se plaçant du point de vue de l'individu, qu'il y a 50 pour cent de chance que je sois sur Mars. À mon sens, tout repose sur une conception

erronée du « moi », selon laquelle il ne pourrait exister qu'un seul « moi ».

David BLUM

Les deux notions d'indéterminisme « psychologique » et d'indéterminisme quantique me semblent intimement liées. Imaginons qu'un des programmes qui existe par réalisme arithmétique soit un système disposant de ressources énormes. Sur ce système tourne un processus qui calcule l'évolution d'une salle contenant un homme et une pièce de monnaie. Lorsque l'homme tire à pile ou face, au lieu de calculer la trajectoire, le processus, utilise une instruction qui le dédouble et la pièce tombe sur face dans le processus parent et sur pile dans le processus fils. L'homme lance la pièce et attend avant d'observer le résultat. Sa conscience est identique dans les deux processus tant qu'il laisse la pièce cachée. Pour lui, la pièce est dans l'état superposé « pile plus face ». Au moment où il observe la pièce, il entre dans l'état superposé « homme qui pense que la pièce est sur face plus homme qui pense que la pièce est sur pile ». Il peut donc croire que la pièce « choisit » son état au moment de l'observation. Certains physiciens expliquent les états superposés quantiques par un système d'univers parallèles. Cela ressemble beaucoup aux processus que je viens de décrire.

Mathieu WALRAET

Réponse de Bruno Marchal

Si l'on se place du point de vue de l'individu, chacune des deux copies est forcée de reconnaître une forme d'indéterminisme justement parce que les deux individus peuvent prétendre, après la duplication, être l'original. En effet, si la situation était subjectivement déterministe, le candidat à la duplication « Lune-Mars » devrait pouvoir prédire son expérience personnelle future. Mais il ne peut pas dire « je me sentirai être reconstitué simultanément sur la Lune et sur Mars ». Les reconstitutions étant indépendantes, chacun des individus se sentira personnellement avoir été reconstitué en un seul endroit.

Intellectuellement, chacun peut croire, après la duplication, à l'existence d'un double sur l'autre planète, mais du point de vue de leur expérience subjective (privée), chacun se sentira être sur une planète précise. Tout ce que j'utilise dans la conception subjective du « moi » c'est qu'un « moi » se SENT être unique, indépendamment du fait qu'il y puisse y avoir une pluralité de « moi » pour un observateur extérieur. Il s'agit de la conception intuitive, subjective, « de la première personne », intérieure du « moi ».

C'est justement parce que le mécanisme ne permet pas de privilégier un « moi futur » parmi les autres « moi futurs » que le mécaniste ne peut pas prédire à l'avance avec certitude où il va se sentir. Il y a donc bien un indéterminisme subjectif, qui, paradoxalement peut-être, résulte du déterminisme **objectif** lié au mécanisme.

Lorsque Jean-Paul Delahaye écrit que l'indéterminisme mécaniste est différent des indéterminismes rencontrés jusqu'à présent en physique, il veut dire que l'indéterminisme mécaniste est **a priori** différent des indéterminismes mis en évidence par les physiciens. Il n'en demeure pas moins vrai qu'en ce qui concerne certaines interprétations de la mécanique quantique, telles celles des univers multiples ou parallèles, l'indéterminisme quantique apparaît comme étant **a posteriori** un cas particulier d'indéterminisme mécaniste. En particulier, les états quantiques relatifs d'Hughes Everett sont des cas particuliers des états computationnels parcourus par le déployeur universel. À ce stade, on peut montrer que l'indéterminisme quantique (d'origine empirique) confirme (cela ne veut pas dire prouve) l'hypothèse du mécanisme. L'interprétation des mondes multiples est par ailleurs la seule interprétation de la mécanique quantique qui se marie avantageusement avec l'hypothèse du mécanisme, qui est en outre invoquée explicitement par Everett.

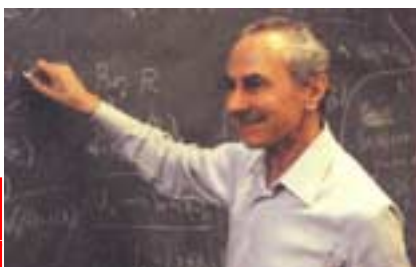
En prenant des gants

La légende de l'illustration qui accompagne l'article *Allergie au latex* (voir *Pour la Science*, février 1998) laisse croire que les gants chirurgicaux sont apparus dans les années 1950. Or, j'ai appris à opérer entre 1945 et 1950 avec des gants qui étaient déjà fins et bien moulés, et mon père, interne à Montpellier entre 1904 et 1908, y avait aussi appris à opérer avec des gants. Il y avait un modèle non moulé, plat, avec des doigts courts, qui s'appelaient « gants de Chaput », du nom du chirurgien auquel on attribue l'invention du gant de caoutchouc. Ils n'étaient pas très commodes, et les gants moulés les ont vite remplacés. Mon patron s'était même fait mouler les mains pour avoir des gants parfaitement ajustés.

Dominique RIVES, Nantes

Ecrivez à **Pour la Science** vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique. Courriel électronique : 101641.3525@compuserve.com. Retrouvez la Tribune sur l'Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>

photo: M. HERSH



Le fait et l'opinion

SERGE LANG

Les scientifiques doivent se battre pour maintenir leurs standards classiques.

Depuis 30 ans, je m'intéresse aux interactions du monde de la science, de l'enseignement, de la politique et des médias, et je m'attaque à des dysfonctionnements variés, telles la fraude, la négligence, la mystification et la falsification. À titre d'exemple, je me limiterai ici aux «sciences politiques» américaines, où certains spécialistes ne semblent pas distinguer entre un fait, une opinion, une hypothèse et le diable sait quoi. Un certain enseignement et une façon d'émettre des opinions politiques, qu'on fait passer pour de la science, substituent des constructions théoriques aux faits. Dans chaque cas, j'opère méthodiquement, sur des cas concrets, en notant tout ce qui se rapporte au sujet traité : entretiens, courriers, articles de journaux, publications... Les pratiques déficientes finissent par être dévoilées.

L'une des affaires les plus importantes de ces dernières années fut «l'affaire Huntington». Elle a principalement concerné les États-Unis, mais des problèmes se posent dans tous les pays que je connais. Elle a commencé en 1986, mais elle est récemment revenue à l'ordre du jour, lors de la publication du livre *The Clash of Civilizations and the Remaking of World Order* («Le choc des civilisations et le remaniement de l'ordre mondial») : l'auteur, Samuel Huntington, a été très critiqué par le commentateur William Pfaff dans le *International Herald Tribune* et par l'historien Arnulf Baring dans le *Frankfurter Allgemeine Zeitung*.

S. Huntington est l'un des plus éminents représentants des sciences politiques américaines : ancien président de l'Association américaine des sciences politiques, ancien directeur du Centre d'affaires internationales de Harvard, consultant de plusieurs agences du gouvernement (Département de la défense, Conseil national de sécurité, CIA). C'est l'auteur américain le plus cité dans le domaine des relations internationales, et certains de ses livres, tel *Political Order in Changing Societies* («L'ordre politique dans les sociétés en mutation»), sont couramment employés dans les cours de sciences politiques des universités américaines.

En 1986 et 1987, l'Académie américaine des sciences a proposé à ses membres la candidature de S. Huntington. Mis en position de voter pour une personne dont j'ignorais les travaux, j'ai consulté ses livres et les ai analysés soigneusement : S. Huntington jette à la tête du lecteur des chiffres, des pourcentages, des expressions telles que «frustrations systémiques» et «instabilité politique» ; il déclare qu'une analyse montrait «une corrélation globale entre frustration et instabilité de 0,50». Il reprenait ainsi un article de Ivo et Rosalind Feierabend.

La «frustration» y avait été définie ainsi : «L'indice de frustration est un rapport. On divise un chiffre national codé et combiné à partir des six indices de satisfaction (le produit national brut, la quantité quotidienne moyenne de calories absorbée par un individu, les téléphones, les médecins, les journaux et les radios) par le plus grand de deux indices : une évaluation codée du niveau d'éducation, ou du niveau d'urbanisation.»

Avec ces critères insensés, l'Afrique du Sud faisait partie des «sociétés satisfaites», parce qu'elle avait une «faible frustration systémique», mais les 20 millions de Noirs d'Afrique du Sud étaient-ils satisfaits de l'apartheid ? Si la science est l'activité qui consiste à mesurer ou à décrire des aspects du monde, l'étude de I. et R. Feierabend, et l'emploi qu'en fait S. Huntington, sont spectaculairement déficients. Leur façon d'étudier cette population n'est pas scientifique : ils font passer leurs opinions politiques pour de la science. En outre, leurs textes usaient d'intimidation et de mystification : la définition de la frustration, par exemple, était accompagnée d'une vingtaine de pages d'équations et de pourcentages donnés à trois décimales près. Ces prétendues «mathématiques» contribuaient à cacher la vacuité et l' inanité des concepts.

L'instabilité était «déterminée» par une «évaluation consensuelle» de juges censés utiliser la même échelle. Qui étaient ces juges ? Apparemment ils étaient tous du même cercle académique et culturel que les auteurs. Ainsi les

responsables de l'étude se mesuraient eux-mêmes, au lieu de tenir compte de l'objet de leur étude.

DYSFONCTIONNEMENTS DU MONDE SCIENTIFIQUE

Le cas S. Huntington mettait en évidence plusieurs dysfonctionnements non seulement du monde scientifique, mais aussi du monde universitaire. Certains des textes de S. Huntington, repris dans les manuels scolaires et universitaires, donnent une image déplorable des Sud-Africains, des Vietnamiens et d'autres pays, ce qui compromet les relations des Américains et de ces populations.

La candidature de S. Huntington fut rejetée deux fois de suite. En 1987, ce rejet fut commenté en première page du *New York Times*, puis par de nombreux journaux américains. Une grande partie des sciences sociales américaines se sont alors unies derrière S. Huntington : il fut soutenu par des membres de l'Académie américaine des sciences (surtout parmi ceux des sciences sociales) et par nombre de ses collègues, qui intervinrent dans les médias. La publication de commentaires critiquant S. Huntington fut entravée, et les journaux qui m'attaquaient personnellement refusèrent des droits de réponse, que ce soit dans une revue à grand tirage comme *Discover* ou dans des revues soi-disant scientifiques, par exemple des publications de la Société américaine de sociologie ou de sciences politiques. Les faits controversés furent falsifiés. Des institutions majeures défendirent également S. Huntington ; elles étaient d'ailleurs déjà impliquées dans la corruption intellectuelle sous-jacente. Par exemple, l'article de I. et R. Feierabend avait reçu un prix de l'Association américaine pour l'avancement des sciences !

Herbert Simon, prix Nobel d'économie, prétendit justifier mathématiquement les travaux de S. Huntington. Mathématicien moi-même, je suis en mesure d'affirmer que ses quelques pages de prétendues justifications (invoquées sans examen critique dans la grande presse) sont des mathématiques élémentaires, qui se réduisent à présenter de façon for-

melle et pompeuse que si une quantité augmente, alors une autre quantité qui dépend de la première peut également augmenter, et que si un peuple est frustré, la probabilité qu'il se révolte est supérieure à celle d'un peuple non frustré.

L'intervention était une forme d'intimidation et de mystification : la plupart des gens ne sont pas en mesure de critiquer un texte technique mathématique. Enfin il y avait abus d'autorité : n'accorde-t-on pas un crédit supérieur aux lauréats du prix Nobel?

LA PRESSE, L'UNIVERSITÉ ET LES INSTITUTIONS

Quand j'ai écrit à S. Huntington, tout d'abord il ne m'a pas répondu, mais le 27 juillet 1987, il déclarait à un journaliste du *New Republic* (Fareed Zakaria, qui était à l'époque un étudiant de sciences politiques à Harvard, devenu depuis rédacteur en chef adjoint de la revue *Foreign Affairs*) qu'un mathématicien, étranger aux sciences sociales et politiques, ne comprenait pas le sens technique des termes qu'il avait employés.

Il ajoutait qu'à l'époque étudiée (avant les années 1960), «c'est un fait» (sic) qu'il n'y avait pas eu d'émeutes, de grèves, de perturbations, en Afrique du Sud. Était-ce exact? Les archives des journaux montrent toutefois que, durant toute la décennie 1950, l'Afrique du Sud a été agitée par des contestations, des émeutes, la police tirant sur les manifestants. Les perturbations culminèrent quand plus de 50 personnes furent tuées à Sharpeville, en mars 1960. Ce massacre fut rapporté dans les journaux du monde entier, plusieurs jours de suite. Donc S. Huntington fabrique une réalité personnelle qu'il fait passer pour un fait.

Pis encore, le *New Republic*, en lui donnant la parole, exposa ses lecteurs à une falsification de l'histoire, sous l'autorité du président de la Société américaine des sciences politiques, directeur du Centre des affaires internationales à Harvard. Malgré mes remarques, le *New Republic* ne publia aucun rectificatif.

Que F. Zakaria ait également méconnu la situation en Afrique du Sud démontre une faillite systématique de l'enseignement à l'Université Yale où l'étudiant avait passé quatre ans, et de l'Université Harvard, où il avait ensuite suivi les cours de l'école de sciences politiques.

Se fondant sur des «équations» et des quotients semblables à celui qui définit l'indice de frustration, S. Huntington prétend comparer des pays aussi variés que l'Afrique du Sud, la France, la Belgique, les Philippines, le Liban, le Maroc, etc., et établit des «corrélations» à trois



décimales près à partir de 26 pays. Regrouper la France et la Belgique avec l'Afrique du Sud et d'autres pays comme les Philippines, dans des «corrélations» de «frustration» et d'«instabilité» fondées sur le produit national brut, l'ingestion de calories, téléphones, médecins, journaux et radios, est absurde, et ne peut mener qu'à l'incompréhension de ces pays.

Cette incompréhension est particulièrement grave quand elle est communiquée aux agences d'État par leurs consultants et quand elle est transmise à des étudiants qui occuperont des postes officiels ou deviendront des journalistes entraînés à penser suivant le mode de S. Huntington.

Certains spécialistes des sciences sociales, dont S. Huntington, construisent leur propre réalité. Ils sont en position de donner à cette réalité une force politique (consultant pour le gouvernement), journalistique (par l'entremise d'articles dans des journaux ou revues) et formative dans les classes comme à Yale ou Harvard. Cette réalité acquiert une certaine force en partie parce qu'elle est certifiée comme étant scientifique par certaines organisations comme l'Académie des sciences. Nous sommes donc conduits à douter de la validité des certifications par ces organisations, en ce qui concerne les sciences sociales.

LA RESPONSABILITÉ INDIVIDUELLE

Le monde scientifique peut-il supporter la perte de crédibilité que fait encourir l'utilisation dans l'enseignement, dans la presse, ou par l'État, d'opinions contestables sous des apparences de science?

Le cas de S. Huntington est loin d'être isolé : j'ai eu l'occasion d'analyser plusieurs affaires, y compris des controverses concernant le virus VIH. Dans toutes ces controverses, on retrouve les mêmes problèmes : suppression d'information ; rapports tendancieux ; refus du droit de réponse ; incapacité de distinguer entre un fait, une opinion et une hypothèse ; pressions personnelles, sociales et académiques, parfois avec des enjeux financiers...

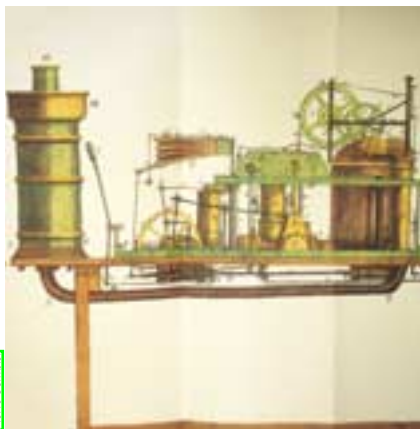
L'évaluation critique des résultats est l'un des critères qui a fait progresser la science. L'institution scientifique, responsable du bon fonctionnement du monde scientifique, a également la responsabilité de la crédibilité des travaux publiés ; elle doit donc non seulement permettre, mais encourager la dissémination d'évaluations critiques. Les revues scientifiques ont un rôle crucial à jouer : non seulement leurs systèmes de rapporteurs doivent être extrêmement fiables et précis, mais elles doivent clairement faire état des débats et controverses, sans parti pris, sous peine de se transformer en journaux d'opinion.

Dans les cas que j'ai étudiés en détail (par exemple dans mon livre *Challenges*), j'ai vu les institutions soutenir leurs hautes personnalités et cacher leurs travers. Les grandes revues internationales font de même et se transforment en instruments de propagande. Que les rédacteurs ne se rendent peut-être même pas compte explicitement de leurs biais en certaines occasions ne fait que renforcer la condamnation que je porte à leurs égards.

Certaines forces sociologiques et culturelles aux États-Unis font aussi que certains débats sont dirigés vers le système judiciaire, témoignant d'une abdication de responsabilité de la part des institutions scientifiques. Par là même, la teneur des débats est faussée, et les standards scientifiques classiques sont rejetés, voire remplacés. Dans ces occurrences, les institutions sont déficientes. Il ne reste alors que la responsabilité individuelle pour maintenir les standards scientifiques classiques. Que faire pour maintenir un climat qui permet de discuter clairement, ouvertement, et avec documentation, des problèmes causés par des transgressions aux normes scientifiques classiques?

Serge LANG est mathématicien à l'Université Yale et membre de l'Académie américaine des sciences.

Serge Lang, *Challenges*, éditions Springer, 1998.



Pierre Lemonde

Le moteur des frères Niépce

HORST HARDENBERG

Nicéphore Niépce et son frère Claude ont construit un moteur à combustion interne, qui aurait pu fonctionner avec de l'essence et du gasoil.

Nicéphore Niépce est le père de la photographie, mais il fut aussi un pionnier en matière de moteur à combustion interne. En 1806, avec son frère aîné Claude, ils installent un moteur sur un petit bateau qu'ils font voguer sur la Saône. C'est le premier bateau à moteur du monde. Ils précèdent ainsi les futurs «inventeurs» de plus de 20 ans.

En ce temps là, peu de machines à vapeur fonctionnent en France. Les frères

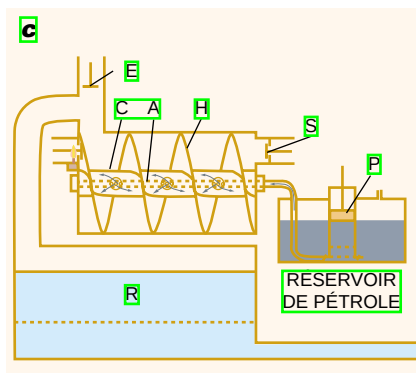
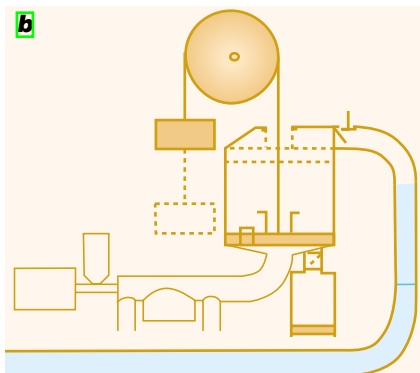
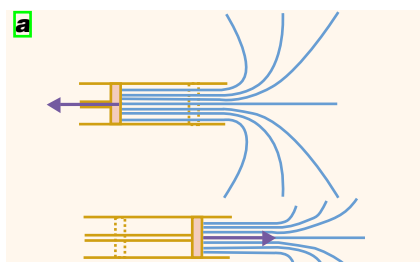
Niépce en connaissent les inconvénients : ils sont volumineux, parce qu'ils nécessitent une chaudière et un condenseur pour la vapeur. Comment fabriquer un moteur d'une puissance équivalant à celle des machines à vapeur, mais qui serait moins volumineux et consommerait moins de carburant ?

On ignore lequel des deux frères découvrit le principe de leur moteur, ou si ce dernier fut le fruit de travaux et de réflexions menés en commun pendant plusieurs années. Nicéphore était le scientifique qui analysait les phénomènes expérimentaux et Claude était l'ingénieur qui apporta son savoir technique à la résolution des difficultés mécaniques ; la mise au point requit une année et demie de labeur.

Le moteur fut nommé pyræolophore (du grec *pyros*, le «feu» ; *aiolos*, Éole, air ou vent ; et *phorein*, porter). Le moteur a été décrit dans un brevet ; il était consti-

tué de plusieurs mécanismes très compliqués, dont on comprend difficilement le fonctionnement. Claude, qui avait mis au point la plupart de ces mécanismes, ne savait-il pas trouver les solutions simples ou avait-il voulu dérouter les éventuels imitateurs ?

L'un des principaux éléments de ce moteur était un volumineux cylindre, équipé d'un piston qui aspirait l'air nécessaire à la combustion. La chambre à combustion était l'autre partie essentielle du moteur : le combustible y était injecté par de l'air comprimé et immédiatement enflammé par une mèche d'amiante incandescente. Le carburant utilisé était un mélange de charbon pulvérulent et de poudre de résine (dans la proportion de quatre cinquièmes pour un cinquième). La résine facilitait la mise à feu. Contrairement à ce qui est parfois rapporté, le carburant n'était pas du lycopode, une plante dont les spores donnent une poudre très inflammable.



1. La propulsion du bateau équipé du moteur des frères Niépce repose sur un mouvement d'aspiration et d'expulsion de l'eau : l'aspiration n'est pas directionnelle, tandis que l'éjection l'est, et l'impulsion d'éjection est supérieure. Dans le premier moteur, un piston contrôle l'admission d'air de combustion et l'échappement des gaz brûlés (en position haute, le mélange du carburant et d'air est enflammé, et la pression résultante des gaz brûlés expulse l'eau à l'arrière du bateau ; ensuite la soupape d'échappement est ouverte, le piston retourne à sa position la plus basse et l'eau redescend). Dans leur second moteur, le piston est remplacé par une hélice (H), montée sur un axe creux (A), qui tourne dans un cylindre horizontal (C) et fait entrer l'air par une soupape (S). Juste avant que cette soupape ne se ferme, une pompe (P) injecte le pétrole contenu dans le réservoir dans l'axe creux, percé de petits trous : le pétrole est pulvérisé en fines gouttelettes et mélangé à l'air contenu dans le cylindre. La flamme d'une lampe met le feu au mélange lors d'une brève ouverture de la valve qui obstrue le cylindre principal. Lors de la combustion, la pression augmente dans le réservoir de l'eau (R), de sorte que le niveau de l'eau baisse : l'eau est expulsée à l'arrière du bateau. Ensuite la soupape d'échappement (E) est ouverte, et l'eau remonte.

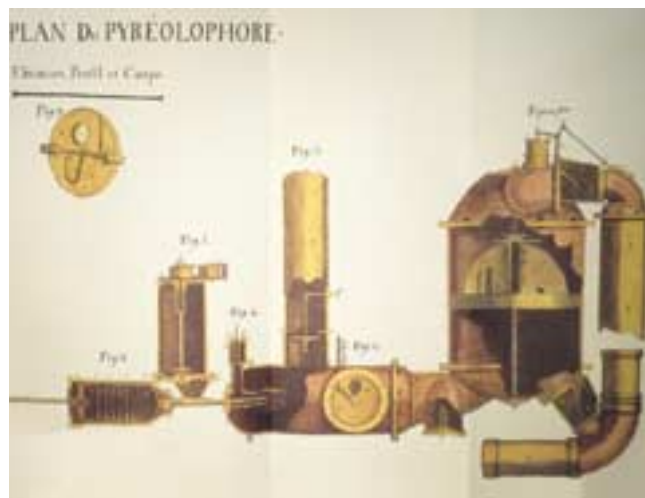
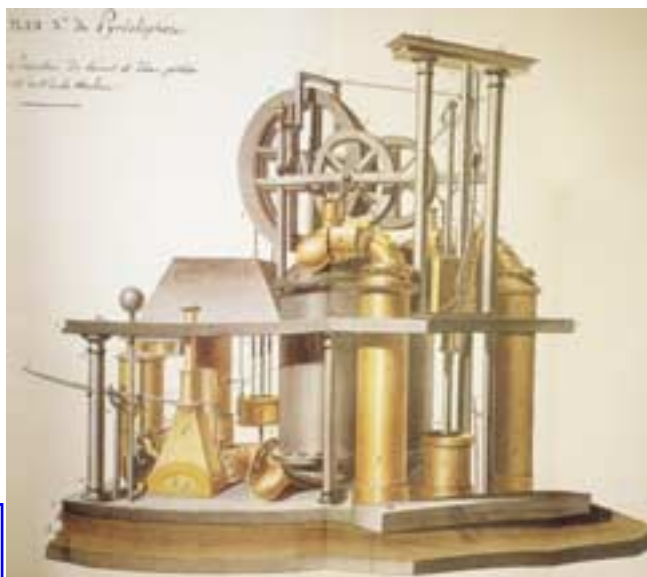
LE PROPULSEUR

Le moteur propulsait un bateau en aspirant, puis en expulsant de l'eau. Ce n'était pas une méthode nouvelle : le médecin anglais John Allen avait déposé un brevet de moteur en 1729 et, à Bâle, le professeur de physique Daniel Bernoulli avait émis les mêmes idées vers 1730, dans un ouvrage récompensé par l'Académie des sciences de Paris.

Comment un mouvement alternatif de l'eau crée-t-il une force résultante de propulsion ? On peut simplifier en disant que le bateau avance en raison de la différence de vitesse des flux entrant et sortant, et de leur direction (voir la figure 1a).

D'après les inventeurs, leur bateau se déplaçait à environ cinq kilomètres par heure, soit deux fois plus vite que le courant de la Saône. Malheureusement, il n'y eut d'autres témoins de cette première que les deux frères eux-mêmes !

Le moteur fit sensation, et Claude Berthollet et Lazare Carnot firent une com-



2. Ces plans du pyrèlophore ont été réalisés par les frères Niépce. Ils représentent leur premier moteur, celui qui a propulsé un petit bateau, sur la Saône, en 1806.

munication sur ce sujet à l'Institut de France, ce qui n'empêcha pas l'innovation de tomber dans l'oubli. Le pyrèlophore sera même totalement négligé dans l'histoire des moteurs. Il n'eut aucune influence sur l'évolution des moteurs à combustion interne ultérieurs : même si sa consommation de carburant était inférieure à celle des machines à vapeur, ces dernières restaient intéressantes pour la propulsion des bateaux ; de plus, la méthode de propulsion utilisée dans le pyrèlophore était moins appropriée que l'emploi d'hélices.

Comme le montre le succès du moteur à gaz d'Étienne Lenoir qui date de 1860 et qui fut le tout premier moteur industriel à explosion, il y avait seulement une demande pour les moteurs de faible puissance, à laquelle les machines à vapeur ne répondaient pas. Or, le pyrèlophore ne pouvait pas, non plus, satisfaire cette demande.

Peu de temps avant que leur brevet ne vienne à expiration en France, les frères Niépce ont voulu perfectionner leur moteur. Leurs efforts se sont concrétisés par un brevet anglais, déposé en 1817 : le moteur était fondé sur le même principe, mais utilisait un système de combustion modifié. La principale modification concernait le carburant : «Nous préférons les huiles essentielles.» Toutefois, l'utilisation du pétrole n'est pas mentionnée, bien que Nicéphore ait obtenu d'excellents résultats avec ce carburant. Le nouveau pyrèlophore n'a jamais fonctionné, victime de l'inconstance de Claude, qui préférait passer d'une invention à une autre plutôt que d'en achever une.

Nicéphore avait tort quand il affirmait que cette découverte «inscrirait leur nom dans la postérité». De surcroît, ils n'ont pas été les inventeurs du moteur à combustion interne, comme l'ont prétendu certains de leurs biographes. En

fait, il n'y a pas d'inventeur de ce moteur, pas plus qu'il n'y a eu d'inventeur de l'automobile, car ces «inventions» ont été le résultat d'une évolution où les travaux de nombreux physiciens, chimistes, ingénieurs et techniciens se sont combinés pour aboutir aux moteurs modernes. Il n'y a eu que des inventeurs de composants particuliers ou de procédés nouveaux.

Quand on recense les divers moteurs à combustion interne, on constate que celui de frères Niépce n'était pas le premier, comme cela est parfois mentionné dans la littérature scientifique. On ignore si les frères Niépce connaissaient le moteur à hydrocarbures de Robert Street (1794), le moteur à gaz de Philippe Lebon (1801) et celui d'Isaac Rivaz (1805). Toutefois, aucun de ces modèles n'a pu les inspirer, car le principe de leur moteur était entièrement différent.

LA CONTRIBUTION DES FRÈRES NIÉPCE

Quelle fut donc la contribution des frères Niépce à la mise au point du moteur à combustion ? Ils ont introduit plusieurs nouveautés, notamment l'usage du pétrole, terme qui désignait alors les fractions légères et moyennes des distillats. Toutefois, l'usage du pétrole était peu répandu, parce que sa production annuelle était infime (elle n'atteignait même pas la quantité que l'on consomme aujourd'hui en une minute). Les frères Niépce ont également inventé une nouvelle méthode d'introduction du pétrole, que l'on pourrait qualifier de méthode par injection directe à durée contrôlée.

En outre, Nicéphore fit plusieurs observations originales au cours des expériences préliminaires de 1816 et 1817 : la fraction liquide du pétrole est le combustible le plus efficace ; le combustible

doit être introduit à l'état liquide et non pas vaporisé (on ignorait encore qu'un liquide inflammable finement pulvérisé brûle aussi vite et aussi complètement qu'un mélange de vapeur d'hydrocarbures et d'air) ; le carburant liquide doit être injecté sous pression pour que l'atomisation soit suffisante et l'évaporation rapide ; l'injection du pétrole par de l'air comprimé donne de meilleurs résultats ; en évitant tout contact des combustibles liquides avec des surfaces chaudes, on empêche la décomposition thermique ; une flamme est plus efficace pour déclencher la combustion qu'une mèche incandescente. Malheureusement, Nicéphore n'a transmis toutes ces observations essentielles qu'à son frère.

En 1862, Alphonse Beau de Rochas déposait un brevet où l'excellente idée du moteur à quatre temps (utilisée dans la plupart des moteurs modernes) était noyée dans un fatras de considérations inutiles. Comme l'inventeur ne payait pas la redevance annuelle, son brevet ne fut même pas publié.

Vingt ans plus tard, et six ans après la construction d'un moteur à quatre temps, on redécouvrit que Beau de Rochas en avait décrit le principe. Il fut célébré à la mesure de cette invention, bien qu'il ne contribuât en aucune façon à sa réalisation. De même, Nicéphore Niépce aurait pu être cité comme l'un des pères des moteurs à carburants liquides, mais personne n'a été informé de ses résultats.

Horst HARDENBERG est professeur de thermodynamique des moteurs Diesel à l'Université de Stuttgart. Il a tenu une conférence sur le pyrèlophore lors du colloque international Nicéphore Niépce, une nouvelle image, organisé par le Conseil régional de Bourgogne, en janvier 1998.



La mastication

HERVE THIS

Comprenant comment nous mâchons, nous concevrons différemment les plats.

Kellog – oui, celui des petits déjeuners – préconisait une hygiène de vie fondée sur la mastication approfondie : «*Masticate, masticate.*» Son idée n'était pourtant qu'un avatar d'une vieille tradition orientale, qui voulait que chaque bouchée de riz (complet) soit mâchée cent fois. Une fois, dix fois, cent fois... mais, au fait, pourquoi mastiquons-nous ? Bien sûr, la mastication divise les aliments, formant des bouchées si petites que, lubrifiées par la salive, elles descendent facilement dans le système digestif. Toutefois Jons Prinz et Peter Lucas, à l'Institut odontologique de Londres, ont identifié une autre fonction : sans le savoir, nous mâchons jusqu'à ce que les fragments alimentaires soient liés par la salive en une bouchée compacte, que nous avalons en minimisant le risque que de petites particules fassent une fausse route, vers le canal respiratoire. À chaque aliment correspondrait ainsi un nombre optimal de mouvements masticatoires.

En affirmant que «les animaux se repaissent, l'homme mange», Jean-Anthelme Brillat-Savarin voulait oblitérer notre composante animale, celle-là même qui dérangeait les Précieuses : elles mirent les mousses à la mode, parce que ces dernières leur évitaient «le mouvement disgracieux de la mastication». Pourtant, un bon croustillant ! Un gluant ! Un craquant ! Pour profiter de l'éventail que nous offre l'univers culinaire, acceptons notre humaine condition et tournons nos particularités physiologiques à l'avantage de la gourmandise.

La mastication divise les aliments en morceaux de diamètre inférieur à celui du pharynx. Toutefois nous poursuivons la division bien au-delà de cette limite : notre organisme de mammifère, qui dépense beaucoup d'énergie, utilise la mastication pour diviser les aliments et augmenter la surface totale, accessible aux enzymes digestives ; indirectement la mastication accélère l'assimilation.

J. Prinz et P. Lucas ont créé un modèle de la mastication pour savoir comment la salivation assurait la cohérence des particules formées, au cours de la mastication. Leur modèle recense les diverses forces qui s'exercent sur les particules alimentaires : des adhérences entre particules et des adhérences des particules

aux surfaces buccales ; ces forces dépendent de la sécrétion de salive et de la quantité de jus exprimée par la mastication.

Lors des mouvements de la bouche, les petits morceaux sont moins divisés que les gros. D'autre part, quand un fragment est divisé, il l'est en un nombre de morceaux qui dépend des caractéristiques mécaniques de l'aliment. Pour simplifier la modélisation, les deux physiologistes britanniques ont supposé que chaque particule était divisée en particules sphériques et ils ont calculé la force de tension superficielle totale.

Enfin les deux chercheurs ont admis que les particules s'agglomèrent quand la force d'adhérence des fragments, dans une bouchée, est supérieure à la force d'adhérence des fragments à la paroi de la bouche. À l'aide d'un ordinateur qui calculait numériquement les diverses forces et en utilisant des valeurs des divers paramètres tirées d'études de physiologie humaine, ils ont alors déterminé la cohésion des bouchées sur 150 cycles masticatoires et pour deux aliments aux comportements très différents : des carottes crues, qui se brisent très lentement, et des noix du Brésil, qui se divisent bien plus rapidement.

Le calcul a montré que la cohésion des bouchées, initialement faible, augmente rapidement, devient maximale



Répartition des fragments d'aliments au début (en haut) et à la fin de la mastication d'un aliment (en bas).

après une vingtaine de cycles, puis diminue quand les particules sont de plus en plus divisées.

Comment tester le modèle proposé ? Les cohérences calculées ont été comparées à des cohérences mesurées sur des bouchées qui ont été recrachées après avoir été mâchées : l'accord entre la théorie et la pratique est assez bon, mais les nombres de cycles masticatoires effectivement effectués sont un peu supérieurs aux nombres calculés, sans doute parce que nous ne sommes pas seulement des machines à absorber de la nourriture : «Le Créateur, en obligeant l'homme à manger pour vivre, l'y invite par l'appétit, et l'en récompense par le plaisir» ; ayant du plaisir à manger, nous prolongeons ce plaisir en mastiquant plus que les simples besoins de la cohésion des fragments.

MODÈLE ET CUISINE

Que déduire enfin du modèle, en pratique culinaire ? Que les caractéristiques des aliments peuvent déclencher ou réduire la mastication, au choix. Tout d'abord, on observera que l'ajout de composés qui fluidifient la salive (les tanins, par exemple) ou l'augmentation de la concentration en liquides exprimables par les dents, en réduisant la cohérence, devraient allonger la mastication : le mangeur profitera davantage du plat qu'il consomme. Est-ce pour cette raison que les gourmands boivent du vin (qui contient des tanins) avec les mets ?

A l'inverse, des épaississants devraient accélérer l'absorption : c'est gênant pour l'industrie qui en utilise dans les produits allégés, notamment, car une moindre mastication s'accompagne d'une moindre libération de molécules aromatiques et savoureuses. Plus généralement, l'hypothèse d'une détection automatique, par l'organisme, de la cohérence idéale des bouchées, donne des idées au cuisinier qui jongle avec le collant, le gluant, le sec, l'absorbant...

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 27 avril 1997, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Les choix sociaux

CHRISTIAN WALTER

Comment transformer au mieux les préférences individuelles en choix collectifs ? Hélas, on sait qu'il n'existe pas de système de vote qui soit juste !

Comment décider de ce qui sera le mieux pour la collectivité, en présence d'intérêts divergents ? Un exemple paradoxal et archétypique est l'élection d'un homme politique représentatif des préférences individuelles de chacun. C'est un exemple intéressant, du fait que les procédures de vote sont aisément formalisables par les mathématiques.

Prenons le cas où 60 votants ont à choisir entre trois candidats A, B, et C. Pour 23 d'entre eux, le classement est $A > C > B$. Pour 19 d'entre eux, le classement est $B > C > A$. Pour 16 d'entre eux, le classement est $C > B > A$. Pour les deux restants, le classement est $C > A > B$. Aucun votant n'a choisi les ordres de préférence $A > B > C$ ou $B > A > C$ (voir la figure ci-dessous). Quel est le choix social optimal ?

Avec le mode de scrutin uninominal majoritaire à un tour, le candidat A est retenu, recueillant 23 voix (B obtient 19 voix, C obtient 18 voix). Si l'on choisit un mode de scrutin avec majorité relative à deux tours, en conservant les deux meilleurs candidats du premier tour et en introduisant donc un ballottage entre eux, les deux hommes politiques qui ont obtenu le plus de voix sont A et B : le second tour opposera donc A à B. Les 23 et les 19 électeurs qui ont voté pour les candidats A et B confirment leur vote. Comment vont se répartir les voix attribuées à C ? Seize voix de C vont se reporter sur B, et 2 seulement sur A. Au final, B recueille 35 voix, tandis que A ne séduit que 25 électeurs : A est battu face à B. Imaginons à présent que les deux partis B et C soient politiquement proches, et que B se désiste en faveur de C (présentant en C un meilleur candidat pour battre A). Les 23 et 18 électeurs qui ont voté pour A et C confirment leur vote. Le report des 19 voix de B se fait intégralement sur C, qui totalise 37 voix. Autrement dit, lorsqu'il y a un ballottage par introduction d'un deuxième tour, A perd à la fois devant B et devant C. Celui qui arrive en tête du premier tour des élections est battu dans toutes les configurations quand le scrutin introduit un second tour. La règle d'agrégation n'est pas cohérente avec les préférences individuelles.

En 1785, Condorcet imagina une règle d'agrégation qui conserverait la cohérence des préférences individuelles. On compte le nombre de cas où un candidat gagne contre un autre : le gagnant est celui qui est en tête dans ce classement. En appliquant cette règle à l'exemple précédent, C est gagnant. Mais il existe des situations (en rouge sur la figure) où A gagne contre B, B contre C, et C contre A : c'est le paradoxe de Condorcet. Pour résoudre ce paradoxe, Condorcet a proposé de rompre la chaîne $A > B > C > A$ sur le ballottage le plus serré. Si l'écart des voix entre A et B est le plus faible, alors on supprime $A > B$, et B devient le gagnant.

Généralisant le paradoxe de Condorcet, le prix Nobel d'économie Kenneth Arrow a montré que la transitivité individuelle ne peut être agrégée simplement, comme l'illustre le paradoxe de Condorcet. Il n'existe pas de règle de choix social cohérente avec les règles des préférences individuelles. Bien plus, la généralisation des résultats d'Arrow par Wilson, en 1972, a fait apparaître qu'il n'existe pas de procédure de vote réaliste qui soit non manipulable !

	A > B > C	A > C > B	B > A > C	B > C > A	C > A > B	C > B > A
0	23	0	19	2	16	7
9	10	10	12	12	12	7

Scrutin uninominal à un tour :
A a 23 voix, B 19 voix, C 18 voix ;
A est élu.

Scrutin à deux tours où les deux premiers du premier tour participent au second tour :
A a 23 + 2 = 25 voix et B 19 + 16 = 35 voix ;
B est élu.

B se désiste au premier tour pour C :
A a 23 voix et C 19 + 2 + 16 = 37 voix ;
C est élu.

Classement par duel :
B bat A par 19 + 16 = 35 contre 23 + 2 = 25 voix,
C bat A par 19 + 16 + 2 = 39 contre 23 voix,
C bat B par 23 + 18 = 41 voix contre 19 voix ;
C, qui gagne deux duels, est élu.

Classement par duel :
A bat B par 9 + 10 + 12 = 31 contre 10 + 12 + 7 = 29,
B bat C par 9 + 10 + 12 = 31 contre 10 + 12 + 7 = 29,
C bat A par 12 + 12 + 7 = 31 contre 9 + 10 + 10.
Aucune décision n'est possible...

La situation se complique encore lorsque, dans un système d'élections, il existe des seuils de déclenchement de type «tout ou rien», appelés «seuils critiques». La nature abonde en phénomènes de ce type (tas de sable, avalanches...), et la physique du désordre a développé des outils adaptés à ces changements brutaux. Un physicien du CNRS, Serge Galam, les a appliqués aux élections et a étudié le comportement des systèmes électifs en présence de seuils critiques. Par exemple, dans le système communiste hongrois d'avant la chute du mur, à cinq ou six tours successifs, le seuil critique se situait autour de 76 pour cent des voix. Cela signifie que 75 pour cent d'opposition donnaient zéro pour cent de changement, et cela démocratiquement, tandis que, avec 2 pour cent de plus, à 77 pour cent, il y avait 100 pour cent de changement. Ce système à seuil critique élevé a permis de maintenir le parti communiste hongrois au pouvoir pendant plus de 50 ans, mais il en a également assuré la disparition quasi immédiate, dès lors que le seuil critique était franchi. Plus le nombre de niveaux successifs d'agrégation des votes est grand, et plus cela renforce le mécanisme précédent. Au tennis aussi, celui qui gagne la partie n'est pas toujours celui qui a gagné le plus de points. Avec dix niveaux d'agrégation successifs, 77 pour cent des effectifs de la population ne sont pas représentés. Les systèmes à «grands électeurs» (comme les élections présidentielles aux États-Unis ou les élections sénatoriales en France) présentent ce mécanisme d'éviction.

Mécanismes de basculements rares mais brutaux dans les élections à seuils, manipulabilité des procédures de vote majoritaire, absence de procédures réalistes non manipulables... le passage des préférences individuelles aux choix collectifs est un casse-tête politique. Pas pour les mathématiciens éconômistes, qui connaissent aujourd'hui avec précision les arcanes des procédures d'agrégation sociale. Mais sont-ils écoutés ?

La fin des labours

Le semis direct protège les sols des régions tropicales.

Remuez votre champ

dès qu'on aura fait l'outil :

Creusez, fouillez, bêchez :

ne laissez nulle place

Où la main ne passe et repasse.

La recommandation du laboureur de la fable à ses enfants n'est plus d'actualité, du moins dans les régions tropicales où les labours dégradent le sol : des agronomes du CIRAD ont mis au point une méthode de culture où le sol est couvert en permanence de végétation ; on sème sans jamais le retourner. La fertilité des terres est ainsi préservée à long terme, et la productivité et les rendements agricoles sont améliorés.

En climat tempéré, le labour aère et ameublit le sol, favorisant la germination des cultures et éliminant temporairement la flore adventice (les «mauvaises herbes»). En revanche, son application dans les régions de climat tropical ou subtropical s'est souvent révélée catastrophique : les pluies torrentielles des saisons humides érodent le sol ou le tassent, et lessivent les éléments minéraux fertilisants ; en

saison sèche, c'est le vent qui emporte des nuages de poussière.

Dans les années 1950, les fermiers des grandes plaines de l'Ouest américain, confrontés à ces dégradations, décident de laisser sur le sol les résidus de la récolte, principalement des pailles, jusqu'au semis suivant, et cessent de labourer. Ils empêchent la prolifération des plantes indésirables à l'aide d'herbicides spécifiques. Cette méthode est exportée avec succès dans les années 1970 au Sud du Brésil, où le climat est comparable.

À la fin des années 1970, la zone tropicale du Nord du Brésil est défrichée et mise en culture. Le climat y est plus chaud et plus humide, et les résidus de récolte se décomposent trop vite : le sol se dénuie avant que la culture principale ne couvre bien le sol. Lucien Ségué et Serge Bouzinac, du CIRAD, en relation avec des producteurs locaux, modifient alors la technique de semis direct : ils protègent le sol par une couverture végétale vivante. Juste avant les semis, cette couverture est amincie et desséchée (mais pas supprimée) suivant les lignes de semis, avec un herbicide spécifique ou par roulage mécanique. À l'aide d'outils adaptés, les graines sont ensuite enfouies à quelques centimètres de profondeur, accompagnées d'une dose d'engrais qui leur permet de germer avant la repousse de la plante de couverture.

Outre la protection physique du sol, la couverture végétale vivante a de multiples avantages. D'abord, on choisit des plantes

dont les racines pénètrent à des profondeurs différentes de celles de la culture principale : légumineuses pour les cultures de maïs ou de riz, graminées pour les cultures de haricots ou de soja. Les éléments minéraux du sol non utilisés par la plante en culture sont ainsi recyclés et remontés près de la surface par la couverture. Une couverture de légumineuses enrichit même le sol en composés azotés fertilisants. Les plantes de couverture étouffent aussi les herbes adventices et limitent parfois les maladies des cultures, voire la prolifération des ravageurs. Enfin, leurs racines aèrent et stabilisent le sol.

Le rendement des terres cultivées en semis direct est au moins égal à celui des terres labourées ; il est même supérieur après quelques années. Ce n'est pas le seul atout économique de la technique : la préparation du sol est réduite ; le temps ainsi gagné peut être consacré à d'autres activités qui accroissent le niveau de vie des paysans ; moins d'engrais est nécessaire, ce qui réduit d'autant les coûts de production ; enfin, la couverture vive des champs est, dans certains cas, utilisable comme pâtures pour le bétail.

En 1997, près de 20 pour cent des terres cultivées du Brésil, soit sept millions d'hectares, l'étaient en semis direct. Les agronomes adaptent aujourd'hui cette approche à l'agriculture peu intensive et peu mécanisée de pays africains et de l'océan Indien : Gabon, Côte-d'Ivoire, Madagascar et Réunion.



Michel Ranaivosoa / IFAD

À Madagascar, comme dans les autres pays tropicaux, l'érosion détruit de nombreux sols cultivés, tel ce champ de haricots (à gauche). Une couverture permanente de légumineuses (à droite) protège le



sol : celui-ci n'est plus labouré, et les haricots sont semés suivant des lignes où la couverture est préalablement amincie et asséchée par un herbicide spécifique.

Microlentille

Une lentille gravitationnelle détectée dans la direction du Petit Nuage de Magellan.

Depuis les années 1930, des mesures de la masse des galaxies et des amas de galaxies ont montré que la plus grande partie de cette masse n'émettait pas de lumière. Seuls ses effets gravitationnels sur des corps lumineux trahissent sa présence. Cette matière sombre, située dans le halo des galaxies, serait constituée de matière exotique, des particules dont la nature reste à découvrir, et de matière ordinaire, sous la forme de petites étoiles non lumineuses, de naines brunes, de petites étoiles à neutrons, de trous noirs ou encore de nuages de gaz et de poussières.

Comment détecter la matière sombre ordinaire, alors qu'elle n'émet pas de lumière ? Par un effet de lentille gravitationnelle : comme une lentille optique, un objet massif dévie la lumière. Ainsi, lorsqu'un tel objet traverse la ligne de visée entre un observateur et une étoile lointaine, les rayons lumineux de l'étoile sont temporairement focalisés : on détecte une amplification de la lumière reçue, dont la durée augmente avec la masse de l'objet sombre et décroît avec la vitesse de passage de l'objet dans la ligne de visée. Cette durée dépend aussi de la distance. Comme l'effet n'apparaît que si l'alignement entre l'étoile lointaine et l'objet massif est parfait, la probabilité d'observer une telle amplification est faible.

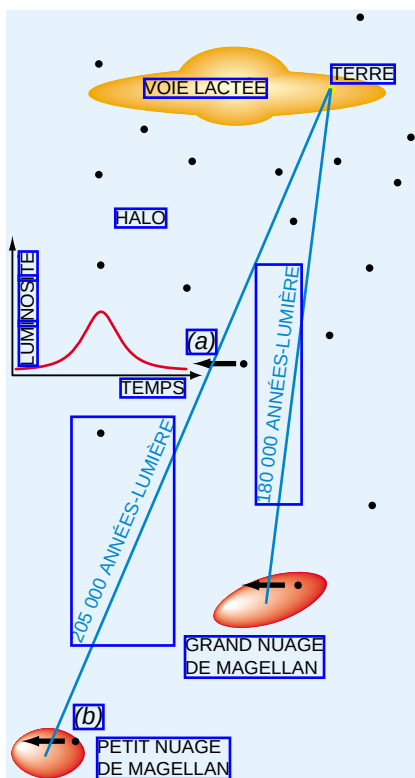
Depuis six ans, pour sonder le halo de notre Galaxie, la Voie lactée, plusieurs équipes surveillent quelques millions d'étoiles de deux galaxies voisines, le Grand Nuage de Magellan, situé à 180 000 années-lumière du Soleil, et le Petit Nuage de Magellan, situé à 205 000 années-lumière, en espérant que les objets massifs du halo passeront devant ces étoiles.

Deux expériences ont étudié le Grand Nuage de Magellan. La première, qui recherchait les objets de masse 1 000 à dix millions de fois inférieure à la masse du Soleil, n'a trouvé aucune lentille. La seconde, qui recherchait les objets plus massifs, détecta huit microlentilles, toutes avec des durées d'amplification inférieures à une semaine. En combinant ces résultats avec ceux d'autres équipes, on estima que moins de 20 pour cent de la matière du halo est sous la forme de naines brunes, des astres trop légers pour briller comme les étoiles. Les résultats sont éga-

lement compatibles avec un halo peuplé pour la moitié de sa masse d'objets sombres d'environ 0,5 masse solaire. Pour l'instant, on ignore la nature d'objets invisibles d'une telle masse.

En juin 1997, nous avons, en même temps que l'équipe MACHO, décelé la première lentille gravitationnelle dans la direction du Petit Nuage de Magellan. La durée d'amplification est plus de deux fois supérieure à celles qui étaient mesurées dans le Grand Nuage. De quel objet s'agit-il ? Si la lentille d'où résulte l'amplification de luminosité est située dans le halo de notre Galaxie, sa masse serait comprise entre deux et trois masses solaires. Un objet invisible d'une telle masse ne pourrait être qu'un trou noir ou une étoile à neutrons. En revanche, si la lentille qui a créé cette amplification appartient au Petit Nuage de Magellan. La longue durée de l'amplification résulterait de la faible vitesse relative de la lentille par rapport à l'étoile source. La lentille serait alors une étoile ordinaire d'environ un dixième de la masse du Soleil.

Seules des mesures supplémentaires et une comparaison statistique entre la direction du Grand et du Petit Nuage per-



Notre Galaxie est baignée dans un halo de matière en mouvement. Lorsque des condensats sombres (points noirs) passent devant des étoiles lointaines, comme celles de galaxies voisines, leur lumière est concentrée et on mesure une amplification momentanée. Dans la direction du Petit Nuage de Magellan, on a détecté une telle amplification, mais on ignore encore l'emplacement de l'objet sombre : dans le halo (a) ou dans cette petite galaxie (b) ?

BRÈVES

3,14159.....0123456789...

Le mathématicien Luitzen Brouwer n'admettait pas les propositions qu'aucune méthode ne permet de prouver ou d'infirmer. Comme on ne pouvait alors déterminer la présence de la suite 0123456789 dans la suite des décimales de π , il excluait la proposition : « La suite 0123456789 est présente dans les décimales de π . » La question a été résolue par Y. Kanada et D. Takabashi : la suite 0123456789 arrive à la 17 387 594 880 ième décimale de π .

L'eau sur la Lune rebondit

Fin 1996, la sonde *Clementine* découvrait de la glace dans un cratère du pôle Sud lunaire. Quelques mois plus tard, des observations au radiotélescope d'Arecibo infirmaient ce résultat. Aujourd'hui, nouveau rebondissement : la sonde *Lunar Prospector*, en orbite autour de la Lune depuis janvier 1998, annonce la découverte de glace, non seulement dans des cratères du pôle Sud, mais aussi au pôle Nord. Les mesures du spectromètre à neutrons indiquent que sa quantité totale est comprise entre 10 et 300 millions de tonnes.



De longues batteries

Le succès des téléphones portables est limité par leur faible autonomie : quelques heures avec des batteries au cadmium-nickel. Dotés de piles à combustible (alimentées au méthanol, par exemple), ces appareils pourraient fonctionner pendant plus de quatre mois sans interruption.

Planète rouge

La dizaine de planètes extrasolaires que l'on a découvertes ces dernières années étaient toutes autour d'étoiles jeunes. Toutefois des astronomes hollandais ont observé un disque de poussières, analogue à celui que l'on observe autour de ces étoiles, autour d'une étoile riche en oxygène, et donc déjà évoluée. La composition du disque, riche en molécules qui contiennent de l'oxygène, dont du dioxyde de carbone et des silicates cristallins, suggère que des planètes s'y forment. Même les vieilles étoiles ont des enfants...

Suite page 22

Des clones partout

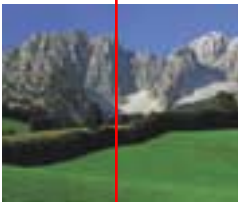
Alors même que l'INRA annonce le clonage de bovins, des associations préconisent le clonage de personnages célèbres. Un groupe d'Américains voudrait cloner Elvis Presley, et des chrétiens préconisent le clonage de Jésus à partir de cellules prélevées sur le suaire de Turin.

Palindrome

John Baxter, qui a étudié le cri de plus de 800 animaux, affirme que 12 pour cent de ces cris sont «palindromiques» : le son inversé temporellement est identique au son émis. Selon lui, il s'agirait d'un avantage adaptatif, car ces cris symétriques sont plus faciles à retenir. De même, a-t-il observé, le cri de Tarzan serait un palindrome.

Plus frais au fond

Des météorologues de l'Université de Grenoble ont collaboré avec des océanographes du Havre afin d'explorer le gradient thermique de l'atmosphère.



L'équipe de Grenoble s'est placée en altitude et a utilisé des tuyaux de diverses longueurs (entre 100 mètres et deux kilomètres) pour aspirer des échantillons d'air qui étaient tous analysés en un même site. Le résultat est sans appel : au ras de l'océan comme au fond des vallées, les couches basses de l'atmosphère sont plus froides.

Football sur l'Internet

Les lents débits de transmission sur le réseau Internet y empêchent les retransmissions dans de bonnes conditions. Aussi, une société israélienne a mis au point un système qui permettra aux fans de suivre les matchs de leur équipe de football préférée. Un radar suivra l'évolution des joueurs aux maillets desquels un transpondeur de la taille d'une carte de crédit sera cousu. Un ordinateur, qui sait ainsi où se trouve chaque joueur, crée une modélisation tridimensionnelle du jeu.

Rideaux d'air

Un rideau d'air, mis au point par le Centre scientifique et technique du bâtiment, arrête les écoulements de fumée et de polluants. Pour ce faire, la vitesse du jet est ajustée en fonction de la différence de pression à contrer et de la hauteur du couloir. Ces rideaux serviraient également pour isoler les guichets de péage des autoroutes.

Suite page 24

mettront de trancher entre ces deux hypothèses. La détection d'amplifications de durées similaires en direction du Grand Nuage de Magellan montrera que les caractéristiques des lentilles sont indépendantes de la direction, et l'on pourra conclure que le halo contient des objets massifs, tels des étoiles à neutrons ou des trous noirs de quelques

masses solaires. En revanche, si les lentilles appartiennent aux Nuages de Magellan, les durées d'amplification mesurées devraient être inférieures dans la direction du Grand Nuage, puisque celui-ci étant le plus massif, les étoiles s'y déplacent plus rapidement.

E. AUBOURG, N. PALANQUE et M. SPIRO
CEA-Saclay, collaboration EROS

Les insectes, indices d'un genre nouveau ?

Les insectes révéleraient l'état des milieux... s'ils étaient plus étudiés.

Biodiversité est un maître mot : elle est menacée, à l'échelle mondiale, par la disparition des forêts tropicales, l'accroissement de la population et l'urbanisation, l'agriculture et l'élevage intensifs, la pollution, etc. La prise de conscience des enjeux liés à la biodiversité a conduit de nombreux pays à protéger certains territoires ou certaines espèces. Une telle protection présente de considérables difficultés politiques, économiques, juridiques, techniques ou scientifiques.

Certaines d'entre elles trouvent rarement écho dans les médias. Avant de protéger un territoire ou une espèce, il faut diagnostiquer son intérêt. Et là, les choses se corsent dès que l'on sort du cas des forêts tropicales – dont la richesse biologique est évidente – ou de celui d'espèces rares et spectaculaires (tigres,

pandas, baleines et autres gros mammifères ou oiseaux).

En particulier, la plupart des inventaires de flore et de faune que l'on a réalisés pour évaluer la biodiversité et la qualité biologique d'un milieu naturel font peu ou prou l'impasse sur les insectes (et les invertébrés en général). Pourtant avec quelque 900 000 espèces décrites – et sans doute des millions encore inconnues –, les insectes représentent de loin le groupe le plus important du vivant. Ce paradoxe était la toile de fond d'un colloque organisé par l'AIDEC (Association internationale des entretiens écologiques) et l'UEF (Union de l'entomologie française).

Comment expliquer la part aujourd'hui insuffisante des insectes dans la gestion de l'environnement ? Une difficulté essentielle tient à l'énorme diversité de ce groupe. Pour la France seule, on connaît environ 36 000 espèces. Or, «à part quelques espèces facilement reconnaissables, l'identification précise d'un spécimen nécessite le recours à un spécialiste», rappelle l'entomologiste Lucien Leseigneur. Sachant que même un spécialiste ne peut connaître en détails plus de quelques centaines d'espèces, qu'il s'agit souvent des mêmes



Pour estimer la qualité écologique d'un milieu aquatique, on établit l'inventaire d'insectes exigeants vis-à-vis de leur habitat, notamment certaines libellules (ici une femelle de l'espèce *Cordulia aenea*).

groupes (coléoptères, papillons, insectes vecteurs de maladies, etc.), que l'entomologie est depuis longtemps délaissée par les organismes de recherche, on devine la pénurie d'experts auxquels les instances environnementales voudraient faire appel. «Les entomologistes professionnels sont peu nombreux et ne sont pas très disponibles, et les amateurs [quelques milliers en France] sont vite surchargés», résume L. Leseigneur.

S'ajoutent des problèmes d'ordre scientifique. Prendre en compte les insectes dans l'évaluation écologique d'un milieu, d'accord, mais lesquels ? Faut-il dénombrer uniquement les espèces rares ? Celles qui sont sensibles à la pollution ? Choisir des représentants de tous les groupes d'insectes ? Se limiter au genre ou à la famille, comme le préconise Philippe Richoux (Université de Lyon I), ce qui allégerait le travail d'identification ?

Malgré les nombreuses questions en suspens, des listes d'insectes bio-indicateurs existent, pour les zones humides et les forêts notamment ; d'autres types de milieux pourraient suivre. Par exemple, la présence de certaines guêpes parasites d'insectes nuisibles pourrait être mesurée pour jauger la santé des oliveraies du Midi, comme le montrent des travaux d'André Panis (INRA, Antibes). Toutefois, les connaissances – et donc les listes d'espèces indicatrices de la qualité d'un milieu – sont encore lacunaires. Pour améliorer la situation, il faut, selon Jean-Claude Lefeuvre, écologue au Muséum de Paris, que les entomologistes français «s'organisent et s'insèrent dans les programmes de recherche pluridisciplinaires sur les écosystèmes».

La balle n'est pas seulement dans le camp des entomologistes. Pour ces derniers, une gestion «écologiquement cor-

recte» des milieux (naturels ou non) demande que les acteurs de l'environnement – y compris les forestiers, les agriculteurs, les aménageurs en tous genres – soient conscients de l'importance du rôle des petites bêtes. Malgré quelques progrès, les entomologistes pensent qu'il y a encore fort à faire.

Les enjeux dépassent le cadre de la seule biodiversité. L'exemple de l'Australie est symptomatique : l'introduction, à la fin du XVIII^e siècle, des vaches et des chevaux y a provoqué une catastrophe. Pourquoi ? Parce que les insectes bousiers autochtones sont adaptés aux bouses de kangourous, pas à celles de vaches... Résultat : les bouses, privées de recycleurs, ont recouvert les prairies. En 1978, on estimait la perte associée de pâturages à un million d'hectares par an !

Maurice MASHAAL

Attracteurs d'onde

Dans un milieu stratifié avec un fond incliné, les ondes s'organisent le long de trajectoires fermées.

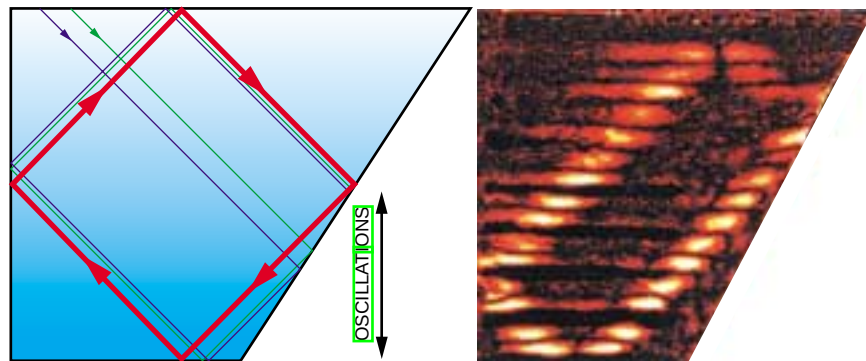
Si la houle agite la surface de l'océan, des ondes dites internes se propagent également sous la surface en raison des variations verticales de la densité de l'eau. Elles pourraient circuler en boucle : dans une cuve avec une paroi inclinée, où les ondes sont excitées par des vibrations, nous observons que les réflexions de ces ondes leur font suivre des trajectoires qui se rapprochent de circuits déterminés, nommés attracteurs.

Les ondes internes sont connues dans l'atmosphère, où elles sont engendrées par le passage des masses d'air sur les reliefs : parfois les nuages se condensent dans les zones d'ascendance et révèlent les crêtes de ces ondes. Ces ondes résultent des variations de densité : comme la densité diminue avec l'altitude, une petite quantité d'air poussée vers le haut a tendance à redescendre, car sa densité est supérieure à celle de la zone où elle arrive ; inversement, une petite quantité d'air poussée vers le bas subit une poussée d'Archimède qui la fait remonter. Toutefois ces rappels engendrent des oscillations, à une fréquence caractéristique de la variation de densité, de la même façon que l'oscillation d'une masse accrochée à un ressort est caractéristique de sa raideur.

Si la masse oscille sur un plan incliné, la fréquence d'oscillation est réduite ; de même, une onde interne a une fréquence réduite quand elle se propage obliquement. Pour une variation de densité donnée, l'angle de propagation dépend uniquement de la fréquence.

Si l'océan ou l'atmosphère semblent des espaces infinis, un bras de mer ou un lac sont des milieux de densité variable (en raison des variations de température ou de salinité), où les ondes sont confinées par réflexion entre la surface et le fond. Généralement, le confinement d'ondes engendre un système d'ondes stationnaires : une corde de violon vibre à une fréquence fondamentale et aux fréquences multiples de cette fréquence fondamentale. En effet, le milieu n'oscille efficacement qu'à des fréquences précises, parce que les ondes résultant des réflexions successives n'interfèrent de façon constructive qu'à ces modes propres d'oscillation.

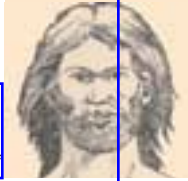
Lorsque des ondes internes se propagent dans un milieu où la densité varie, à l'intérieur d'une cuve avec une paroi inclinée, cette organisation en modes propres disparaît au profit d'une organisation différente qui résulte des propriétés particulières de réflexion. En effet, la fréquence des ondes qui se réfléchissent sur une paroi fixe est inchangée au cours de la réflexion ; comme l'angle de propagation des ondes internes par rapport à la verticale dépend de la fréquence, cet angle reste donc inchangé ; l'angle de réflexion est alors différent de l'angle d'incidence, et les ondes forment des structures complexes, organisées autour d'un attracteur, un circuit géométrique sur lequel les ondes se focalisent par ré-



Des ondes internes se propagent dans de l'eau salée quand on fait osciller verticalement une cuve où la densité augmente avec la profondeur. La direction de propagation dépend de la fréquence des oscillations : dans le schéma (à gauche), les oscillations excitent uniquement les ondes qui se propagent avec un angle de 45 degrés par rapport à la verticale. Ainsi, deux ondes qui suivent des trajectoires différentes se rapprochent et parcourent l'attracteur (en rouge). Dans les expériences, la fluorescence d'un colorant excitée par un laser (à droite) révèle l'attracteur.

La préhistoire tirée par les cheveux

Dans sa vie, un homme perd en moyenne 400 000 cheveux ; dans un milieu favorable, ils pourraient se conserver très longtemps. Jean Clottes, du Ministère de la Culture, et Robson Bonnichsen, de l'Université de Corvallis, ont prélevé des sédiments de 25 000 à 13 000 ans environ, dans les grottes d'Enlène, en Ariège, de Troubat, dans les Hautes-Pyrénées, de Brassempouy, dans les Landes, et de Combe Saunière, en Dordogne, autrefois fréquentées par l'homme. Une douzaine de poils et de cheveux ont déjà été isolés, dont deux ou trois seraient humains. Est-ce la naissance de l'hirsutologie?



Dyslexie

Depuis quelques années, on pensait que les dyslexiques avaient des difficultés à reconnaître les phonèmes, les briques constitutives du langage, ce qui les gênait pour lire. En utilisant la résonance magnétique fonctionnelle pour étudier des sujets qui effectuaient des analyses phonologiques, Sally Shaywitz et ses collègues de l'Université Yale ont observé que les régions postérieures du cerveau, où le langage est traité, sont moins actives chez les dyslexiques. La mise en évidence de cette signature pourrait favoriser le diagnostic de cette difficulté de lecture.

Des vaisseaux qui repoussent

Lorsque les artères coronaires se bouchent, le cœur est menacé. Le remède est la greffe d'un morceau de veine ou d'une prothèse artificielle, mais ces greffes sont souvent fragiles. Une équipe allemande vient de tester l'injection d'un facteur de croissance des vaisseaux sanguins dans le muscle cardiaque de 20 patients, près d'un obstacle dans une artère : après une douzaine de jours, un réseau de capillaires fonctionnels était apparu entre l'artère et le cœur.

Partenaires variables

Les hommes avouent en moyenne 12 partenaires sexuels au cours de leur vie, et les femmes seulement trois. Même en tenant compte du déséquilibre démographique entre les deux sexes et du recours à la prostitution féminine, le compte n'y est pas. Selon Michel Bozon, de l'INED, les femmes ne comptent pas les partenaires occasionnels. Lorsque l'on demande plus précisément aux hommes de combien de femmes ils ont été amoureux au cours de leur vie, ils annoncent aussi un chiffre proche de trois.

flexions multiples sur les parois. Cette propriété particulière conduit les ondes à s'approcher de l'attracteur, puis à le parcourir en circuit fermé.

Comment vérifier cette prédiction théorique ? Nous avons rempli d'eau salée une cuve carrée que nous avons ensuite fait osciller verticalement à l'aide d'un système de bielles. Les ondes internes sont excitées pour des fréquences de résonance précises, comme les vibrations d'une corde de violon. Au contraire, quand on ajoute une cale inclinée dans la cuve et que l'on examine la propaga-

tion des ondes internes à l'aide d'un colorant fluorescent excité par un laser, on voit l'attracteur attendu.

Le même phénomène pourrait se manifester dans les bassins naturels. L'attracteur définirait alors des zones de mélange turbulent, favorisant la vie en soulevant les éléments nutritifs déposés au fond. Certaines oscillations du noyau terrestre, constitué de métal liquide, ou d'étoiles produisent-elles également des attracteurs d'ondes ?

Dominique BENIELLI et Joël SOMMERIA, École normale supérieure de Lyon

Gravure préhistorique

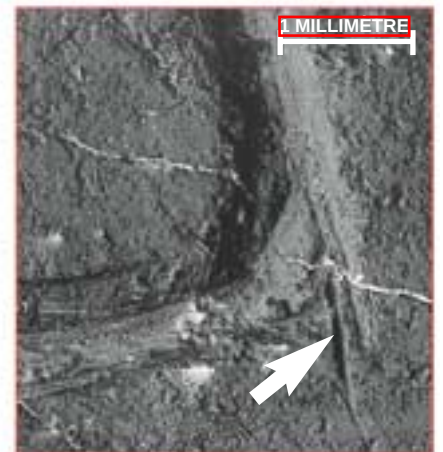
Qualité technique et esthétique ne sont pas toujours associées.

Comment évaluer la qualité des œuvres artistiques de la Préhistoire, apparues en Europe en même temps que l'homme moderne, il y a environ 40 000 ans ? L'étude de cet art paléolithique, dont les manifestations sur les parois des grottes ou sur les objets en pierre, os ou bois de cervidé, s'étendent sur 30 000 ans, repose souvent, sur des critères stylistiques : nous qualifions de « beau » un sujet bien proportionné et détaillé ; au contraire, le jugement est plus négatif lorsque le dessin est maladroit. Toutefois, ces œuvres que nous rangeons aujourd'hui avec admiration et respect dans le domaine de l'art résultent d'une suite de gestes techniques qui ont transformé un matériau naturel en objet décoré. L'examen des traces microscopiques laissées par les outils des artistes sur des objets en os permet de porter un jugement technique : la qualité du trait gravé ne reflète pas nécessairement la qualité esthétique du dessin.

Nous avons répété les gestes des graveurs préhistoriques à l'aide de supports en os et de silex contemporains. Nous avons ainsi répertorié les difficultés rencontrées et les erreurs techniques qui en résultent : résistance de la matière,

dérapages, accrochages d'outil... L'observation de ces gravures expérimentales au microscope électronique à balayage nous permet d'associer des traces microscopiques caractéristiques aux différents modes d'utilisation de l'outil en silex et aux accidents gestuels.

Puis nous avons recherché des traces microscopiques analogues sur 90 objets d'art mobilier de la période Magdalénienne du Sud-Ouest de la France (il y a 16 000 à 12 000 ans). Sur l'ensemble des pièces étudiées, il apparaît que la qualité de dessinateur n'est pas toujours associée à celle de parfait technicien. Des objets de bonne, voire de très bonne facture esthétique, comportent des indices microscopiques d'exécution maladroite. Au contraire, des objets au graphisme hésitant,



L'artiste qui a gravé ces deux rennes de façon très réaliste sur un fragment de côte ne maîtrisait pas complètement son outil : la photographie en microscopie électronique (en haut) indique que le trait est trop long (flèche) à la sortie de la croupe du premier renne.

tant ont été réalisés par des graveurs qui maîtrisaient bien le maniement de leurs outils. Un artiste expérimenté, maître du dessin, peut rencontrer des difficultés d'exécution, d'ordre purement technique ; en revanche, un médiocre dessinateur peut avoir maîtrisé le guidage de son outil à la surface de l'os.

Statistiquement, les dessins de figures dynamiques présentent plus de traces d'accidents (dérapages, accrochages d'outil). L'exécution d'animaux en mou-

vement est plus difficile pour le graveur, notamment la réalisation des courbes qui animent le sujet : l'artiste attaque les fibres osseuses perpendiculairement à leur orientation, ce qui accroît la résistance de la matière. Le graveur augmente donc la puissance de ses gestes et, dans ces moments critiques, l'outil peut échapper au contrôle de la main.

Ainsi, un fragment de côte, provenant du gisement de l'Abri Morin, en Gironde, conserve l'image soignée de deux rennes

courant en file, vers la droite. L'analyse microscopique confirme la première impression : les tracés sont fermes et bien appuyés, avec des bords réguliers. Néanmoins, on observe quelques accidents, conséquences d'accrochages d'outil et de dérapages. Les gravures sont le fait d'un graveur expérimenté, maîtrisant parfaitement le dessin, mais qui éprouve quelques faiblesses dans la réalisation des courbes.

Carole FRITZ, UMR 5608 du CNRS et Laboratoire des Musées de France

Curiosités d'élevage

Connus des éleveurs, les oiseaux «half-siders» ont des caractères appartenant à deux variétés différentes : on a vu des perruches ondulées qui étaient bleues d'un côté du corps, vertes de l'autre (voir la figure 1), des canaris mi-jaunes mi-blancs... Ce phénomène dont on explore aujourd'hui les causes génétiques n'est pas exceptionnel chez les oiseaux de cage, dont il existe des variétés de couleurs différentes. La séparation entre les deux moitiés est plus ou moins régulière, mais toujours nette. D'autres oiseaux ont des demi-livrées qui n'appartiennent pas à des variétés différentes, mais à des sexes opposés : le plumage est caractéristique du mâle, d'un côté, et de la femelle, de l'autre.

Ces oiseaux intéressent les généticiens, car on les a observés à la fois dans la nature (bouvreuil pivoine) et en laboratoire ; leur «gynandromorphisme réparti» a également été observé chez certains insectes, mais jamais chez les vertébrés. Quelle est sa cause génétique ? Le sexe est dû à des chromosomes sexuels, nommés aussi hétérochromosomes, parce qu'ils sont différents chez le mâle et chez la femelle. Dans l'espèce humaine, l'homme a ainsi les hétérochromosomes X et Y, tandis que la femme a X et X. Chez les oiseaux, c'est différent : le mâle a deux chromosomes X, et la femelle un seul. Lors du développement d'une femelle, une anomalie, au cours d'une division cellulaire embryonnaire peut engendrer une lignée de cellules ayant deux chromosomes X et une autre lignée ayant un seul chromosome X.

De même, des perruches ondulées mi-bleues mi-vertes se forment quand deux allèles (deux variantes d'un même gène, qui occupent la même place, sur un chromosome) qui gouvernent la couleur des plumes ont été séparés, et que l'allèle qui commande la couleur bleue, normalement dominé par l'allèle de la couleur verte, s'exprime parce qu'il se retrouve seul dans les cellules qui descendent d'une cellule qui avait ces deux allèles. Les croisements effectués montrent en effet que de telles perruches sont génétiquement vertes porteuses de bleu et qu'elles se reproduisent comme telles : par croisement avec une perruche bleue normale, on obtient autant de perruches vertes que de perruches bleues. L'anomalie n'est apparemment pas héréditaire.

Très exceptionnellement deux paires de chromosomes peuvent être modifiées lors du développement, ce qui donne un half-sider où des caractères liés au sexe, et d'autres non liés au sexe, sont juxtapo-

sés. C'est ce qui se passe chez le diamant de Gould de la figure 2, dont le masque est mi-rouge, mi-noir, et la poitrine mi-mauve mi-blanche. Cet oiseau est ainsi mi-mâle et mi-femelle (chez le mâle, le mauve est remplacé par du violet, et le masque est plus étendu).

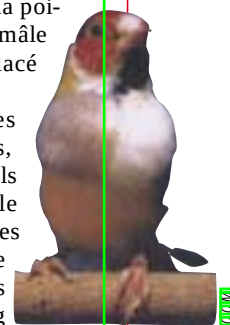
Les oiseaux half-siders donnent également des indications sur l'action des hormones sexuelles, qui transmettent les commandes des gènes sexuels aux cellules de l'organisme. Chez les oiseaux, le sexe apparent femelle est dû à une inhibition par les estrogènes, ou hormones femelles : en l'absence de cette inhibition, l'animal a des caractères sexuels mâles. Les hormones étant distribuées par le sang dans tout l'organisme, comment expliquer le gynandromorphisme réparti ?

On avait pensé à une action différente, de part et d'autre du corps, en raison d'une sensibilité différente des cellules à l'hormone femelle, mais l'analyse d'un diamant de Gould half-sider a réfuté cette idée. Obtenu en 1986 par un éleveur provençal, cet animal avait, à sa gauche, un plumage de mâle et un masque orange ; à sa droite, un plumage de femelle et un masque rouge. Il ne s'était pas reproduit, mais, peu avant sa mort, il paraissait comme un mâle. J'ai eu la chance de récupérer le cadavre et d'en faire l'autopsie : paradoxalement, l'oiseau avait, à gauche, du côté du plumage mâle, un testicule atrophié, petit et mou ; à droite (côté du plumage femelle), un testicule normal, ferme, légèrement rosé et fonctionnel.

Pour interpréter cette observation, on doit savoir que, chez les oiseaux, la femelle n'a qu'un ovaire, à gauche, tandis qu'à droite un testicule embryonnaire peut devenir fonctionnel si l'ovaire cesse de fonctionner. C'est ce qui se produit chez des femelles âgées ou malades. À l'origine du testicule ou de l'ovaire, il y a la même gonade indifférenciée.

On doit donc admettre que l'œuf initial a donné une moitié droite avec un seul chromosome X (plumage femelle) et une moitié gauche avec deux chromosomes X (plumage mâle). Des estrogènes transportés par le sang irriguent les deux moitiés, mais ils n'ont pas d'action à gauche (côté mâle), car il n'y a pas sur la gonade de récepteurs aux estrogènes : un testicule est apparu. À droite, on aurait dû avoir un ovaire, mais, comme le testicule reste atrophié (état initial), cela montre que la gonade est insensible aux estrogènes. L'absence de l'ovaire droit chez les oiseaux femelles est donc innée.

Maurice POMAREDE, Montpellier



2. Diamant de Gould réunissant trois phénotypes masque et poitrine bicolores, côté droit femelle, côté gauche mâle.



1. Perruche ondulée half-sider.

Accent natif

La perception des sons d'une langue étrangère est bloquée très tôt dans l'enfance.

Quand un rescapé d'Éphraïm disait : «Laissez-moi passer», les gens de Galaad demandaient : «Es-tu Éphraïmite?». S'il répondait : «Non», alors ils lui disaient : «Eh bien, dis Shibboleth!». Il disait : «Sibboleth» car il n'arrivait pas à prononcer ainsi. Alors on le saisissait et on l'égorgeait près des gués du Jourdain.

Parler une langue étrangère sans accent est notoirement difficile. Heureusement, les conséquences sont rarement aussi dramatiques que dans cet extrait du Livre des Juges de l'Ancien Testament. Avec Laura Bosch et Nuria Sebastian, de l'Université de Barcelone, nous avons montré que la difficulté de percevoir les sons employés par une langue étrangère (donc aussi probablement de les produire) apparaît très tôt dans l'enfance.

Plus une seconde langue est apprise tôt, plus grandes sont les chances qu'elle soit prononcée sans accent. Une explication possible serait que les «programmes articulatoires», séries de commandes que le cerveau envoie aux muscles pour articuler les mots, se figent avec l'âge, et qu'il deviendrait de plus en plus difficile d'en apprendre de nouveaux. On observe de même que la difficulté d'apprentissage d'un instrument de musique, ou d'un sport qui requiert de la dextérité, augmente avec l'âge.

Toutefois, on a découvert au début du ^{xx}e siècle que l'accent ne concerne



pas seulement la prononciation, mais aussi la perception. Des sons clairement distingués par les locuteurs d'une langue peuvent être confondus par des locuteurs d'une autre langue. Ainsi, les Japonais ont de grandes difficultés à distinguer les sons [r] et [l], et cette incapacité de l'oreille se traduit dans leur accent lorsqu'ils parlent le français. À partir de quel âge cette difficulté à entendre de nouveaux sons apparaît-elle?

Pour répondre à cette question, nous avons rassemblé de jeunes adultes bilingues parlant couramment l'espagnol et le catalan. La moitié d'entre eux étaient nés dans des familles parlant le catalan, et l'autre moitié dans des familles parlant l'espagnol, mais ces derniers avaient été exposés au catalan de façon intensive dès l'âge de six ans au plus tard. Les deux groupes avaient suivi la même scolarité, bilingue, et atteint une très bonne aisance dans les deux langues. Or, il existe en catalan un contraste entre voyelles [é] et [è] qui n'existe pas

en espagnol, où le seul son [é] est employé. Les bilingues ont participé à des tests de reconnaissance et de discrimination de plusieurs sons intermédiaires entre [é] et [è], produits par un synthétiseur. Ces tests ont révélé de fortes différences entre les deux groupes : ceux dont le catalan est la langue maternelle percevaient clairement la distinction [é]-[è] ; au contraire, ceux nés dans des familles hispanophones et ayant appris le catalan comme seconde langue confondaient fréquemment les deux voyelles.

L'exposition très jeune à une seconde langue ne suffit donc pas pour acquérir une maîtrise parfaite. Les individus que nous avons testés en étaient-ils empêchés parce qu'ils continuaient à utiliser leur langue maternelle ? Nous comptons vérifier cette hypothèse avec des personnes adoptées dans leur enfance et ayant oublié leur langue maternelle.

Christophe PALLIER, Lab. des sciences cognitives et psycholinguistiques, Paris

Retour à la nature

Des chimpanzés captifs découvrent avec succès la vie sauvage.

Autrefois capturés pour l'expérimentation médicale, les chimpanzés sont aujourd'hui menacés par la déforestation, par la chasse qui alimente le trafic de la «viande de brousse» et par la demande de particuliers en mal d'adoption. L'espèce étant protégée par la Convention de Washington, les autorités africaines confisquent de plus en plus de chimpanzés captifs.

souvent de jeunes orphelins : plus de 500 animaux sont aujourd'hui répartis dans une dizaine d'orphelinats sur le continent, et leur nombre ne cesse de croître. Qu'en faire ? L'association franco-congolaise *Habitat écologique et liberté des primates* (HELP) a réussi, pour la première fois, la réintroduction de jeunes chimpanzés en milieu naturel.

Les chimpanzés sont des animaux sociaux : ils vivent en «communautés» de 20 à 100 individus, le plus souvent répartis en sous-groupes dont la composition change jusqu'à plusieurs fois par jour. Les femelles changent de communauté à leur adolescence, tandis que les mâles passent toute leur vie dans leur commu-

nauté d'origine et sont très agressifs vis-à-vis des mâles d'autres communautés, allant jusqu'à les tuer. Par ailleurs, le développement des jeunes chimpanzés est lent. Ils ne sont sevrés qu'à partir de trois ans, ils ne se nourrissent pas seuls avant cinq ans, et la présence de leur mère leur est nécessaire plusieurs années encore avant qu'ils ne deviennent autonomes au sein de la communauté.

Ces caractéristiques expliquent les échecs qui ont sanctionné toutes les tentatives de réintroduction de chimpanzés captifs dans des communautés sauvages : soit les animaux n'étaient pas assez indépendants pour survivre, soit ils ont été attaqués et tués par des congé-

nères. L'association *HELP* a donc choisi de procéder à une réintroduction progressive : après une période de captivité où les jeunes chimpanzés orphelins, qui provenaient de saisies des Eaux et forêts congolaises, ont reçu des soins et une attention particulière, ils ont été répartis en groupes sociaux sur des îles de la lagune de la Conkouati, au Sud du Congo. Là, en semi-liberté, ils réapprennent la vie en conditions semi-naturelles et développent leur indépendance physique et mentale.

En novembre 1996, sept individus, un mâle et six femelles âgés de six à huit ans, ont été relâchés dans la forêt, équipés de colliers émetteurs. Six d'entre eux sont suivis quotidiennement (peu de temps après sa libération, une femelle a retiré son collier émetteur et a disparu). Ces animaux survivent, sur un territoire d'environ 12 kilomètres carrés, sans apport artificiel de nourriture. La fréquence des contacts avec les chimpanzés sauvages, plus d'une trentaine en un an, augmente au cours du temps. Trois rencontres ont donné lieu à des combats violents entre mâles, mais les contacts pacifiques sont de plus en plus fréquents et leur durée augmente continûment. L'une des femelles devrait même mettre bas un petit dont le père est un individu sauvage.

Ainsi, les chimpanzés relâchés s'intègrent progressivement dans la commu-



Ce chimpanzé mâle, élevé en semi-liberté, a été replacé en milieu sauvage depuis un an et demi avec cinq autres congénères. Les zoologues qui suivent ces animaux grâce à des colliers émetteurs ont observé qu'ils s'adaptent bien à la vie sauvage et qu'ils entrent régulièrement en contact avec des congénères.

nauté sauvage. Comme on pouvait le prévoir, cette intégration semble plus facile pour les femelles que pour le mâle ; l'histoire et le profil psychologique des individus relâchés ont aussi un impact. Ces résultats positifs ont incité à la poursuite de

l'expérience : un second groupe de huit animaux (deux mâles et six femelles) a été libéré dans la forêt en novembre 1997. Les 25 chimpanzés qui vivent encore sur les îles du Sanctuaire devraient rejoindre leurs compagnons d'ici deux ans.

Pourrait-on généraliser cette méthode de réintroduction, vidant les orphelinats et repeuplant les forêts ? Nous devons suivre l'expérience pendant plusieurs années pour confirmer les premiers résultats. Jusqu'à présent, de telles expériences n'ont jamais permis de sauver une espèce de primates (excepté peut-être le tamarin-lion du Brésil). En outre, la réintroduction n'est pas possible partout (le relâcher d'animaux ne doit pas se faire au détriment des populations sauvages existantes), et un suivi vétérinaire est nécessaire pour s'assurer que l'on n'a pas introduit d'élément pathogène étranger au milieu.

Pour l'instant, la réintroduction des chimpanzés semble plus utile à la conservation des milieux menacés qu'à la protection directe de l'espèce : à Conkouati, la présence de scientifiques a stoppé les activités humaines destructrices dans la zone de relâcher (braconnage, déforestation). C'est aussi un outil de sensibilisation des populations locales et du grand public, dont la prise de conscience permettra seule de sauver l'espèce d'une disparition définitive des forêts africaines.

Marc ANCRENAZ, *HELP*

La lutte contre les filarioses

Un programme de lutte coordonné par l'Organisation mondiale de la santé se met en place.

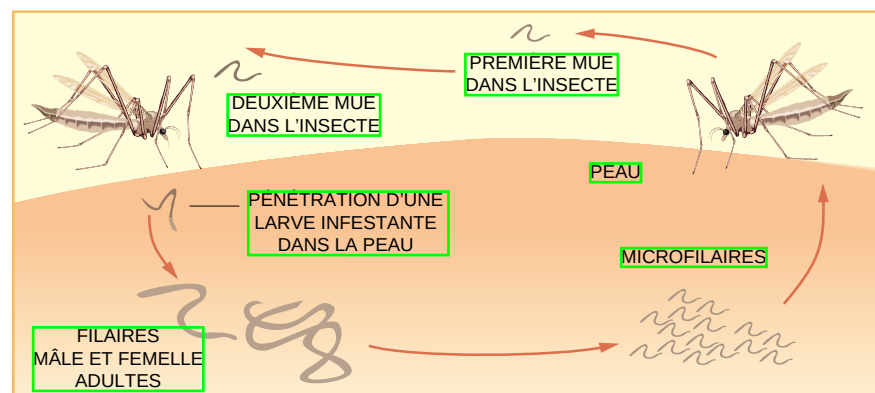
Plusieurs pays des zones tropicales et subtropicales de l'Afrique, de l'Asie et de l'Amérique sont écrasés par le fléau des maladies parasitaires, surtout des filarioses. Pour combattre ces maladies, on peut soit lutter contre les vecteurs, des insectes suceurs de sang, soit traiter les personnes infectées : si les parasites sont détruits chez les porteurs, les insectes ne pourront plus les transmettre aux personnes saines. C'est la tactique que l'Organisation mondiale de la santé, avec le concours des laboratoires pharmaceutiques *SmithKline Beecham*, va mettre en œuvre pour lutter contre la filaire de Bancroft.

Parmi les 120 millions de personnes souffrant de ce type de filariose, un tiers

environ ont des signes extérieurs, les autres sont infectées sans signes visibles, mais avec des lésions organiques souvent irréversibles. Les parasites sont des vers, nommés filaires (*Wuchereria bancrofti* et *Brugia malayi*), transmis par les moustiques. Des larves infestantes déposées sur la peau d'une personne piquée par un moustique pénètrent dans la peau,

peut-être par le trou laissé par la piqûre de l'insecte ; ensuite, elles gagnent la circulation lymphatique.

Les filaires colonisent les vaisseaux et les ganglions lymphatiques, et bloquent la circulation de la lymphe. Normalement, la lymphe, un liquide contenant des lymphocytes et assurant une fonction de défense, circule dans les vaisseaux



Cycle de propagation des filaires : un insecte contaminé dépose des larves qui pénètrent par la peau. Elles se développent et se reproduisent chez l'homme. Un nouvel insecte, en prélevant des embryons filariens sanguins, les microfilaries, chez une personne contaminée, transporte le parasite vers d'autres porteurs potentiels.

lymphatiques et est épurée dans les organes lymphatiques. Les filaires vivent de quatre à six ans, produisant des millions de microfilaries immatures, de minuscules larves qui circulent dans le sang. Les formes symptomatiques les plus graves de la filariose se manifestent chez l'adulte, apparemment plus souvent chez les hommes que chez les femmes. Dans les communautés endémiques, 10 à 50 pour cent des hommes souffrent d'éléphantiasis, une hypertrophie qui touche surtout les membres inférieurs et les organes génitaux. Les ganglions et les

organes qu'irrigue normalement le système lymphatique enflent ; les régions atteintes sont tuméfiées, distendues, et les tissus deviennent fibreux. Les filarioses ne sont pas des maladies mortelles, mais elles sont très handicapantes sur le plan personnel et socio-professionnel. En outre, en dehors de ces signes visibles, le parasite perturbe le système immunitaire et lèse les tissus profonds.

Jusqu'à présent, on disposait de deux médicaments. On a montré que l'association de l'albendazole et d'un des deux médicaments déjà prescrits (l'ivermectine)

est efficace, mais le traitement doit être poursuivi pendant quatre ou cinq ans. Toutefois, si le traitement détruit les filaires, les lésions ne sont pas totalement réversibles.

Les laboratoires *SmithKline Beecham* ont offert 4,5 milliards de doses d'albendazole à l'OMS et aux pays où sévit la maladie, avec un objectif : l'éradication de la maladie d'ici une vingtaine d'années. Simultanément, les Laboratoires *Merck* fournissent l'ivermectine dans le cadre de l'éradication d'une autre maladie parasitaire due à un autre filaire : l'onchocercose, ou cécité des rivières.

L'énigme du second nombre de Plutarque

On vérifie un résultat établi par l'astronome grec Hipparque.

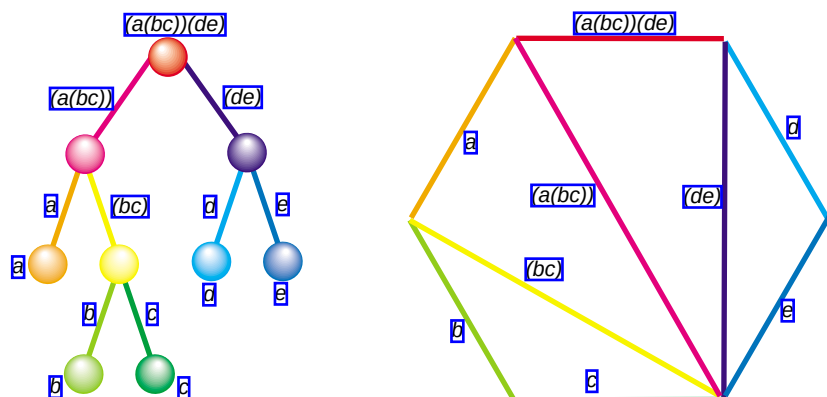
« **M**oi je dis qu'avec seulement dix propositions élémentaires, je peux composer plus d'un million de propositions complexes », affirme le stoïcien Chrysippe (c. 280 av. J. C. – 207 av. J.-C.) à l'astronome grec Hipparque. Celui-ci prend alors une tablette de cire, grave quelques calculs, puis déclare, péremptoire : « Les compositions affirmatives sont au nombre de 103 049, les négatives au nombre de 310 952. » La scène se passe autour d'une table, à la fin d'un repas, il y a plus de 22 siècles.

Reconstitué par Plutarque, ce dialogue est incomplet. Rien ne transparaît du raisonnement et des calculs effectués par Hipparque. Seulement deux nombres ! Comment Hipparque a-t-il obtenu ses résultats ? Depuis Plutarque, les mathématiciens sont perplexes. Par compo-

sition de propositions, il faut entendre l'utilisation de connecteurs logiques tels « et », « ou », « si... alors ». Par exemple, à partir de deux propositions simples a et b , telles que « J'ai faim » et « J'ai soif », on peut composer les propositions « J'ai faim et j'ai soif », ou « J'ai faim ou j'ai soif », ou encore « Si j'ai faim, alors j'ai soif ».

Avec quatre propositions élémentaires a, b, c, d , on pourrait former, par exemple, la proposition « a et b ou c et d et a ou b ». Cette composition n'a pas de sens, tant elle en possède : pour supprimer toute ambiguïté, on doit instaurer un ordre de procédure, utiliser des parenthèses. Ainsi « $((a \text{ et } b) \text{ ou } (c \text{ et } d)) \text{ et } (a \text{ ou } b)$ » n'a qu'une interprétation. On peut ainsi reformuler l'énoncé du problème : de combien de façons peut-on introduire des parenthèses dans une chaîne d'éléments ?

A la fin du siècle dernier, le logicien allemand Friedrich Schröder a résolu ce problème de dénombrement en définissant le nombre de Schröder, noté $s(n)$, où n est le nombre d'éléments de la chaîne. Il calcule $s(1)=1$, $s(2)=2$, $s(3)=3$, $s(4)=11$, $s(5)=45$, $s(6)=197$... Un parenthésage donné peut se représenter par un arbre, ou un polygone fractionné, par exemple



Pour construire l'arbre de gauche à partir de la proposition composée $(a(bc))(de)$, on part d'un nœud et on crée une branche pour chaque sous-proposition définie par des parenthèses, puis on répète l'opération à partir de chaque nouveau nœud. Pour obtenir un polygone à partir de l'arbre, on part d'un segment à partir duquel on crée un polygone ayant un côté de plus que le nombre de branches partant du nœud correspondant dans l'arbre ; puis on répète l'opération.

(voir les figures). Ces modes de représentation sont utiles, car calculer $s(n)$ est identique à calculer le nombre de polygones à $n+1$ côtés sans croisement.

En 1994, l'étudiant américain David Hough remarque, presque par hasard, que le premier nombre de Plutarque, 103 049, coïncide exactement avec $s(10)$. Hasard ? Coïncidence ? D. Hough suppose qu'Hipparque a utilisé une relation de récurrence : il aurait calculé $s(n)$ comme la somme de produits de la forme $s(i_1) \dots s(i_k)$, pour tous les ensembles de nombres $i_1, \dots, i_k$ tels que $i_1 + \dots + i_k$ soit égal à n . On ignore si cette hypothèse est la bonne, mais il est vrai que le nombre de propositions positives composées de n éléments est égal à $s(n)$.

Laurent Habsieger, à Bordeaux, et M. Kazarian et S. Lando, à Moscou, pourraient avoir identifié l'origine du second nombre, en utilisant encore les nombres de Schröder. Ils supposent que rechercher les compositions négatives de n propositions élémentaires revient à chercher le nombre de possibilités de parenthésage de l'expression $Nx_1x_2\dots x_{10}$, où l'opérateur N consiste à prendre la négation de toutes les propositions simples incluses dans les premières parenthèses qui incluent l'opérateur. Par exemple, $((N(x_1(x_2x_3)x_4)x_5)x_6)x_7x_8)(x_9x_{10})$ est équivalent à $((((\text{non } x_1(\text{non } x_2 \text{ non } x_3) \text{ non } x_4) \text{ non } x_5)x_6)x_7x_8)(x_9x_{10}))$. Les trois mathématiciens observent alors que certains parenthésages conduisent au même résultat et que le nombre de propositions composées négatives à n éléments se ramène au nombre de propositions positives à $n+1$ éléments (l'opérateur N ajoute un terme), diminué des cas redondants. Au total, le nombre cherché est égal à $(s(n)+s(n+1))/2$. Pour $n=10$, on trouve... 310 954.

Hipparque, lui, obtenait 310 952 : erreur de calcul ? de transcription ? d'hypothèses logiques non prises en compte ? On l'ignore, mais l'énigme de Plutarque semble enfin résolue.

L'origine des oiseaux et de leur vol

KEVIN PADIAN • LUIS CHIAPPE

Les dinosaures n'ont pas tous disparu : les oiseaux sont les descendants directs de certains d'entre eux.

Sinornis



Illustrations : Ed Heck

Les oiseaux sont bien différents de toutes les autres créatures vivantes : les plumes, le bec édenté, les os creux, le pied préhensile, la fourchette, le bréchet développé et le moignon de queue sont quelques-uns des caractères qu'ils ne partagent avec aucune autre famille animale. Comment leurs plumes et leur capacité à voler sont-elles apparues ? Qui sont leurs ancêtres ?

Cette question s'est posée juste après que Charles Darwin a présenté la théorie de l'évolution, en publiant *L'origine des espèces*, en 1859 : l'année suivante, une plume d'oiseau isolée est découverte dans des sédiments calcaires déposés il y a 150 millions d'années, en Bavière ; puis, en 1861, des paléontologues trouvent, à proximité, le squelette d'un animal gros comme un geai, aux ailes et aux plumes d'oiseau, mais avec une longue queue osseuse et des mâchoires pourvues de dents. Ce sont les deux premiers vestiges d'*Archaeopteryx lithographica*, le plus ancien oiseau connu.

Plus d'un siècle après, l'étude du squelette d'*Archaeopteryx* et des nombreux autres fossiles découverts depuis prouve que les oiseaux descendent de petits dinosaures carnivores et terrestres du groupe des théropodes. L'hypothèse remonte au fidèle défenseur de Darwin, Thomas Huxley : en comparant le membre postérieur de *Megalosaurus*, dinosaure théropode géant, à celui de l'autruche, il remarque que 35 caractères communs aux deux groupes ne sont associés chez aucun autre animal, et il en conclut que les oiseaux et les théropodes sont apparentés. Pense-t-il que les oiseaux sont les cousins des théropodes ou leurs descendants ? Nous l'ignorons.

Huxley présente ses conclusions à la Société géologique de Londres en

1870, mais le paléontologue Harry Govier Seeley les conteste. Selon lui, si les membres postérieurs de *Megalosaurus* et de l'autruche se ressemblent, c'est seulement parce que les deux animaux sont bipèdes, de grande taille et qu'ils marchent de la même manière. Comme les dinosaures sont encore plus grands que les autruches et qu'aucun d'eux ne vole, comment les oiseaux en descendraient-ils ?

L'absence de clavicules disqualifie les théropodes

La question est reprise, un demi-siècle plus tard, par Gerhard Heilmann, médecin et paléontologue amateur, qui publie un ouvrage intitulé *L'origine des oiseaux* (en danois en 1916, puis en anglais en 1926). Il y expose que les oiseaux sont anatomiquement plus proches des dinosaures théropodes que

Iberomesornis



Eoalulavis



1. LES PREMIERS OISEAUX, qui vivaient il y a plus de 100 millions d'années, différaient des oiseaux actuels. Certains avaient des doigts griffus et des mâchoires garnies de dents, comme leurs ancêtres dinosauriens. Les fossiles de *Sinornis* (à gauche) ont été découverts en Chine, ceux d'*Iberomesornis* et d'*Eoalulavis* (à droite) en Espagne. Ces trois oiseaux avaient la taille d'un moineau. *Eoalulavis* possède la première alula connue (les plumes portées par le pouce), structure qui permet aujourd'hui aux oiseaux de voler lentement.

de n'importe quel autre groupe fossile, mais que les théropodes n'ont pas de clavicules, au contraire des oiseaux, où ces os sont fusionnés en une fourchette. Comme les autres reptiles possèdent des clavicules, il en conclut que les théropodes les ont perdues ; et comme il pense qu'un caractère disparu au cours de l'évolution ne réapparaît jamais, il déduit que les oiseaux n'ont pas évolué à partir des théropodes, mais d'un groupe de reptiles plus archaïques qui

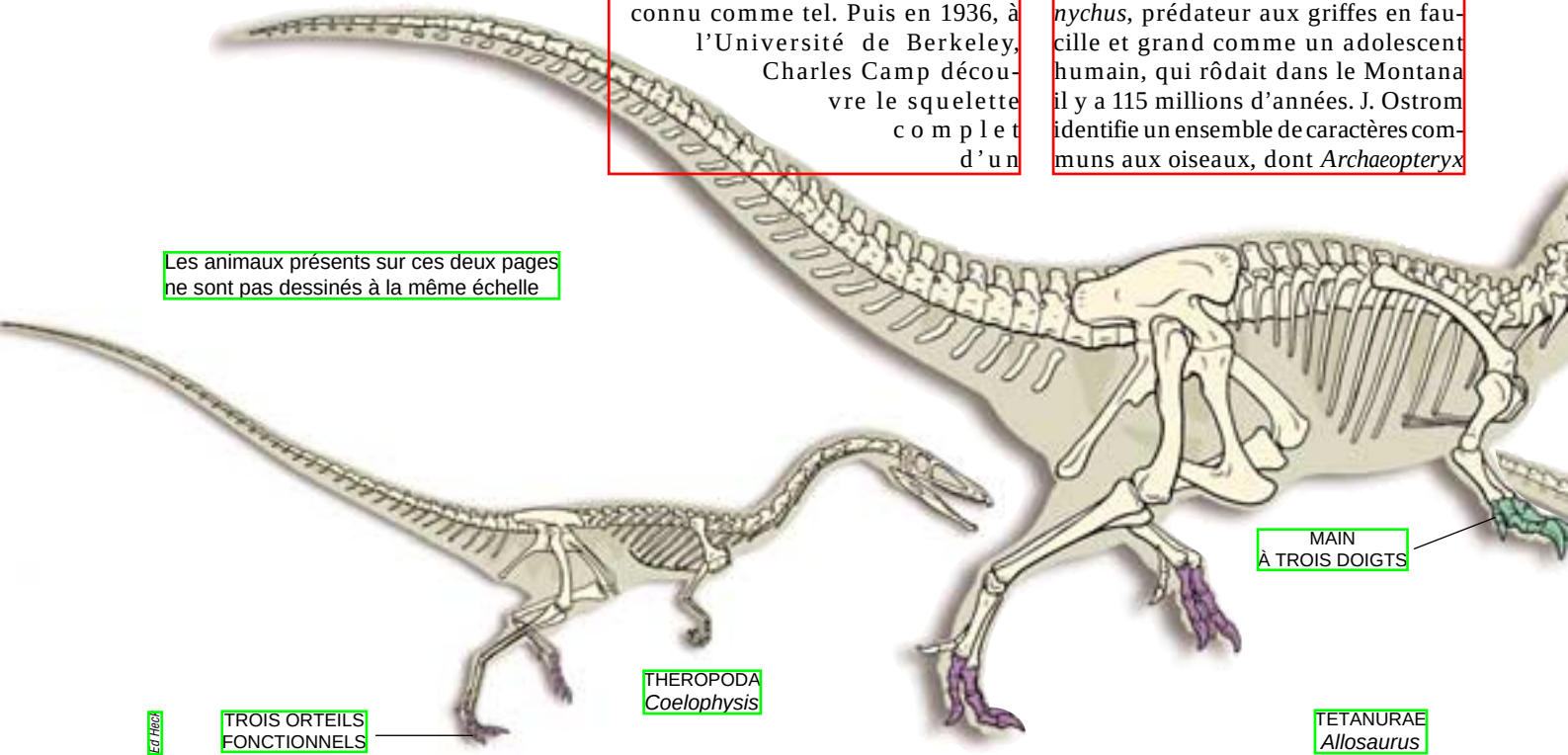
possédaient des clavicules. Comme Seeley, Heilmann attribue à la bipédie les ressemblances entre les oiseaux et les dinosaures.

Ces conclusions s'imposent durablement, malgré de nouvelles découvertes qui lèvent la principale objection d'Heilmann : les théropodes possèdent des clavicules. En 1924, la publication d'un dessin anatomique d'*Oviraptor* (un théropode à tête de perroquet) montre la présence d'une fourchette, mais cet os n'est pas reconnu comme tel. Puis en 1936, à l'Université de Berkeley, Charles Camp découvre le squelette complet d'un

petit théropode du Jurassique inférieur (de 210 à 170 millions d'années) qui possède des clavicules. Des travaux plus récents démontrent, plus généralement, la présence de clavicules chez de nombreux théropodes apparentés aux oiseaux.

À la fin des années 1960, un siècle après la communication controversée de Huxley à la Société géologique de Londres, John Ostrom, de l'Université Yale, décrit le squelette du théropode du groupe des maniraptorien *Deinonychus*, prédateur aux griffes en faucille et grand comme un adolescent humain, qui rôdait dans le Montana il y a 115 millions d'années. J. Ostrom identifie un ensemble de caractères communs aux oiseaux, dont *Archaeopteryx*

Les animaux présents sur ces deux pages ne sont pas dessinés à la même échelle



Des dinosaures aux oiseaux

L'arbre de droite relie les oiseaux aux dinosaures, dont ils descendent. Cet arbre, ou cladogramme, est obtenu par la méthode cladiste, qui prend en compte l'importance des caractères présents chez les animaux. Au cours de l'évolution, un animal peut présenter un nouveau caractère héréditaire : deux groupes qui partagent un ensemble de caractères nouveaux sont plus proches qu'ils ne le sont des autres animaux dépourvus de ces caractères. Les embranchements du cladogramme (*points*) marquent l'apparition d'une lignée dotée d'une nouvelle série de caractères dérivés.

Dans ce cladogramme, tous les théropodes descendent d'un ancêtre dinosaurien possédant des os creux et trois orteils fonctionnels. Les théropodes sont toujours des dinosaures : ils sont seulement un sous-groupe des dinosaures saurischien. Chaque lignée est donc incluse dans une lignée plus large (*rectangles colorés*). Ainsi les oiseaux (*Aves*) sont des maniraptorien, qui sont des tétanoures, qui sont eux-mêmes des dinosaures théropodes.



LIGNÉES DE DINOSAURES NE CONDUISANT PAS AUX OISEAUX

Titanosaurus

DINOSAURIA

SAURISCHIA

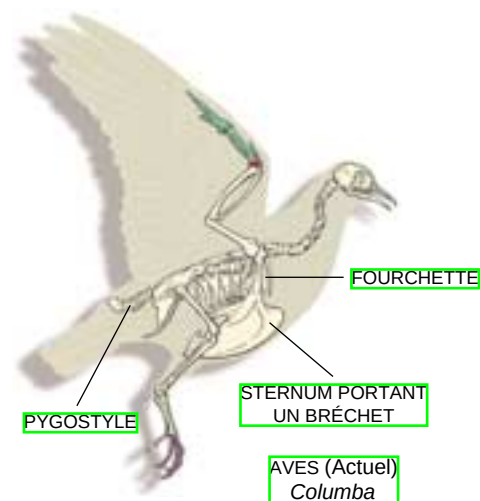
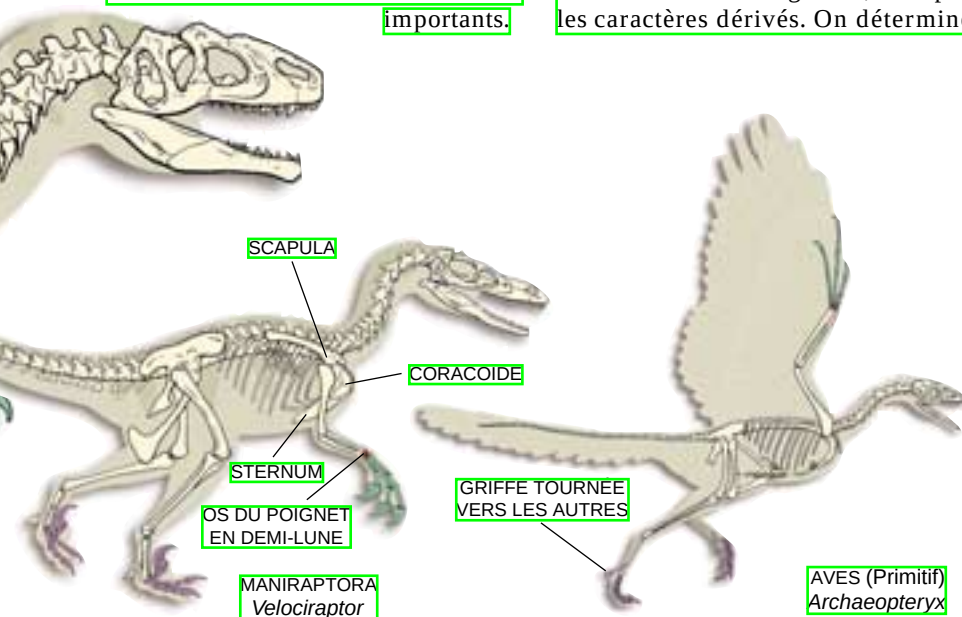
et *Deinonychus*, et à d'autres théropodes, mais que ne possèdent pas d'autres reptiles. Il en déduit que les oiseaux descendent directement des théropodes.

À la même époque, une nouvelle méthode d'étude des relations entre les organismes vivants se développe et confirme les conclusions d'Ostrom. On classait auparavant les organismes en se fondant sur leurs ressemblances et sur leurs différences : on excluait une espèce d'un groupe quand elle présentait des caractères absents chez les autres membres du groupe. En revanche, la nouvelle méthode, la cladistique, propose des groupements fondés seulement sur les caractères importants.

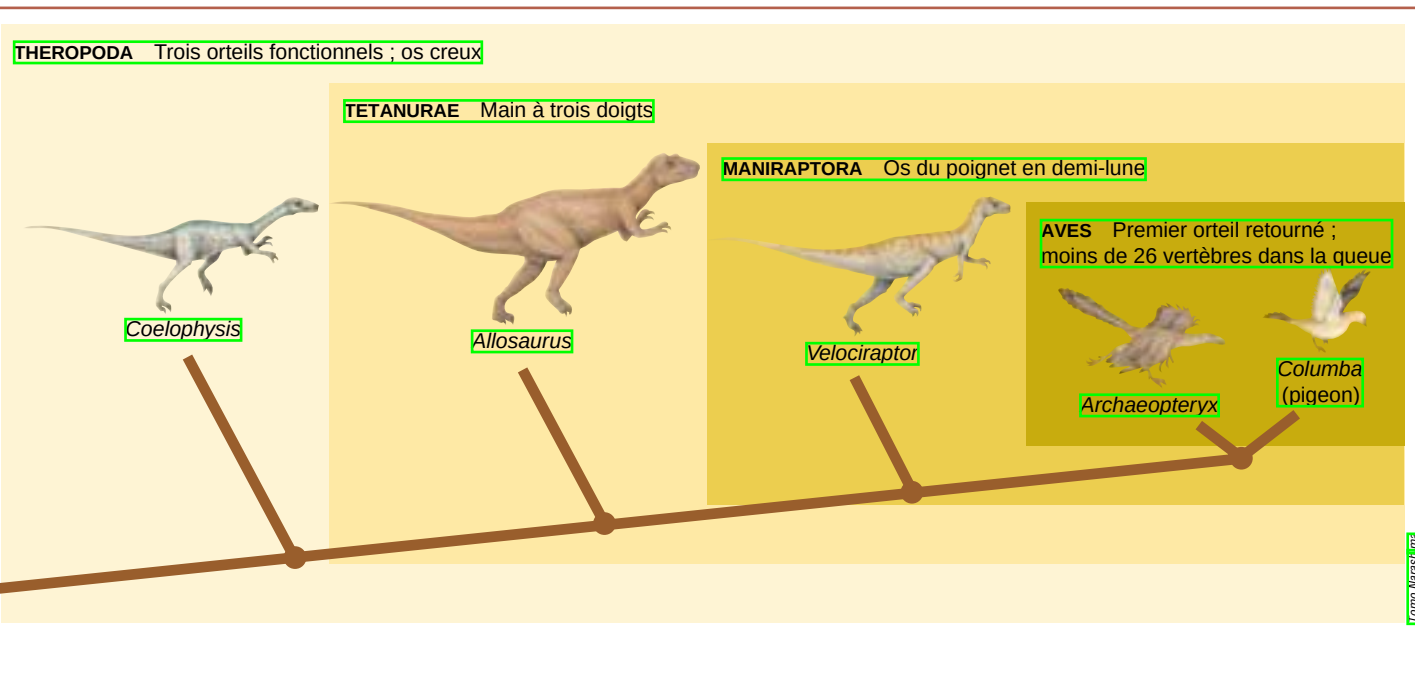
Cette méthode s'appuie sur le précepte néo-darwinien selon lequel l'évolution résulte de mutations et de sélections : de nouveaux caractères apparus au hasard des mutations dans un organisme se retrouvent dans un nombre de plus en plus grand d'individus quand ils favorisent la survie et la reproduction de ceux-ci ; ayant plus de descendants, les individus les mieux adaptés transmettent davantage les gènes qui codent leurs adaptations favorables. Deux groupes d'animaux qui partagent un ensemble de ces caractères nouveaux, ou « dérivés », sont plus proches l'un de l'autre qu'ils ne le sont de groupes présentant les caractères originaux, mais pas les caractères dérivés. On détermine

donc les relations qui unissent les organismes par l'identification de ces caractères dérivés.

Les résultats des analyses cladistiques, qui portent généralement sur de nombreux caractères, sont présentés sur un diagramme nommé



2. LES THEROPODES de la lignée des oiseaux (*Aves*) présentent des caractères qui ont révélé l'origine dinosaurienne des oiseaux. Dans leur ordre d'apparition, ces caractères sont : les trois orteils fonctionnels (*en violet*), la main à trois doigts (*en vert*) et l'os du poignet en demi-lune (*en rouge*). *Archaeopteryx*, le plus ancien oiseau connu, possédait aussi des caractères nouveaux par rapport à ses ancêtres théropodes, telle la griffe de l'orteil arrière qui fait face aux autres griffes. Pendant la suite de l'évolution des oiseaux, de nombreux caractères changent. Notamment, les doigts fusionnent, la queue est réduite à quelques vertèbres soudées, et l'orteil arrière descend, permettant au pied d'agripper fermement les branches des arbres.



cladogramme, dont les arborescences indiquent l'ordre d'apparition des caractères et des nouveaux groupes (voir l'encadré pages 32 et 33). Chaque embranchement correspond à l'apparition d'un groupe fondateur qui possède des caractères dérivés, absents des groupes précédents. Cet ancêtre et tous ses descendants forment un groupe étroitement apparenté, nommé «clade».

Dans les années 1970, la cladistique n'est pas suffisamment répandue, et J. Ostrom ne l'utilise pas. En revanche, dix ans plus tard, à l'Université de Berkeley, Jacques Gauthier entreprend une vaste étude cladistique des oiseaux, des dinosaures et de leurs parents reptiliens, en se fondant sur les comparaisons de J. Ostrom et sur bien d'autres caractères. Il confirme que les oiseaux descendent de petits dinosaures théropodes. Le maniraptorien aux griffes

en faucille décrit par J. Ostrom, *Deinonychus*, est bien l'un des plus proches parents des oiseaux.

Les oiseaux sont des dinosaures

Aujourd'hui, le cladogramme de la lignée qui conduit des théropodes aux oiseaux montre que le clade des Aves (celui des oiseaux) comprend *Archaeopteryx* et tous ses descendants. Ce clade est inclus dans le clade plus large des théropodes maniraptorien, lui-même inclus dans celui des théropodes tétanoures, descendants des théropodes les plus primitifs ; ces derniers ont eux-mêmes évolué à partir de dinosaures non théropodes. Ce cladogramme montre que les oiseaux ne sont pas seulement les descendants des dinosaures : ce sont des dinosaures à part entière, donc des reptiles. Les oiseaux ne sont

pas plus différents des autres reptiles que les hommes ne le sont des autres mammifères

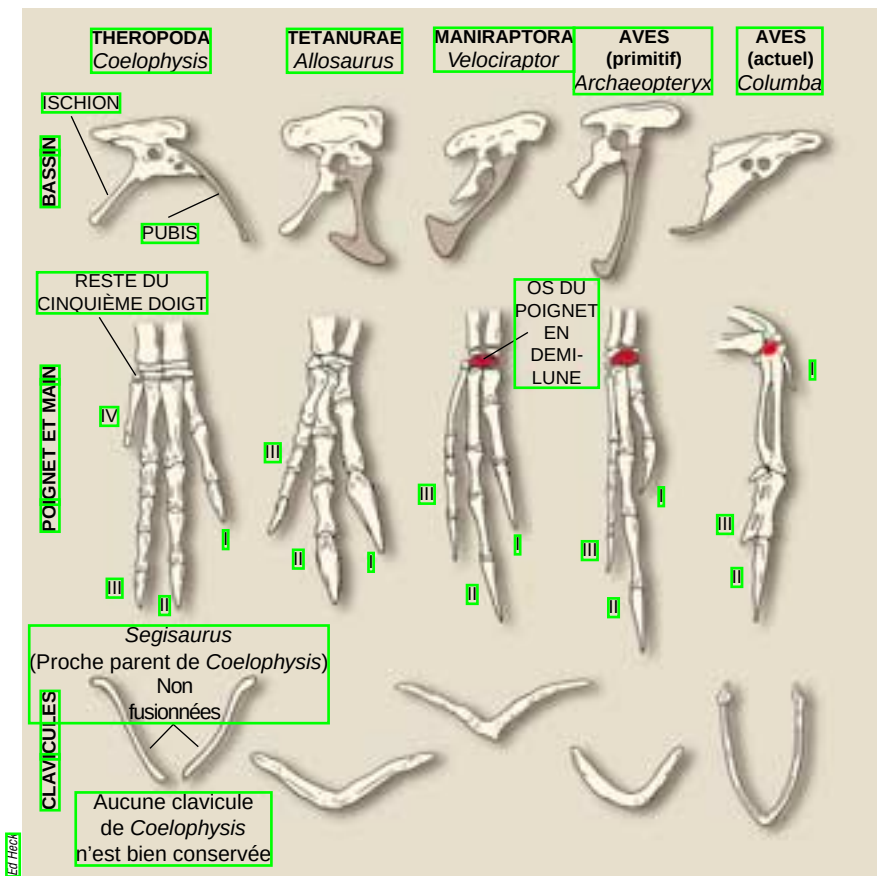
Les études de J. Gauthier et d'autres paléontologues démontrent que de nombreux caractères qui étaient classiquement considérés comme spécifiques aux oiseaux sont apparus avant ceux-ci, chez leurs ancêtres théropodes, voire plus tôt encore. Ces caractères, qui étaient des adaptations des dinosaures terrestres, furent conservés ou modifiés ; les modifications permirent le vol et un mode de vie arboricole. Dresser la liste de tous ces caractères serait trop long : nous nous contenterons ici de passer en revue, dans leur ordre d'apparition, ceux qui sont associés à l'apparition du vol. Naturellement, l'apparition des caractéristiques des théropodes qui précéderent les oiseaux ne fut pas simultanée ; certaines apparurent même avant les théropodes.

L'ancêtre reptilien direct des dinosaures théropodes est un petit carnivore bipède qui marche comme un oiseau. Ses mains sont libres pour saisir des objets ou des proies, et le plus long doigt est le deuxième, non le troisième comme chez les autres reptiles. Il a toutefois cinq doigts par main, alors que presque tous les théropodes primitifs et les oiseaux en ont trois.

Chez cet animal, l'articulation de la cheville est déjà en charnière, et les métatarses sont allongés, relevés : l'animal marche, comme les dinosaures après lui, sur la pointe des pieds et il place un pied devant l'autre au lieu de ramper. Les nombreuses modifications ultérieures du pied permettent probablement une foulée plus longue et plus rapide, qualité qui aidera ultérieurement les théropodes à s'envoler.

Les premiers théropodes présentent des adaptations qui allègent leur squelette : des os creux et des cavités dans le crâne. Comme les oiseaux actuels, leur cou est long et leur dos horizontal. Le quatrième doigt de la main des premiers dinosaures est déjà réduit, et le cinquième doigt a déjà presque disparu. Le quatrième doigt devient bientôt un moignon, puis les deux doigts réduits disparaissent ensemble chez les théropodes tétanoures ; les trois doigts restants fusionnent au cours de l'évolution des oiseaux postérieurs à *Archaeopteryx*.

Les membres postérieurs des premiers théropodes se transforment



3. LA COMPARAISON DES CARACTÈRES anatomiques relie les oiseaux aux théropodes et révèle comment certains caractères se sont modifiés lorsque des dinosaures ont évolué vers la forme aviaire ou que les oiseaux se sont modernisés. Dans le bassin (en haut, de profil), le pubis (en marron), qui pointe initialement vers l'avant (vers la droite), recule progressivement vers l'arrière. Dans la main (au milieu, vue du dessus), les proportions des différents os sont conservées jusqu'aux oiseaux primitifs, mais le poignet se modifie. Dans le poignet des dinosaures maniraptorien, un os discoïde prend une forme en demi-lune qui facilite ensuite le vol battu des oiseaux. La large fourchette en forme de boomerang (en bas, clavicules fusionnées) des tétanoures et des groupes suivants est très proche de celle des oiseaux primitifs, mais elle s'amincit et forme un U plus profond, alors qu'elle devient indispensable au vol.

aussi. Ils s'allongent : le fémur (os de la cuisse) devient plus long que le tibia, et la fibula (l'équivalent du péroné humain) se réduit (chez les oiseaux actuels, la fibula est une fine baguette osseuse dans le pilon). Ces dinosaures marchent sur les trois doigts du milieu, ceux qu'utilisent les oiseaux actuels. Le cinquième orteil, sans articulation, est raccourci et effilé. Le premier orteil, qui dépasse sur le côté du deuxième orteil, est formé d'un os raccourci, d'une articulation et d'une griffe. Il est placé au-dessus des autres orteils. Lorsque *Archaeopteryx* apparaît, cet orteil a tourné et est placé derrière les autres ; chez les oiseaux plus récents, il est plus bas sur la patte, opposable aux autres orteils, et il permet au pied d'agripper les branches.

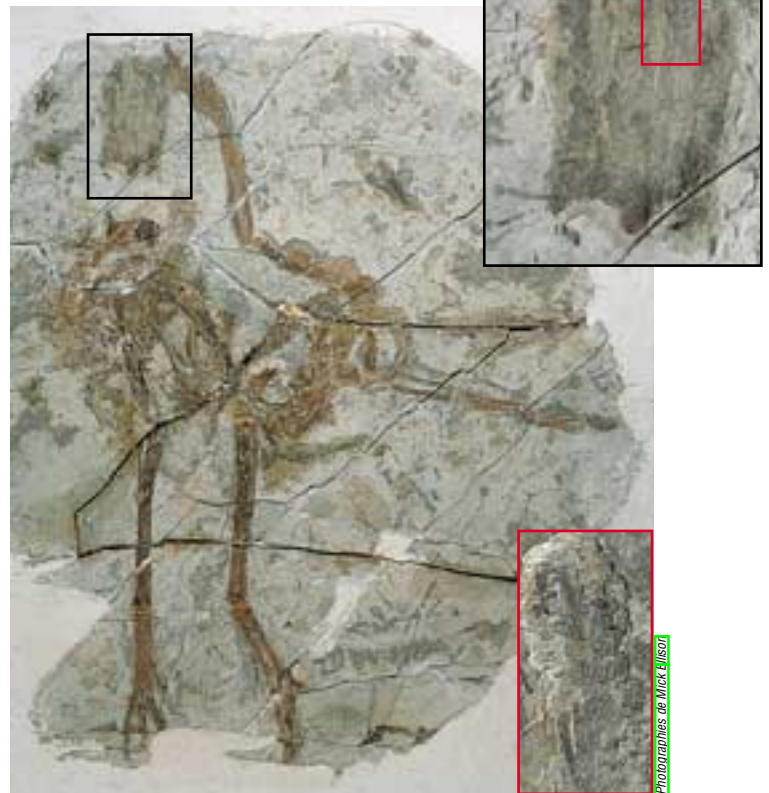
Au cours de l'évolution des théropodes, d'autres caractères qui semblaient être l'apanage des oiseaux apparaissent. Par exemple, le membre antérieur et la ceinture pectorale se modifient, favorisant d'abord la capture de proies, puis l'envol. Les bras s'allongent, sauf chez les carnivores

géants, tels *Carnotaurus*, *Allosaurus* et *Tyrannosaurus* : chez les théropodes primitifs, le membre antérieur est deux fois plus court que le membre postérieur, mais, lorsque *Archaeopteryx* apparaît, le membre antérieur est plus long que le membre postérieur, et cette différence s'accroît encore chez les oiseaux plus récents, auxquels cet allongement confère un battement d'ailes plus puissant.

La main aussi s'allonge, occupant progressivement une plus grande proportion du membre antérieur, et le poignet est remodelé. Les théropodes primitifs ont un os du poignet aplati, qui chevauche la base des premier et second os de la paume et les doigts. Chez les maniraptorien, cet os a une forme en demi-lune le long de la surface de contact avec les os du bras. Cette forme en demi-lune est importante : elle permet à ces animaux de plier le poignet latéralement, et plus seulement verticalement. Ainsi, ils peuvent presque replier leur longue main comme le font les oiseaux actuels avec leurs ailes. Cette main allongée peut aussi être tournée et brusque-

ment projetée vers l'avant pour la capture d'une proie.

La ceinture scapulaire (ensemble des os placés au niveau des épaules) des théropodes primitifs est composée d'une scapula (omoplate) longue et étroite, d'un coracoïde (os qui, associé à la scapula, forme l'articulation de l'épaule) arrondi et de deux clavicules indépendantes, en forme de S, qui relient l'épaule au sternum. La scapula s'allonge ensuite et s'affine, comme le coracoïde, qui s'étire ainsi vers le sternum. Les clavicules fusionnent sur leur ligne médiane et s'élargissent jusqu'à former une fourchette en forme de boomerang (voir la figure 3). Le sternum des tétranoures, à l'origine cartilagineux, s'ossifie en deux plaques, qui fusionnent. L'ensemble de ces modifications consolide le squelette. Plus tard, ce renforcement soutient les muscles du vol ; la fourchette devient un point d'ancrage pour les muscles du membre antérieur, permettant d'abord de saisir, puis de voler.



4. LES FOSSILES DE THEROPODES récemment découverts en Chine suggèrent que les structures dont dérivent les plumes sont antérieures à l'apparition des oiseaux. Les filaments le long du dos de *Sinosauropteryx* (à gauche) sont-ils des ébauches de plumes ? *Protarchaeopteryx* (à droite) possédait de vraies plumes, comme le montre la touffe agrandie (en haut, à droite) ; le plus petit car touche (en bas, à droite) montre une seule plume.

Dans la région du bassin, des vertèbres s'ajoutent à la ceinture pelvienne, et l'orientation du pubis (l'os qui est attaché devant l'articulation de la hanche, sous cette dernière) change : chez les premiers théropodes, comme chez la plupart des reptiles, le pubis pointe vers l'avant et vers le bas ; puis il recule et, chez les oiseaux plus évolués qu'*Archaeopteryx*, devient parallèle à l'ischion (l'os du bassin qui pointe vers l'arrière). Nous ignorons ce qui a favorisé cette évolution, mais le partage de ces caractéristiques par les oiseaux et par d'autres maniraptorien témoigne de leur origine commune.

Au cours de l'évolution des théropodes, leur queue raccourcit et se rigidifie, devenant un balancier plus efficace pendant la course. Steven Gates, de l'Université Brown, a mon-

tré que cette transformation est associée à un changement de fonction : l'ancrage des muscles des membres postérieurs passe de la queue au bassin. Chez les maniraptorien, les muscles qui tiraient les pattes vers l'arrière peuvent alors contrôler la queue. Chez les oiseaux qui évoluent après *Archaeopteryx*, ces muscles semblent utilisés pour diriger la queue, couverte de plumes, pendant le vol.

Ainsi, de nombreux caractères qui étaient autrefois considérés comme caractéristiques des oiseaux sont déjà présents chez les théropodes. Ces caractères sont associés à des fonctions différentes chez les théropodes et chez les oiseaux, mais leur présence a permis l'apparition du vol et d'autres comportements des oiseaux, telle la vie dans les arbres.

Des dinosaures pondeurs et couveurs

Outre l'évolution des caractères morphologiques, nous disposons aujourd'hui d'autres preuves de la filiation entre les dinosaures et les oiseaux. Des aires de ponte de théropodes, trouvées en Mongolie et dans le Montana, indiquent que certains comportements reproducteurs des oiseaux sont apparus avant eux : les œufs n'étaient pas déposés en une seule fois et en grand nombre, comme chez la plupart des autres reptiles, mais par un ou deux, pendant plusieurs jours peut-être, comme chez les oiseaux. Des squelettes du théropode *Oviraptor* ont même été trouvés sur leurs nids : ils auraient été enfouis par des tempêtes de sable alors qu'ils protégeaient leurs œufs (on a nommé l'animal *Oviraptor*, «voleur d'œufs», car on pensait qu'il pillait les nids d'autres dinosaures, mais le choix semble mauvais). Même la coquille des œufs de théropodes a des points communs avec celle des œufs d'oiseaux : elle est formée de deux couches de calcite, la première cristalline et la seconde plus irrégulière et poreuse.

Les plumes, longtemps considérées comme l'apanage des oiseaux, leur seraient aussi antérieures. En 1996 et en 1997, Ji Qiang et Ji Shu'an, du Musée chinois de géologie, ont découvert deux fossiles de la fin du Jurassique ou du début du Crétacé (d'environ 145 millions d'années), dans la province de Liaoning. Le premier, un dinosaure de la taille d'une dinde, nommé *Sinosauropteryx*, porte une frange d'éléments filamenteux le long de la colonne vertébrale et sur la surface du corps. Ces structures sont-elles des précurseurs des plumes ? L'animal n'est pas, en tout cas, un proche parent des oiseaux. Ses bras courts et d'autres caractères apparenteraient *Sinosauropteryx* au théropode *Compsognathus*, qui n'est pas particulièrement proche des oiseaux ni des autres maniraptorien.

Le second animal, *Protarchaeopteryx*, portait apparemment de vraies plumes sur le corps et d'autres, plus longues, sur la queue. Ce serait un théropode maniraptorien (on ne connaît sa parenté avec les oiseaux que lorsqu'il sera complètement décrit). Cette découverte prouve que les structures qui se sont progressivement transformées en plumes seraient appa-

Des os dans la polémique

Malgré les nombreuses preuves que les oiseaux descendent de petits dinosaures théropodes terrestres, quelques paléontologues contestent encore l'hypothèse. Ils n'ont toutefois testé aucune des théories concurrentes par la méthode cladistique ou par toute autre méthode analysant objectivement les relations entre les animaux. Voici quelques-uns de leurs arguments, avec les contre-arguments.

Les mains des théropodes et des oiseaux diffèrent : les théropodes ont conservé les premier, deuxième et troisième doigts (ils ont perdu l'annulaire et l'auriculaire), mais les oiseaux possèdent les deuxième, troisième et quatrième doigts. Cette analyse de la main de l'oiseau s'appuie sur des recherches embryologiques : si, dans une main à cinq doigts, certains disparaissent, ce sont les doigts extérieurs (le premier et le cinquième) qui partent en premier. Pourquoi, dans ce cas, les théropodes ont-ils conservé les premier, deuxième et troisième doigts ? Cette «loi» souffre donc des exceptions : elle n'interdit pas la conservation des trois premiers doigts chez les oiseaux. En outre, les indications apportées par le squelette démentent la prétendue différence entre les mains des oiseaux et celles des théropodes. Les trois doigts conservés par les théropodes (après la perte des quatrième et cinquième doigts) ont des formes, des proportions et des connexions avec le poignet semblables à celles d'*Archaeopteryx* et des oiseaux plus évolués.

Les théropodes sont apparus trop tard pour donner naissance aux oiseaux. *Archaeopteryx* a été découvert dans des sédiments déposés il y a 150 millions d'années, alors que les restes de divers maniraptorien, les plus proches parents connus des oiseaux, n'ont qu'environ 115 millions d'années. L'argument a été récemment invalidé : on a découvert les ossements de petits maniraptorien contemporains d'*Archaeopteryx*. En aucun cas, l'absence de fossiles ne constitue une preuve, et rien n'interdit leur existence dans un gisement plus ancien, encore inconnu.

La fourchette des oiseaux (formée de la fusion des clavicules) est différente des clavicules de théropodes. Cette objection pouvait être retenue quand seules les clavicules de théropodes primitifs étaient connues, mais les clavicules en boomerang découvertes chez de nombreux théropodes ressemblent à celles d'*Archaeopteryx*.

Le poumon complexe des oiseaux ne peut avoir évolué à partir du poumon des théropodes. En l'absence de poumon fossilisé, nous ne pouvons pas trancher. En outre, aucun autre groupe animal n'a de poumon qui aurait pu être le précurseur des poumons d'oiseaux : ces derniers sont particulièrement complexes et sans équivalent chez les autres animaux actuels.

rues avant les oiseaux et, de toute façon, avant que les oiseaux ne commencent à voler. Quelle était leur fonction d'origine : protégeaient-elles les animaux contre le froid ? Étaient-elles déployées lors de parades ?

Les débuts du vol

La plupart des caractéristiques qui permettent aux oiseaux de voler étaient donc présentes chez leurs ancêtres terrestres. *Archaeopteryx* n'était en outre certainement pas le premier théropode volant, même si jusqu'à maintenant on ne lui connaît pas de prédécesseur. Comment ce mode de locomotion s'est-il développé ? Et, tout d'abord, comment les ancêtres des oiseaux se sont-ils envolés ?

On a d'abord pensé que des théropodes avaient commencé à voler parce que, montant aux arbres, ils en redescendaient en planant, grâce à des ébauches de plumes. Des caractéristiques d'*Archaeopteryx* et de ses cousins maniraptorien contredisent toutefois cette hypothèse : ils étaient mal adaptés à la vie dans les arbres, n'ayant pas, par exemple, un pied qui leur permettait de se percher. Certains grimpaient peut-être aux arbres, mais on comprend mal comment *Archaeopteryx* aurait grimpé aux

arbres et volé avec ses membres antérieurs. De plus, dans l'environnement où l'on a trouvé *Archaeopteryx*, aucune plante ne s'élevait à plus de quelques mètres. Enfin, même s'il grimpait aux arbres, il n'y vivait pas nécessairement ni n'avait de compétences particulières pour le vol plané : la plupart des petits animaux grimpent aux arbres (même certaines chèvres et les kangourous), mais ils ne sont pas pour autant arboricoles.

Une autre hypothèse a été proposée : les petits dinosaures qui couraient sur le sol auraient étendu leurs bras pour maintenir leur équilibre quand ils bondissaient dans les airs à la poursuite d'un insecte ou devant un prédateur. Des plumes, même rudimentaires, auraient élargi la surface des membres, favorisant la portance ; puis l'allongement des plumes aurait augmenté la portance jusqu'à l'obtention d'un vol continu. Comme un bond ne procure pas autant d'accélération que la chute du haut d'un arbre, les animaux devaient courir assez vite pour décoller. Certains animaux terrestres atteignent de grandes vitesses.

Cette hypothèse est soutenue par le fait que les théropodes, ancêtres directs des oiseaux, vivaient sur le sol et qu'ils avaient les caractères requis

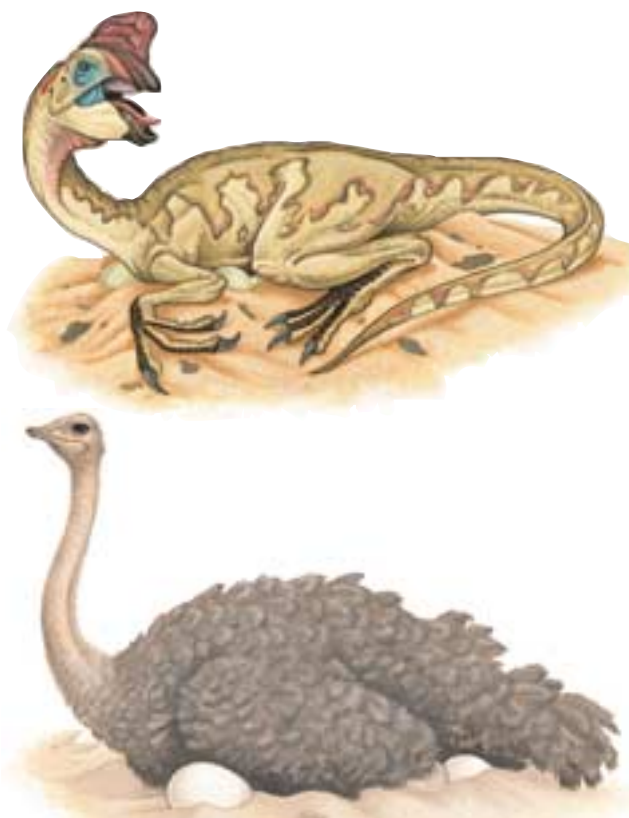
pour atteindre une grande vitesse de décollage : ils étaient petits, vifs, agiles, légèrement bâtis, et leurs longues jambes leur donnaient une course rapide. Comme ils étaient bipèdes, leurs bras étaient libres de battre l'air, ce dont les autres reptiles étaient incapables. La réalité est toutefois sans doute à mi-chemin des deux hypothèses : les ancêtres des oiseaux s'envolèrent vraisemblablement du sol et du haut de monticules accessibles, collines, gros rochers ou arbres abattus.

Le problème du type de vol est beaucoup plus important que celui du décollage. Le battement produit non seulement la portance, qu'un animal planeur obtient en déplaçant ses ailes dans l'air, mais aussi la poussée, qui permet d'avancer. Sur un avion, la portance est assurée par les ailes, et la poussée par les réacteurs ou les hélices ; chez les oiseaux et les chauves-souris, l'extrémité de l'aile produit la poussée et le reste de l'aile assure la portance.

À la fin des années 1970, Jeremy Rayner, de l'Université de Bristol, montra que le battement vers le bas et vers l'avant des oiseaux et des chauves-souris crée une série de tourbillons qui propulsent l'animal. Au milieu des années 1980, l'un d'entre nous (K. Padian) et J. Gauthier



5. **OVI-RAPTOR** a été découvert assis dans son nid et protégeant ses œufs (dessin de gauche), telle une autruche actuelle (dessin de droite). La couvaison est donc apparue avant l'émergence des oiseaux. Sur le fossile qui a servi de modèle à la réalisation du dessin d'*Oviraptor* (photographie ci-dessus) la position des griffes montre que les membres entouraient les œufs (grands ovales sur la photographie) pour les protéger.



montrèrent que les maniraptorien *Deinonychus* et *Velociraptor*, et *Archaeopteryx* pouvaient réaliser le mouvement de flexion latérale qui produit ces tourbillons chez les oiseaux.

Nous l'avons vu, les premiers maniraptorien utilisaient probablement ce mouvement pour la capture des proies. À l'époque où apparaissent *Archaeopteryx* et d'autres oiseaux, l'angle de l'articulation de l'épaule se modifie, pointant plus vers le côté que vers le bas et vers l'arrière. Cette modification de l'angle correspond à un changement de fonction du membre antérieur, qui passe alors de la capture de proie au battement du vol. De nouveaux indices, fournis par le dinosaure *Unenlagia*, récemment découvert en Argentine, suggèrent que, chez

les maniraptorien les plus proches des oiseaux, la ceinture pectorale est déjà dirigée latéralement et permet ce type de battement.

Farish Jenkins, de l'Université Harvard, et George Goslow, de l'Université Brown, ont mis en évidence le rôle de la fourchette (issue de la fusion des clavicules) au cours du vol. Chez les oiseaux actuels, elle maintient écartés les éléments de la ceinture scapulaire, et accumule de l'énergie lors de l'abaissement des ailes. Chez les premiers oiseaux, ces os étaient certainement moins élastiques et ils devaient surtout servir de point d'ancrage pour les muscles du membre antérieur. Apparemment, le muscle essentiel pour la rotation et la levée du membre, dans la phase de relèvement

de l'aile au cours du vol, n'a pas la même position chez *Archaeopteryx* ou d'autres oiseaux primitifs que chez les oiseaux modernes : les premiers oiseaux avaient probablement un vol maladroit, et ils ne devaient pas battre des ailes aussi rapidement ni aussi précisément que les oiseaux actuels. En quelques millions d'années, les oiseaux acquièrent toutefois les caractéristiques indispensables à un vol plus contrôlé.

Trois fois plus d'oiseaux fossiles ont été découverts depuis 1990 que dans toutes les années qui ont précédé. Ces nouveaux spécimens, trouvés en Espagne, en Chine, en Mongolie, à Madagascar et en Argentine, complètent nos connaissances sur l'évolution des oiseaux qui ont suivi

Un oiseau géant au Crétacé

Les paléontologues savent depuis longtemps que les terrains continentaux du Crétacé supérieur (de 80 à 65 millions d'années) qui affleurent dans le Sud de la France, de la Provence aux Pyrénées, contiennent des restes abondants de dinosaures. On y a découvert, sur plusieurs sites, les restes d'un oiseau gigantesque que nous avons nommé *Gargantuavis philoinos*, «l'oiseau gargantuesque amateur de vin» (le héros de Rabelais évoque sa grande taille et les sites de découverte sont situés au milieu des vignes) : un morceau de sacrum à Fox-Amphoux, dans le Var, un fémur à Villespassans, dans l'Hérault et un bassin incomplet à Campagne-sur-Aude, dans l'Aude.

Ces restes fragmentaires ne permettent pas une reconstitution détaillée de l'oiseau. Ainsi, la forme de son bec, qui donnerait des indications sur son régime alimentaire, est inconnue. Toutefois nous avons, à l'aide d'équations mises au point à partir d'animaux actuels, déduit son poids de la circonférence de son fémur : environ 140 kilogrammes. C'est le poids d'une autruche adulte, plus grand oiseau vivant aujourd'hui. Un tel oiseau était certainement trop lourd pour voler (le poids du plus grand oiseau volant connu, un rapace du Tertiaire, en Argentine, est estimé à 70 kilogrammes). L'examen du bassin confirme cette conclusion : large et massif, il ne ressemble pas à celui d'un oiseau volant. Il n'est pas non plus aussi étroit ni allongé que celui de l'autruche et de ses parents actuels, qui sont des coureurs rapides. *Gargantuavis philoinos* était vraisemblablement un oiseau lourd, marcheur, et lent.

La découverte d'un oiseau si grand dans des couches riches en dinosaures datant d'environ 70 millions d'années est une première. Jusqu'à présent, les plus anciens oiseaux géants connus dataient du début du Tertiaire, tel *Gastornis*, trouvé dès 1855 à Meudon, plus jeune que *Gargantuavis* d'environ 15 millions d'an-

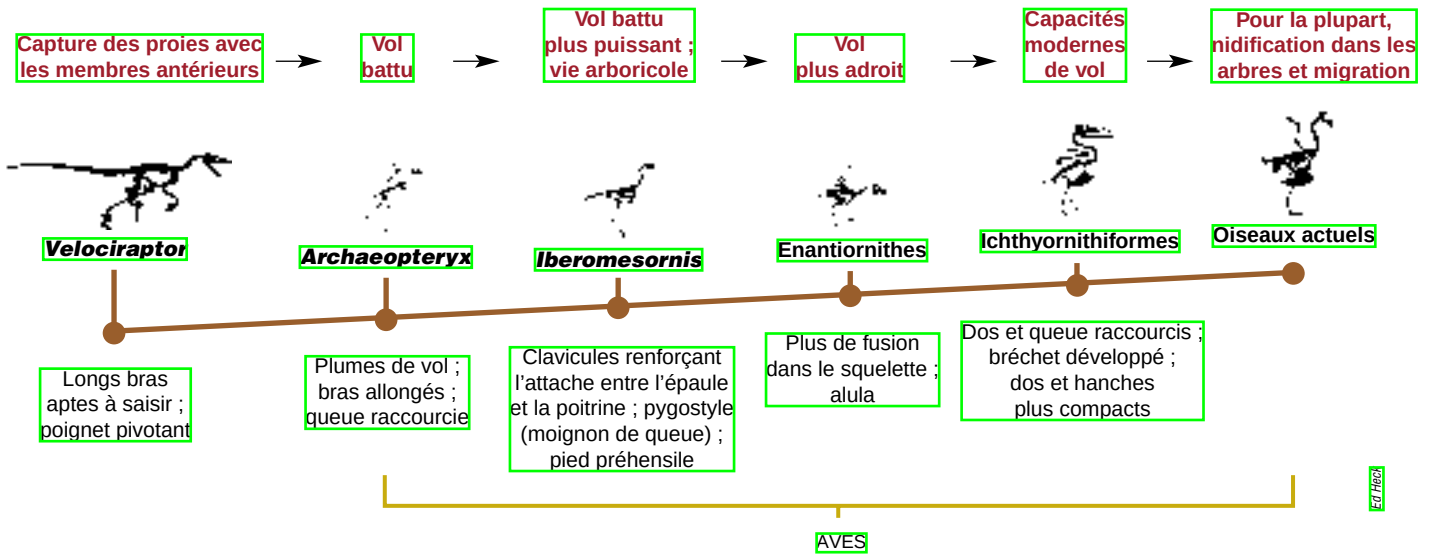
nées, et le plus grand oiseau connu du Crétacé était *Hesperornis*, oiseau marin aux ailes atrophiées, trouvé aux États-Unis, qui ne dépassait pas un mètre de haut. Les paléontologues en avaient déduit que les grands oiseaux terrestres ne s'étaient développés qu'après l'extinction des dinosaures il y a 65 millions d'années : ils auraient alors occupé des niches écologiques laissées vacantes par la disparition des grands reptiles, alors que les mammifères étaient encore de petite taille et commençaient seulement leur grande diversification évolutive. *Gargantuavis philoinos*, de la taille d'une autruche, vivait au milieu des dinosaures : la disparition de ces derniers n'était donc pas une condition *sine qua non* à l'apparition de tels oiseaux géants.

Gargantuavis n'est pas le premier oiseau du Crétacé incapable de voler à être signalé. Outre *Hesperornis* et certains autres oiseaux marins apparentés qui avaient perdu cette faculté, on connaît aussi, en Argentine, un oiseau terrestre de la taille d'un coq, nommé *Patagopteryx*, qui ne pouvait pas voler.

La découverte de *Gargantuavis philoinos* pose aussi des questions au sujet des abondants œufs fossiles connus dans le Crétacé supérieur du Sud de la France. Ces œufs ont été généralement attribués à des dinosaures, à l'exception de petites coquilles fines qui auraient été pondues par de petits oiseaux. *Gargantuavis philoinos* devait pondre de gros œufs, et sur le sol : certains des œufs fossiles découverts dans le Sud de la France lui appartiennent probablement. La classification des œufs, établie sur la microstructure de leur coquille, ne permet pas de dire lesquels : le seul moyen d'établir avec certitude par qui un œuf fossile a été pondu est de trouver à l'intérieur un embryon identifiable, ce qui ne s'est jamais produit en France.

Éric BUFFETAUT, CNRS, Paris
Jean LE LOEUFF, Musée des dinosaures, Espéraza

Évolution des capacités



6. LE CLADOGRAMME DE L'ÉVOLUTION des oiseaux montre que le vol battu s'est amélioré progressivement depuis 150 millions d'années. Les oiseaux deviennent aussi assez vite arboricoles. Les

principaux caractères du squelette qui permettent ces évolutions de comportement sont indiquées sous le dessin au fur et à mesure de leur apparition.

Archaeopteryx et sur le perfectionnement de leur dispositif de vol. Les oiseaux ont rapidement présenté une variété de tailles, de formes et de comportements, de la plongée à l'incapacité de voler, et ils se sont diversifiés pendant tout le Crétacé (qui finit il y a environ 65 millions d'années).

Quand les poules avaient des dents

Imaginons une forêt du Crétacé inférieur, il y a 140 millions d'années : les premiers oiseaux, aux doigts griffus et aux becs garnis de dents, capables de se percher, passent la plus grande partie de leur temps dans les arbres. Y nichent-ils ? Chantent-ils ? Migrent-ils sur de longues distances ? N'acquiescent-ils toutes leurs plumes qu'à l'âge adulte, comme les oiseaux actuels, et grandissent-ils aussi vite ? Nous ne le savons pas.

En revanche, on sait que, tout au long du Crétacé inférieur, des caractères du squelette évoluent, favorisant le vol : des os de la main et du bassin fusionnent, augmentant la résistance du squelette ; le sternum s'élargit et une crête (le bréchet) apparaît au milieu de sa face externe, où s'ancrent les muscles du vol ; les membres antérieurs s'allongent fortement ; les os du crâne et les vertèbres deviennent plus creux et s'allègent ; les os de la queue sont réduits à une courte série de segments indépendants, finissant en un moignon qui

contrôle les plumes de la queue ; l'alula (partie de l'aile portée par le pouce et essentielle dans le contrôle du vol à faible vitesse) apparaît aussi, de même que le premier orteil allongé, utile pour se percher.

Les premiers oiseaux qui volent ont certainement un métabolisme plus actif que les reptiles à sang froid : ils maintiennent au moins par eux-mêmes la température des muscles nécessaire aux mouvements rapides du vol, et produisent l'énergie qu'ils dépensent. Les plumes assurent une isolation, comme les ébauches de plumes ont pu aider à conserver la chaleur, et donc l'énergie, chez les ancêtres des oiseaux. Les oiseaux primitifs ne volent pas aussi loin ni aussi vigoureusement que les oiseaux modernes.

Revenons dans notre forêt 50 millions d'années plus tard, à la fin du Crétacé : des représentants de lignées

d'oiseaux très primitives côtoient les premiers membres de groupes actuels. Au moins quatre des principaux groupes d'aujourd'hui (y compris les ancêtres des oiseaux de rivage, oiseaux de mer, canards et oies) sont déjà florissants plusieurs millions d'années avant la fin du Crétacé, et probablement aussi les précurseurs des autres oiseaux modernes.

La plupart des lignées d'oiseaux qui évoluent au cours du Crétacé s'éteignent pendant cette période. Sont-elles supplantées par de nouveaux groupes ? Périissent-elles dans une catastrophe écologique ? Sont-elles incapables de s'adapter aux modifications de leur environnement ? Nous ne le saurons sans doute jamais, mais nous sommes désormais certains que les dinosaures sont encore parmi nous : les oiseaux ne sont que de petits dinosaures théropodes couverts de plumes et à la queue courte.

Kevin PADIAN est conservateur au Muséum de paléontologie de l'Université de Berkeley. Luis CHIAPPE est professeur adjoint à l'Université de New York.

John H. OSTROM, *Archaeopteryx and the Origin of Birds*, in *Biological Journal of the Linnean Society* (Londres), vol. 8, n° 1, pp. 91-182, 1976.

Jacques A. GAUTHIER, *Saurischian Monophyly and the Origin of Birds*, in *Memoirs of the California Academy of Sciences*, vol. 8, pp. 1-55, 1986.

Peter WELLNHOFER, *L'archéoptéryx*, in *Pour la Science*, janvier 1990.

Luis M. CHIAPPE, *The First 85 Million Years of Avian Evolution*, in *Nature*, vol. 378, pp. 349-355, 23 novembre 1995.

The Encyclopedia of Dinosaurs (voir les entrées «Aves» et «Bird Origins»), sous la direction de Philip J. Currie et Kevin Padian, Academic Press, 1997.

Kevin PADIAN et Luis M. CHIAPPE, *The Origin and Early Evolution of Birds*, in *Biological Reviews* (à paraître).

Pourquoi la rougeole tue encore en Afrique

GILLES PISON • PETER AABY

Contrairement à ce que l'on a longtemps admis, la rougeole ne tue pas les enfants mal nourris plus que les autres. En revanche, les enfants d'une même famille sont souvent très malades : la contagion entre frères et sœurs est plus grave qu'entre enfants non apparentés.

Bien que la rougeole soit une maladie bénigne, elle est redoutée dans les pays en développement, car elle y est responsable de nombreux décès. Selon l'Organisation mondiale de la santé, un million d'enfants meurent chaque année de cette maladie dans le monde, ce qui en fait la quatrième cause de décès d'enfants après la diarrhée, les infections respiratoires et le paludisme. En Afrique, au Sud du Sahara, la létalité, c'est-à-dire le risque qu'un enfant atteint meurt de sa maladie, dépasse 10 pour cent. C'est là où la létalité est maximale.

Près de 40 millions de personnes, surtout des enfants, auraient eu la rougeole dans le monde en 1996. Pourtant, beaucoup d'enfants sont vaccinés : environ un sur deux l'était au début des années 1980 et, en 1990, la proportion a atteint près de huit enfants sur dix ; depuis, elle ne semble pas avoir progressé. Cette moyenne cache de grandes disparités selon les continents. En Afrique, seulement un enfant sur deux est vacciné ; dans les pays d'Asie de l'Est et du Sud trois enfants sur quatre le sont ; ailleurs dans le monde, la couverture vaccinale atteint 85 pour cent des enfants.

Pourquoi les risques de mortalité ne sont-ils pas identiques partout dans le monde ? Pourquoi les risques ont-ils évolué au cours du temps ? Il y a 100 ans, la rougeole était encore une maladie grave dans les pays industrialisés, entraînant parfois la mort, comme dans les pays pauvres, aujourd'hui.

C'est seulement au cours des 50 dernières années que la létalité de la rougeole a diminué dans les pays industrialisés, où elle est aujourd'hui infime.

Les recherches menées au cours des 15 dernières années, notamment en Afrique de l'Ouest, nous ont permis de mieux comprendre pourquoi la rougeole est parfois grave au point de menacer la vie des enfants et pourquoi les cas graves sont plus fréquents dans certaines régions, à certaines époques. Nous avons aussi découvert que la rougeole a parfois des avantages : elle améliore la survie des enfants qui ont eu la maladie sous une forme légère.

La malnutrition n'explique pas tout

La rougeole est une maladie virale très contagieuse et, si les enfants ne sont pas vaccinés, ils sont contaminés tôt ou tard. Il y a quelques années encore, on admettait que l'immunité, acquise à l'occasion de la maladie ou grâce à la vaccination, protégeait pour toute la vie : une seule injection devait suffire et on n'attrapait la maladie qu'une seule fois. Aujourd'hui, on pense que, pour qu'il reste efficace, le système immunitaire doit être stimulé périodiquement par des contacts répétés avec le virus, et qu'en l'absence de tels contacts, le risque existe de contracter une deuxième fois la maladie. Enfin, le virus de la rougeole semble être partout le même, et les variations

de létalité d'un continent à l'autre ne résultent pas de l'existence de souches virales différentes.

Au début du XX^e siècle, on avait remarqué que, dans les pays industrialisés, la rougeole faisait des victimes uniquement dans le milieu défavorisé. On incriminait indistinctement le manque de soins et d'hygiène, la malnutrition et la promiscuité dans les logements de petite taille.

Peu à peu, les médecins ont considéré que la rougeole n'était pas une maladie grave par elle-même et qu'elle ne tuait pas : si certains enfants infectés mouraient, c'était des complications de la maladie ou parce qu'elle aggravait d'autres maladies dont souffrait déjà l'enfant. Les mauvaises conditions de vie favorisaient ces complications.

Depuis les années 1950, le principal accusé était la malnutrition. On admettait que seuls les enfants mal nourris mouraient de rougeole, au point que certains proposèrent même de considérer la mortalité par rougeole comme un indicateur de l'état nutritionnel de la population.

Cette théorie a été mise en défaut il y a une quinzaine d'années, à l'occasion d'une étude de la croissance et de la santé des enfants de Guinée-Bissau. Alors que l'un d'entre nous avait commencé à suivre plusieurs centaines d'enfants, une épidémie de rougeole a éclaté, provoquant, comme souvent en Afrique, une hécatombe : parmi les enfants âgés de six mois à trois ans ayant attrapé la maladie, près d'un sur trois en est mort. On connaissait le

poids de chaque enfant avant l'épidémie, et l'on a comparé le poids des enfants morts et celui des enfants qui avaient eu la maladie, mais qui avaient survécu : il n'y avait pas de différences. Les enfants qui avaient un poids normal pour leur âge avaient succombé dans les mêmes proportions que les enfants mal nourris. Intrigué par ce résultat contraire à la théorie, nous avons cherché à l'expliquer.

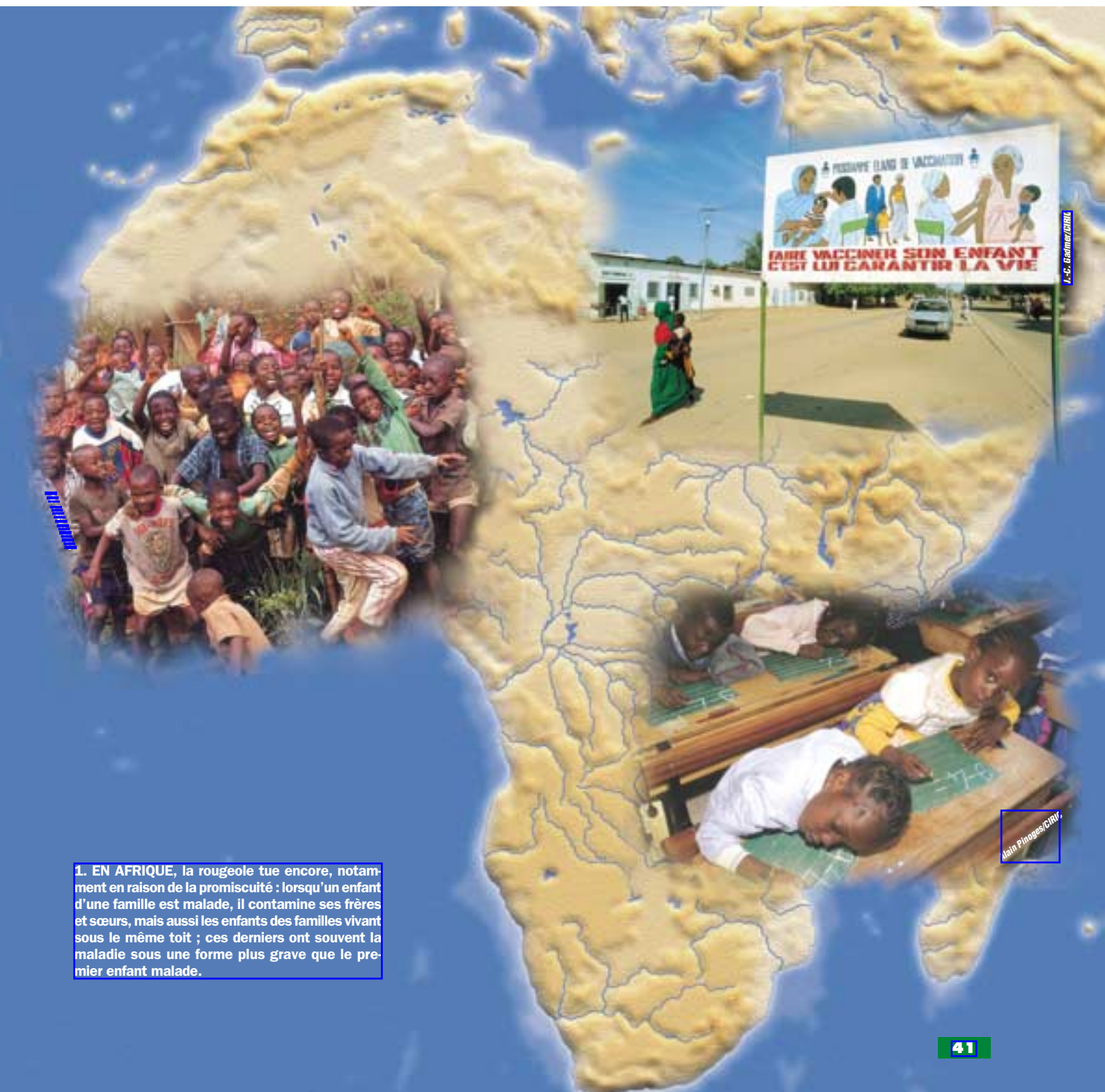
Nous avons alors découvert un nouveau facteur de gravité de la rougeole :

la promiscuité. Nous avons d'abord constaté que la létalité de la rougeole était deux à trois fois plus forte dans les familles où l'épidémie avait touché plusieurs enfants que dans celles où elle n'en avait touché qu'un seul.

Un nouvel accusé : la promiscuité

À l'intérieur des familles comptant plusieurs malades, la létalité variait aussi entre le premier contaminé (le cas pri-

maire) et les enfants de la même famille contaminés après (les cas secondaires) : la rougeole était trois fois plus mortelle pour les cas secondaires que pour les cas primaires. Nous avons ainsi découvert deux types de contagion différant par la gravité de la maladie : la contagion entre enfants de familles différentes et celle entre enfants de même famille (la première est moins dangereuse que la seconde). Ces constatations ont été ultérieurement confirmées par d'autres études du même type.



1. EN AFRIQUE, la rougeole tue encore, notamment en raison de la promiscuité : lorsqu'un enfant d'une famille est malade, il contamine ses frères et sœurs, mais aussi les enfants des familles vivant sous le même toit ; ces derniers ont souvent la maladie sous une forme plus grave que le premier enfant malade.

Si la contagion entre membres d'une même famille est dangereuse, c'est vraisemblablement en raison de l'intensité des contacts entre l'enfant infectant et l'enfant infecté. Vivant et dormant ensemble dans la même maison, voire dans la même pièce, ils respirent le même air et la dose de virus transmise est sans doute plus forte que s'ils n'avaient que de brefs contacts. Le risque de transmission simultanée d'une autre maladie, source de complications, est aussi supérieur. Les frères et sœurs ne sont d'ailleurs pas les seuls à se conta-

miner de cette façon. Autrefois, dans les pays industrialisés, la rougeole faisait des ravages dans les orphelinats et dans les hôpitaux : les enfants y vivaient ensemble et dormaient en dortoir, de sorte que la contagion était intense, comme en famille.

La gravité des épidémies qui ont touché certaines îles confirme l'effet aggravant de la promiscuité. Dans les îles, la rougeole se manifeste souvent par des épidémies espacées : après une première épidémie, le virus, qui ne touche que l'espèce humaine, est éliminé de l'île ; il y est réintroduit

par un immigrant malade, qui déclenche une nouvelle vague épidémique. Les personnes non immunisées, notamment celles qui sont nées après l'épidémie précédente, sont nombreuses. Dans certaines îles, les épidémies sont si espacées que, parfois, aucun habitant n'a été en contact avec le virus lorsque l'une d'elles survient (ou seulement les personnes très âgées). Ce fut le cas de l'épidémie de 1846 aux Îles Féroé, et de celle de 1962 à l'Est du Groenland. La quasi totalité de la population est alors atteinte en même temps, et la pro-

La rougeole, son virus et ses vaccins

Le virus de la rougeole appartient à la famille des paramyxovirus. Il est exclusivement humain et se transmet d'homme à homme par les gouttelettes produites au cours de la toux ou des éternuements. Bien que la rougeole soit considérée comme une infection aiguë, le virus persiste sous forme latente chez certaines personnes qui ont été infectées. Chez les personnes immunodéprimées (les malades atteints du SIDA ou de leucémie), le virus est ainsi excrété pendant plusieurs mois après la phase aiguë.

Chaque particule virale mesure entre 100 et 300 nanomètres

de diamètre, et son génome est sous forme d'ARN. Le virus pénètre dans l'organisme surtout par l'épithélium des voies aériennes supérieures. Il se répand ensuite dans l'organisme et se multiplie dans le foie et dans la rate ; au bout de huit jours, il est abondant dans les épithéliums de l'œil, du poumon et de l'intestin, ses principales cibles. Une éruption de boutons se produit, sur tout le corps, vers le quatorzième jour. Pendant la semaine qui suit, l'enfant est immunodéprimé, et il attrape facilement des infections secondaires (de l'œil, de la bouche, de l'intestin ou du poumon). La maladie est souvent suivie d'une ulcération de la cornée : plus de la moitié des cécités de l'enfant seraient dues à la rougeole.

Un enfant sur 1000 environ est victime d'une encéphalite entraînant la mort dans dix pour cent des cas et laissant des séquelles cérébrales dans 20 pour cent des cas. La leucoencéphalite sclérosante est une maladie rare qui atteint l'enfant ou l'adolescent (un cas sur un million) entre cinq et dix ans après la primo-infection. Durant la phase de dissémination, le virus atteint divers tissus et le système nerveux central.

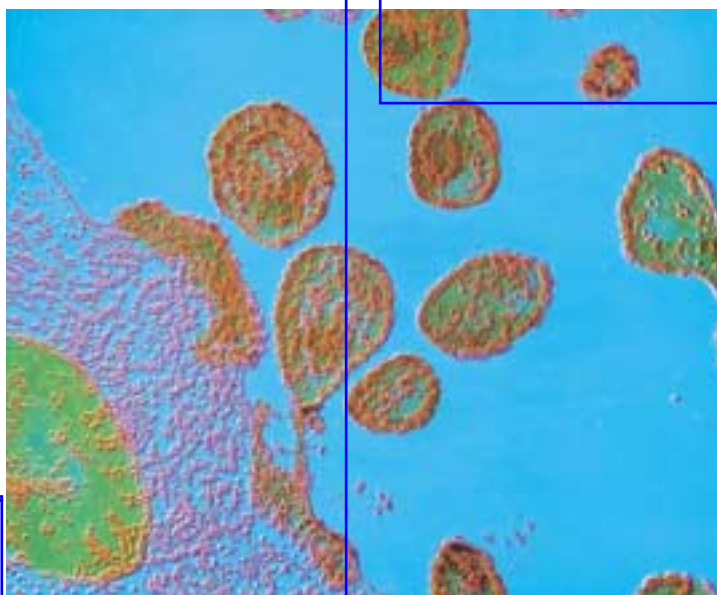
La production d'anticorps, détectables quelques jours après l'éruption de boutons, augmente progressivement et est maxi-

male au cours de la deuxième semaine qui suit l'éruption. Les anticorps persistent toute la vie à une concentration suffisamment élevée pour empêcher que la maladie ne se développe à nouveau. Cette concentration élevée résulterait de réinfections périodiques, sans signes cliniques, ou par le maintien du virus, sous sa forme latente, dans la rate ou dans d'autres organes, ce qui stimulerait en permanence le système immunitaire.

Il n'existe pas de traitement spécifique de la rougeole, mais on cherche à traiter les complications. La prescription d'anticorps (des immunoglobulines) spécifiques de la rougeole ou de vitamine A diminue la mortalité.

Le virus de la rougeole a été isolé dans les années 1950. Les premiers vaccins, testés vers 1960, déclenchaient des réactions trop violentes, proches de la maladie elle-même, de telle sorte qu'il fallait prescrire des immunoglobulines en même temps que le vaccin pour en atténuer les effets. Un autre vaccin, contenant du virus inactivé (tué) a été utilisé quelque temps aux États-Unis, mais il n'empêchait pas certains enfants de développer une forme bizarre de rougeole, avec une pneumonie grave ; il a été abandonné.

Le vaccin utilisé aujourd'hui presque partout dans le monde, le vaccin Schwartz, a été mis au point au milieu des années 1960 ; il contient du virus vivant atténué. Il est administré aux enfants âgés de neuf mois dans les pays en développement, et entre 12 et 15 mois, dans les pays industrialisés. En 1989, l'Organisation mondiale de la santé a recommandé l'utilisation d'un nouveau vaccin, le vaccin Edmonston-Zagreb, contenant des concentrations élevées du virus vivant atténué et administré dès l'âge de six mois. Toutefois, en 1992, il a été abandonné, car il semblait entraîner une surmortalité chez les filles. Aujourd'hui, on utilise à nouveau le vaccin vivant atténué et faiblement dosé.



Des particules virales de la rougeole, nouvellement formées (en marron), sont libérées par une cellule infectée (le grossissement est égal à 42 000).

portion de rougeoles graves est très élevée.

Tous les facteurs qui favorisent la promiscuité influent indirectement sur la létalité : un taux de natalité élevé, des traditions tels la polygamie, la famille étendue ou encore le partage d'un même logement par plusieurs familles. La disposition du logement, le nombre de pièces, le nombre de lits et l'habitude de faire dormir les enfants à plusieurs dans la même pièce, voire dans un même lit, influent aussi sur l'intensité de la contagion.

Le rôle joué par la promiscuité dans la transmission et la gravité des épidémies de rougeole nous a permis de mieux comprendre pourquoi la mortalité diffère selon les populations. En comparant plusieurs groupes ethniques de Guinée-Bissau, nous avons constaté que, chez les Mandingues, dont les ménages sont souvent de grande taille et qui ont l'habitude de faire dormir ensemble les petits enfants, la mortalité infantile est plus élevée que chez les Balantes, dont les ménages, de plus petite taille, ont souvent moins d'enfants et les font plutôt dormir séparément.

Ce contraste se retrouve, à plus grande échelle, entre l'Afrique de l'Ouest, où la famille étendue et la polygamie sont souvent la règle, et l'Afrique de l'Est, où ces traits d'organisation sociale sont moins répandus : la rougeole est plus meurtrière en Afrique de l'Ouest, et la mortalité des enfants y est généralement supérieure. L'Afrique, dans son ensemble, s'oppose à l'Asie, où la famille nucléaire et la monogamie dominent, et où la rougeole est une maladie moins grave. Enfin, si la rougeole n'est plus redoutée aujourd'hui dans les pays industrialisés, alors qu'elle tuait fréquemment au siècle dernier, c'est en partie que la promiscuité y a régressé. Les familles nombreuses ont quasiment disparu et les logements sont plus spacieux.

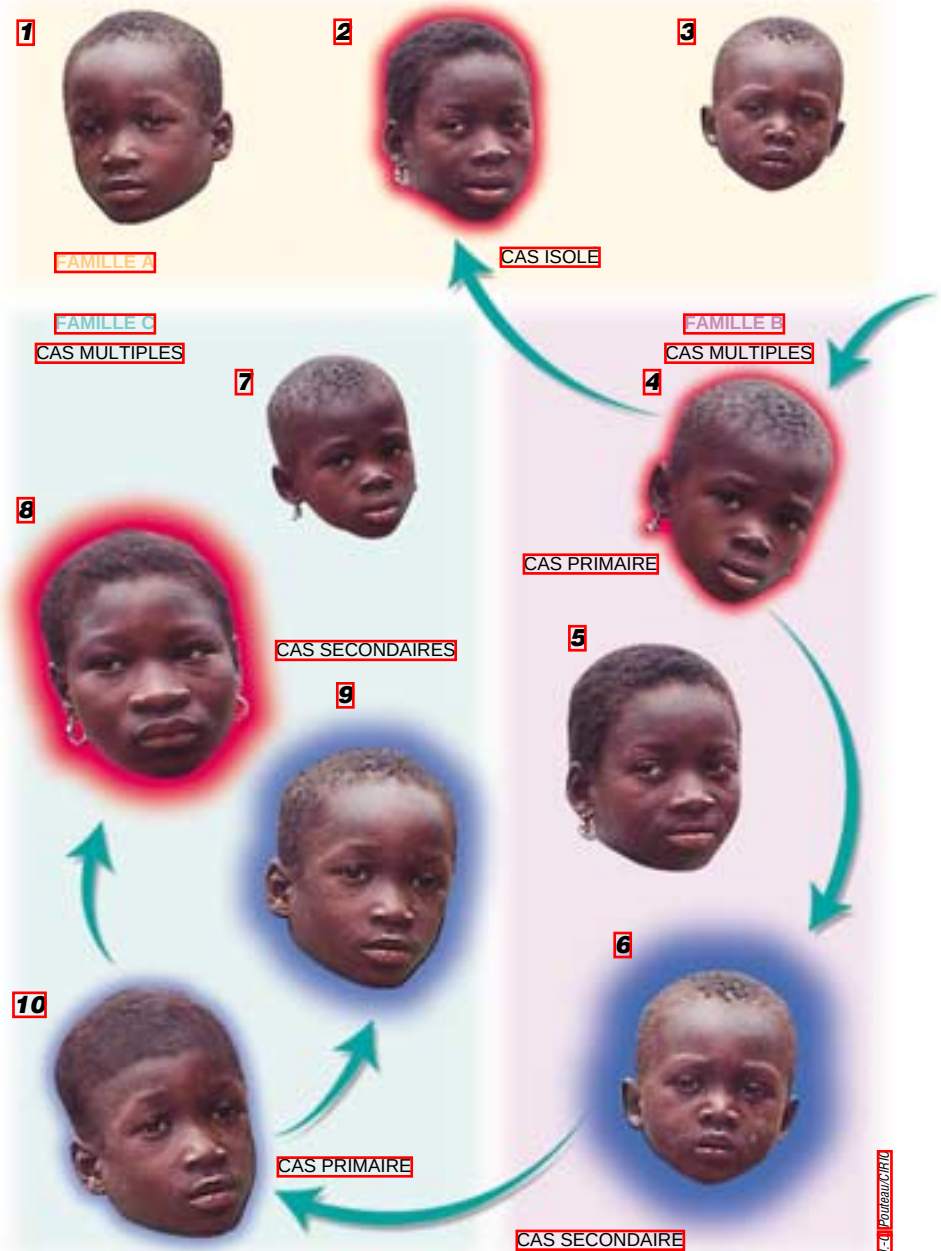
La contagion entre enfants de sexe opposé

En Afrique, les filles meurent plus de rougeole que les garçons et à un âge plus élevé, notamment parce que les filles et les garçons n'ont pas les mêmes comportements : les filles restent plus souvent à la maison que les garçons, à aider leur mère et à s'occuper de leurs petits frères et sœurs ; lorsqu'elles ont

la rougeole, c'est souvent parce qu'elles ont été contaminées par un frère ou une sœur malade. Au contraire, les garçons, plus souvent à l'extérieur, sont souvent contaminés par des enfants d'autres familles avec lesquels ils jouent. Ainsi, la fréquence des cas secondaires est supérieure chez les filles, et la létalité plus forte.

Nous avons constaté un phénomène plus étrange encore : la gravité

de la rougeole dépend du sexe de l'enfant qui transmet la maladie. Plus précisément, la maladie est deux à trois fois plus meurtrière quand la contagion se fait entre enfants de sexes différents (un frère qui contamine une de ses sœurs ou l'inverse) que quand elle a lieu entre enfants de même sexe (une fille qui contamine une de ses sœurs, ou un garçon un de ses frères). Les contacts entre une mère et ses fils,



2. LE MODE DE TRANSMISSION de la rougeole influe sur la gravité de la maladie : les enfants qui sont les premiers atteints dans leur famille (2, 4 et 10), nommés cas primaires, ont attrapé la maladie d'un enfant contagieux d'une autre famille (2 est contaminé par 4 et 10 par 6) ; ils ont une forme légère de la maladie. En revanche, les enfants qui sont contaminés par une sœur ou par un frère contagieux, les cas secondaires (6, 8 et 9), sont plus gravement malades. Enfin, les cas secondaires contaminés par un enfant de l'autre sexe (6 par 4 et 8 par 10) ont une maladie plus grave que ceux contaminés par un enfant du même sexe (9 par 10) (la gravité de la maladie a été symbolisée par une auréole plus colorée et plus large).

ou entre un frère et une sœur sont-ils plus forts qu'entre personnes du même sexe? Non : les enquêtes montrent même que c'est plutôt l'inverse, et que les filles ont plus de relations entre elles qu'avec leurs frères, et qu'il en est de même pour les garçons. L'explication de ce phénomène serait plus d'ordre biologique que comportemental : le virus produit par une cellule aurait des caractéristiques liées au sexe du por-

teur, qui diminueraient son pouvoir infectieux chez les personnes du même sexe, mais l'augmenteraient chez les personnes de l'autre sexe. Des recherches complémentaires devraient éclairer ces mécanismes immunitaires encore mystérieux.

Ainsi les filles sont doublement désavantagées : elles attrapent souvent la rougeole à la maison (ce sont des cas secondaires dont on a men-

tionné la surmortalité) et, une fois sur deux, elles sont contaminées par un frère (avec la surmortalité lors des transmissions entre sexe opposé). Au contraire, quand un garçon attrape la maladie, c'est souvent en jouant dehors avec d'autres garçons. Ce double désavantage explique partiellement la plus forte mortalité des filles ayant la rougeole quand on la compare à la mortalité des garçons.

L'éradication de la rougeole

L'Organisation mondiale de la santé veut réduire d'ici l'an 2000 le nombre de cas de rougeole de 90 pour cent et le nombre de décès dus à cette maladie de 95 pour cent, par rapport aux nombres de personnes malades et décédées qui prévalaient il y a une vingtaine d'années (avant le début du programme mondial de vaccinations). L'éradication de la maladie n'est pas un but officiel, mais on espère y parvenir, surtout devant le succès que semble obtenir le programme visant à éradiquer la poliomyélite. Si l'Organisation mondiale de la santé parvient à éradiquer la poliomyélite au cours des dix années à venir, la prochaine maladie infectieuse visée serait la rougeole (sans doute vers 2010).

L'Amérique, qui est déjà en pointe pour l'éradication de la poliomyélite, fait aussi de gros efforts pour maîtriser la rougeole. En 1996, seulement 1680 cas de rougeole ont été recensés sur l'ensemble du continent américain, et certains pays d'Amérique n'ont enregistré aucun cas depuis plus de trois ans. Ce succès tient à une triple stratégie : premièrement, l'organisation de journées nationales de vaccination, où tous les enfants et les adolescents qui ont entre un et 14 ans sont vaccinés, qu'ils aient déjà eu la maladie ou non, qu'ils aient déjà été vaccinés ou non.

Deuxièmement, les autorités sanitaires s'assurent qu'au moins

90 pour cent de tous les enfants de un an sont vaccinés. Troisièmement, tous les enfants d'âge préscolaire sont vaccinés, lorsque le nombre des enfants qui ont échappé à la vaccination, et qui sont donc susceptibles d'attraper la maladie, atteint un seuil critique ; cette opération de grande envergure est menée au minimum tous les cinq ans.

Pour éradiquer la rougeole, on pensait qu'il faudrait disposer d'un nouveau type de vaccin inoculable avant l'âge de neuf mois. Étant donnés les résultats obtenus en Amérique, les autorités de santé estiment que l'éradication sera possible, même avec les vaccins actuels.

La stratégie qui a réussi en Amérique sera-t-elle aussi efficace dans les autres régions du monde? Malheureusement, la réponse est vrai-

semblablement négative. En Afrique, l'efficacité du vaccin atteint rarement celle que l'on observe en Europe ou en Amérique, notamment parce que les rougeoles graves y sont plus fréquentes qu'ailleurs. Un enfant, même vacciné, a toujours un risque d'attraper la maladie lorsqu'il est en contact avec un malade, et ce risque est supérieur quand la personne contagieuse est gravement atteinte.

La moindre efficacité de la vaccination en Afrique tiendrait aussi au fait que les enfants y sont vaccinés jeunes, à neuf mois. Or, la vaccination est moins efficace à cet âge que vers un an, comme cela est pratiqué dans les pays industrialisés. On pourrait pratiquer des vaccinations plus tardives, mais on augmenterait alors le nombre des enfants non protégés ; dans les villes surpeuplées, un trop grand nombre d'enfants risqueraient d'être contaminés, et l'éradication deviendrait impossible.

A contrario, une autre raison milite pour l'avancement de l'âge de la vaccination : la concentration moyenne d'anticorps anti-rougeole transmis par les mères est faible, de sorte que le nombre d'enfants susceptibles d'être contaminés risque d'augmenter prochainement en Afrique. Ce phénomène est une conséquence indirecte des programmes de vaccinations qui ont commencé il y a une vingtaine d'années : les femmes qui sont aujourd'hui en âge de

procréer ont été vaccinées dans leur enfance, elles n'ont pas eu la maladie et elles transmettent moins d'anticorps à leurs enfants que des mères qui ont eu la rougeole. Les enfants des femmes vaccinées risquent d'attraper la maladie avant les enfants des femmes qui ont eu la maladie, c'est-à-dire dès deux ou trois mois. Il faudrait plutôt diminuer l'âge de la vaccination que le reculer.

L'âge de la vaccination reste l'une des questions sur laquelle risque d'achopper le programme d'éradication de la rougeole. En l'absence d'une action globale concertée, il sera sans doute nécessaire, si l'on veut éradiquer un jour la maladie, de mettre au point de nouveaux vaccins plus efficaces et assurant une immunité de plus longue durée.



AGENCE FRANCE PRESSE

Seule la vaccination systématique des nouveau-nés et des campagnes périodiques de revaccination des enfants plus âgés devraient aboutir à l'éradication de maladies infectieuses, telles la poliomyélite et la rougeole.

Les deux facteurs de gravité de la rougeole qui ont été récemment mis en évidence – la promiscuité et la contagion entre sexes différents – concernent la transmission de la maladie. Ils sont indépendants des facteurs propres à l'hôte, tels que la malnutrition, l'âge ou la prédisposition génétique, seuls facteurs considérés comme importants jusqu'à présent : on attribuait la gravité de la maladie à une inadéquation de la réaction de l'organisme face à l'infection. On sait aujourd'hui que la gravité tient tout autant, sinon davantage, à des phénomènes liés à la transmission de la maladie qu'aux seules réactions des personnes infectées.

Un autre phénomène étrange met en jeu le sexe : les filles et les garçons ne réagissent pas de la même façon au vaccin. Il y a une trentaine d'années, les premiers vaccins contre la rougeole étaient mis sur le marché. Leur emploi se généralise dans les pays riches, où le vaccin sert plutôt à éviter les désagréments occasionnés par la maladie, qu'à sauver des enfants, car la maladie ne tue quasiment plus, dans ces pays. En revanche, dans les pays pauvres, la vaccination contre la rougeole, de plus en plus répandue, a réduit notablement la mortalité. Pourtant, malgré les différents programmes de vaccination conduits par l'Organisation mondiale de la santé, près d'un enfant sur cinq échappe encore aujourd'hui à la vaccination contre la rougeole dans le monde.

De surcroît, le vaccin utilisé a plusieurs inconvénients : on ne peut pas l'administrer aux nourrissons, car les antigènes vaccinaux sont détruits par les anticorps maternels, présents dans le sang des nouveau-nés. Ce n'est que lorsque ces anticorps ont disparu, vers six mois, que la vaccination est efficace.

L'Organisation mondiale de la santé, prenant des précautions, préconise d'attendre que les enfants aient neuf mois pour les vacciner contre la rougeole. Par conséquent, l'enfant n'est pas protégé contre la maladie entre le moment où la concentration des anticorps maternels devient insuffisante pour lui assurer une bonne protection et celui où il fabrique ses propres anticorps, à l'âge de neuf mois, quand il est vacciné. Une partie des enfants attrapent la rougeole pendant ces quelques mois.

Pour y remédier, on cherche des vaccins qui seraient utilisables plus tôt, dès l'âge de cinq mois. Au cours des dix dernières années, on a essayé des vaccins contenant les mêmes souches, mais à des doses supérieures. Ces vaccins ont montré un pouvoir immunogène satisfaisant dès l'âge de cinq mois. Dès 1989, l'Organisation mondiale de la santé a recommandé qu'ils soient utilisés à grande échelle. Toutefois, le suivi des enfants qui avaient bénéficié de ces nouveaux vaccins a révélé que leur taux de mortalité était supérieur à celui des enfants vaccinés avec l'ancienne préparation, moins dosée. De surcroît, seules les filles vaccinées avec le nouveau vaccin semblaient atteintes de surmortalité, tandis qu'il n'y avait pas de différences chez les garçons. Les nouveaux vaccins ont été rapidement reti-

rés et l'ancien vaccin à bas titre a été repris. Quelle est l'origine de la surmortalité des filles ayant reçu les nouveaux vaccins ?

En fait, la surmortalité n'est pas liée à une moindre protection contre la rougeole : quel que soit le vaccin, très peu d'enfants attrapent la rougeole une fois vaccinés, qu'il s'agisse des filles ou des garçons. De surcroît, les filles vaccinées avec le nouveau vaccin ont une moindre mortalité que celles qui n'ont pas été vaccinées du tout. Toutefois, la mortalité des filles ayant reçu l'ancien vaccin est encore inférieure ; elle est même inférieure à celle des garçons ayant reçu le même vaccin. Nous avons dit que les filles sont défavorisées parce qu'elles sont souvent des cas secondaires et qu'elles sont, une fois sur deux, contaminées par un frère, mais l'essai de nouveaux vaccins a

Et les autres maladies infantiles ?

La gravité de la rougeole dépend des conditions de la contagion, ce qui semble aussi être le cas dans d'autres maladies infectieuses, telles que la poliomyélite, la varicelle et la coqueluche.

Ainsi, les cas secondaires de varicelle ont plus de boutons que les cas primaires, et le risque de décès est supérieur. Il en est de même lorsque la maladie se transmet entre personnes de sexe opposé. L'intensité du contact semble jouer aussi un rôle dans le cas de la coqueluche et des infections dues au virus respiratoire syncytial, à l'origine de certaines bronchiolites. Dans ce dernier cas, les garçons sont plus gravement atteints, sans doute parce que les mères infectées par le virus respiratoire syncytial risquent plus d'infecter leurs fils que leurs filles.

Pour la poliomyélite, on suppose depuis longtemps que les personnes malades sont des cas secondaires, contaminés par des cas primaires qui n'ont aucun symptôme. Rappelons que, lorsque plusieurs cas de rougeole ou de varicelle se produisent dans une même famille, les maladies sont séparées par un intervalle de 10 à 14 jours. Pour la poliomyélite, plus de 95 pour cent des cas sont asymptomatiques, et les familles où l'on dénombre plusieurs malades sont très rares. Quand cela se produit, les personnes atteintes sont malades en même temps : elles seraient toutes des cas secondaires, contaminés par le même cas primaire asymptomatique.

Le cas de la poliomyélite est intéressant, car cette maladie est considérée comme un exemple type des maladies obéissant à un modèle épidémiologique nommé « modèle

de la polio ». Dans ce modèle, la gravité de la maladie augmente avec l'âge. On a effectivement constaté que l'âge de la contamination et la gravité de la maladie ont augmenté dans les pays industrialisés au cours de la première moitié du XX^e siècle ; on avait attribué cette évolution à l'amélioration de l'hygiène : les infections de l'enfance, supposées asymptomatiques, auraient diminué, tandis que les infections se seraient déclarées plus tard, chez les adolescents et chez les adultes, et qu'elles auraient été plus graves.

Toutefois, cette explication n'est pas totalement satisfaisante : d'après des études menées sur la poliomyélite, à Copenhague, l'incidence, la gravité et la létalité de la maladie augmentent avec la taille de la famille (comme dans le cas de la rougeole). La gravité de la poliomyélite est maximale chez les très jeunes enfants et chez les personnes âgées, comme pour la rougeole. De même, le sexe joue également un rôle dans la transmission de la maladie : les cas multiples sont souvent du même sexe, sans doute parce qu'ils sont contaminés par un même cas primaire asymptomatique de l'autre sexe. Enfin, les jeunes enfants contaminés sont plutôt des garçons, tandis que parmi les cas de poliomyélite de plus de 15 ans, les filles sont majoritaires. La contamination se ferait plutôt par les mères que par les pères, ce qui expliquerait la prédominance des garçons parmi les jeunes enfants contaminés. Ainsi, contrairement à ce que l'on a longtemps admis, la poliomyélite ne serait pas un si bon exemple du « modèle de la polio ».

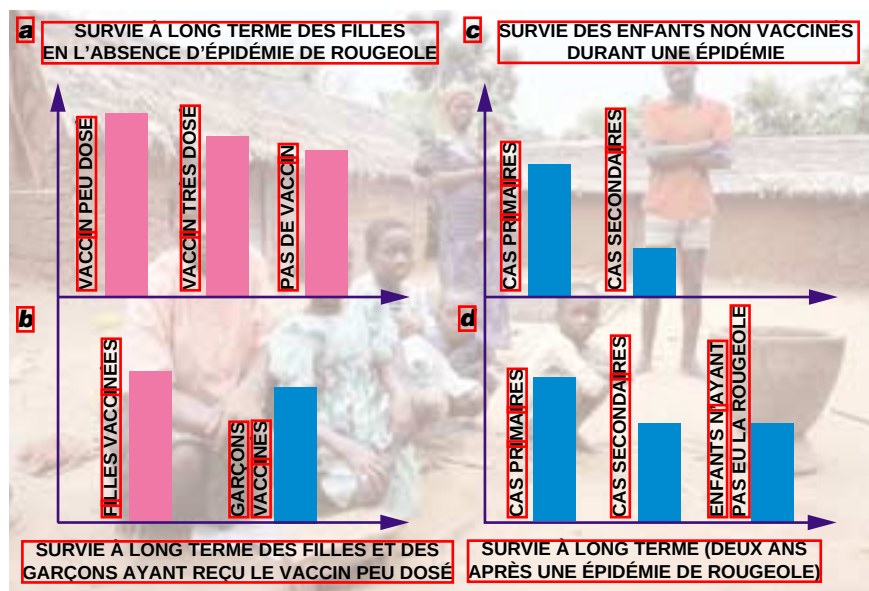
révèle un phénomène passé inaperçu jusqu'alors : le vaccin peu dosé avantage les filles par rapport aux garçons. De surcroît, la vaccination contre la rougeole semble conférer une résistance aux autres maladies, pendant un à deux ans, se traduisant par une moindre mortalité des enfants vaccinés par rapport aux enfants non vaccinés, qu'il y ait une épidémie de rougeole ou non.

Les bons côtés de la rougeole

On a également observé que le fait d'avoir une rougeole légère confère un avantage en terme de survie. Ces deux derniers résultats sont concordants, puisque la vaccination reproduit la maladie sous une forme atténuée. Les premiers malades d'une épidémie (cas primaires), qui reçoivent une faible charge virale, ont une mortalité trois à quatre fois inférieure à celle des cas secondaires, qui reçoivent une charge virale supérieure, et cela non seulement pendant la phase aiguë de la maladie, mais également pendant les deux années qui suivent. La mortalité à long terme des cas secondaires est équivalente à celle des enfants qui n'ont pas eu la maladie, tandis que celle des cas primaires est inférieure.

On ignore pour l'instant, le mécanisme de ces effets non spécifiques. Une forme de stimulation immunitaire intervient sans doute, car la maladie est associée à une augmentation de la concentration en lymphocytes $T\ CD_4$ après la phase aiguë de l'infection. De plus, les cas secondaires ont une hypersensibilité retardée au cours des trois années qui suivent l'infection inférieure à celle des cas primaires. Sans attendre l'explication, on pourrait utiliser l'effet fortifiant du vaccin, par exemple en revaccinant les enfants à intervalles réguliers. Des essais sont en cours pour vérifier l'intérêt d'une telle revaccination.

Au cours des 15 dernières années, nos connaissances sur la rougeole, une maladie banale dont on croyait tout savoir, ont notablement évolué. De nouvelles voies de recherche sur les mécanismes immunitaires de l'influence du sexe et du type de contagion sont ouvertes. On a aussi progressé dans la lutte contre la maladie. Récemment encore, l'intérêt de la vaccination a été contesté, certains experts estimant



3. LA VACCINATION CONTRE LA ROUGEOLE protège les enfants contre la maladie, mais elle améliore aussi leur survie à long terme : en l'absence d'épidémie de rougeole, la survie des enfants ayant reçu le vaccin peu dosé est meilleure que celle des enfants à qui l'on a administré le vaccin fortement dosé et meilleure que celle des enfants non vaccinés (a). De surcroît, le vaccin améliore la survie des filles plus que celle des garçons (b). Pour les enfants non vaccinés, le premier atteint dans une famille (cas primaire) a un taux de survie supérieur aux cas secondaires (car sa maladie est moins grave), que ce soit pendant l'épidémie (c) ou après (d). La survie à long terme des cas secondaires et celle des enfants qui n'ont pas eu la rougeole sont comparables au cours des deux années qui suivent une épidémie.

que la mortalité par rougeole était surtout due à la malnutrition : selon eux, les enfants que l'on sauve d'une mort par rougeole grâce à la vaccination sont les plus faibles et les plus menacés. Ils risquent de mourir à brève échéance d'une autre maladie : la vaccination change la cause de la mort, mais ne l'évite pas. Ils soutiennent qu'il vaudrait mieux améliorer l'état nutritionnel des enfants que d'investir dans les vaccinations.

Toutefois, ce raisonnement ne tient plus si, comme nous l'avons expli-

qué, la gravité de la rougeole est davantage liée aux conditions de la transmission qu'à la malnutrition. Les programmes nutritionnels seront sans effet sur la transmission. De surcroît, grâce à la vaccination, le nombre de vies sauvées est supérieur au nombre de décès par rougeole que l'on évite. La vaccination massive des enfants contre la rougeole, reconnue aujourd'hui comme une priorité, risque de réduire encore plus qu'on ne l'espérait la mortalité des enfants dans les pays en développement.

GILLES PISON, professeur au Muséum national d'histoire naturelle, dirige le laboratoire d'anthropologie biologique du CNRS (UMR 152), au Musée de l'Homme. PETER AABY, professeur au Centre de recherches épidémiologiques de Copenhague, dirige le Projet de santé de Bandim, en Guinée-Bissau.

P. AABY et al., *Measles Mortality, State of Nutrition and Family Structure : a Community Study from Guinea-Bissau*, in *Journal of Infectious Diseases*, vol. 147, pp. 693-701, 1983.

P. AABY et al., *Cross-Sex Transmission of Infection and Increased Mortality due to Measles*, in *Rev. Infect. Dis.*, vol. 8, pp. 138-143, 1986.

G. PISON, P. AABY, K. KNUDSEN, *Increased Risk of Death from Measles in Children with a Sibling of Opposite Sex in Senegal*, in *British Medical Journal*, vol. 304, pp. 284-287, 1992.

P. AABY, *Influence of Cross-Sex Transmission on Measles Mortality in Rural Senegal*, in *Lancet*, vol. 340, pp. 388-391, 1992.

P. AABY et al., *Sex-Specific Mortality after High Titre Measles Vaccines*, in *Rural Senegal Bulletin de l'OMS*, vol. 72, pp. 761-770, 1994.

P. AABY et al., *Non-Specific Beneficial Effect of Measles Immunization : Analysis of Mortality Studies from Developing Countries*, in *British Medical Journal*, vol. 311, pp. 481-485, 1995.

Les navires vikings

JOHN HALE

Entre le IX^e et le XII^e siècle, les Vikings ont dominé l'Europe, en grande partie grâce à des bateaux longs et étroits, remplis de guerriers.

En septembre 1997, des archéologues danois découvrent un bateau viking dans la vase du port de Roskilde, à 40 kilomètres à l'Ouest de Copenhague. Gisant insoupçonné aux abords du Musée du bateau viking, le navire est mis au jour... alors que l'on drague le port, afin de l'agrandir : le musée manquait de place pour ses répliques des bateaux historiques.

Selon Ole Crumlin-Pedersen, l'ancien directeur du musée, le bateau a probablement été coulé par une tempête, il y a plusieurs siècles, puis il a été recouvert par la vase. En analysant ses planches de chêne, les archéologues ont daté le bateau : il aurait été construit vers l'an 1025, sous le règne de Canut le Grand, qui créa un empire regroupant le Danemark, la Norvège, le Sud de la Suède et l'Angleterre.

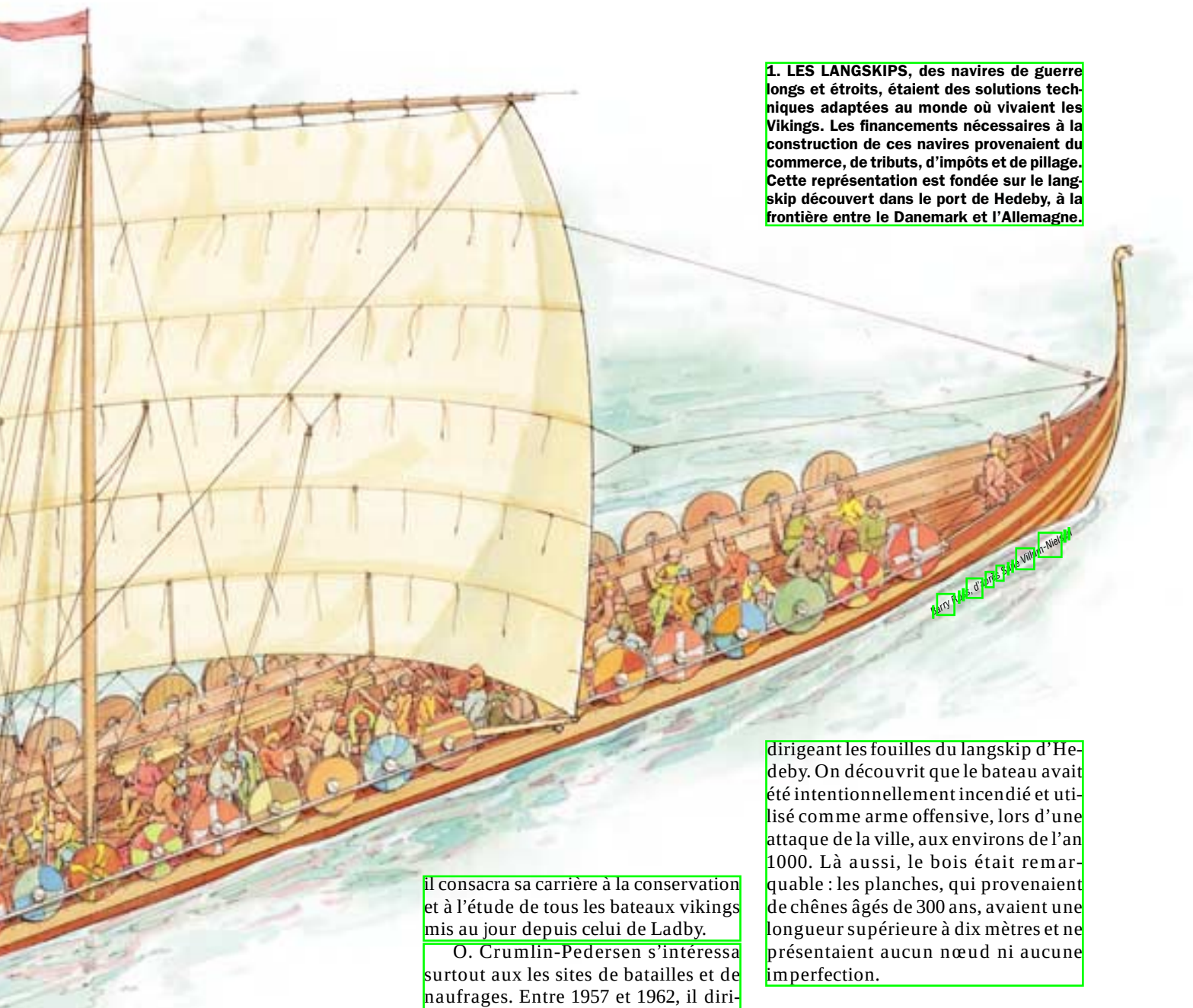
Long de 35 mètres, le navire de Roskilde est le plus grand de tous ceux qui ont été retrouvés jusqu'ici. On nomme ce genre de bateau *langskip*, littéralement le «bateau long». Ces bateaux sont des drakkars particuliers, puisque le terme drakkar désigne tous les bateaux dont la proue représente un dragon (en vieux nordique, *drakar* est le pluriel de *dreki*, qui signifie «dragon»).

Le rôle essentiel des langskips dans les «raids maritimes» (*viking*, en nordique) leur assure une place préminente

dans l'histoire médiévale. Des flottes de ces navires longs et étroits attaquèrent les côtes, de la Northumbrie, en Angleterre, jusqu'à l'Afrique du Nord, s'installèrent dans les îles Britanniques et en Normandie, faisant des Vikings la puissance maritime dominante de l'Europe entre l'an 800 et l'an 1100.

Plusieurs navires et bateaux vikings avaient été retrouvés. En 1751, par exemple, on en avait mis au jour dans les tumulus royaux de Gokstad et

d'Oseberg, en Norvège. Toutefois, le langskip classique était resté insaisissable jusqu'en 1935, date à laquelle des archéologues danois explorèrent le tumulus d'un chef de clan à Ladby. Seule demeurait l'empreinte d'un bateau, la coloration sombre du sol révélant la forme de sa coque. Des spirales métalliques marquaient l'arête de la tête de dragon de la proue, et sept longues rangées de rivets métalliques, de chaque côté, étaient restées alignées le long des bordages disparus. Le bateau de Ladby était beaucoup plus étroit que les célèbres navires norvégiens et paraissait mal taillé pour la navigation en



1. LES LANGSKIPS, des navires de guerre longs et étroits, étaient des solutions techniques adaptées au monde où vivaient les Vikings. Les financements nécessaires à la construction de ces navires provenaient du commerce, de tributs, d'impôts et de pillage. Cette représentation est fondée sur le langskip découvert dans le port de Hedeby, à la frontière entre le Danemark et l'Allemagne.

dirigeant les fouilles du langskip d'Hedeby. On découvrit que le bateau avait été intentionnellement incendié et utilisé comme arme offensive, lors d'une attaque de la ville, aux environs de l'an 1000. Là aussi, le bois était remarquable : les planches, qui provenaient de chênes âgés de 300 ans, avaient une longueur supérieure à dix mètres et ne présentaient aucun nœud ni aucune imperfection.

Une conception évoluée

Les cinq navires de guerre découverts depuis 1935 sont de types différents. De petits navires de guerre comprenant jusqu'à 20 bancs de nage (le petit bateau de guerre de Skuldelev et celui de Ladby) étaient entretenus par les communautés locales au service du roi, pour répondre à la mobilisation qui était annoncée par la circulation d'une flèche de guerre symbolique. Les navires de guerre classiques, qui comptaient jusqu'à 30 rangées de rameurs (celui d'Hedeby et le grand bateau de guerre de Skuldelev), de superbe facture, faisaient la fierté des comtes et des rois vikings. Les très grands bateaux de plus de 30 bancs de nage (celui de Roskilde) ne sont apparus qu'au cours des guerres dynastiques, à la fin de l'ère viking.

mer : avec ses 20,6 mètres de long, il mesurait à peine 3,2 mètres de large au centre de la coque, et un mètre entre la base de la quille et la planche la plus haute. Les archéologues doutèrent alors de la véracité des sagas qui décrivaient des navires bien plus grands, avec les mêmes proportions extrêmes.

Puis, en 1953, un plongeur retrouva les planches d'un langskip dans le port d'Hedeby, qui avait été jadis un prospère marché viking, à la frontière allemande. Le bateau ne fut pas renfloué, mais l'intérêt du public fut tel que le plongeur qui le découvrit fit une émission de radio sous l'eau ; Ole Crumlin-Pedersen, alors âgé de 18 ans, faisait partie des auditeurs fascinés. Il décida de devenir archéologue et, à l'âge de 22 ans, il commença une série de découvertes qui convainquirent les sceptiques ;

il consacra sa carrière à la conservation et à l'étude de tous les bateaux vikings mis au jour depuis celui de Ladby.

O. Crumlin-Pedersen s'intéressa surtout aux sites de batailles et de naufrages. Entre 1957 et 1962, il dirigea l'équipe qui dégagera deux navires de guerre et trois autres bateaux de commerce vikings dans un canal obscur près de Skuldelev ; au XI^e siècle, les habitants danois, désespérés, avaient délibérément coulé ces bateaux pour former un rempart contre des envahisseurs. Le plus grand des deux navires de guerre de Skuldelev, qui mesurait 29 mètres de long, disparut ainsi après au moins une traversée réussie de la mer du Nord : il avait été fabriqué en Irlande, à partir de chênes coupés vers 1060, près de la place forte viking de Dublin. Les traces de plusieurs saisons d'activité étaient visibles sur les deux bateaux, preuve que ces grands bâtiments étaient plus aptes à tenir la mer que certains ne le pensaient.

En 1979, O. Crumlin-Pedersen réalisa l'un de ses rêves de jeunesse en

Ces découvertes révèlent que les charpentiers vikings, qui recherchaient le navire de raid parfait, créèrent des bateaux aux proportions et aux propriétés extrêmes. Avec un rapport longueur sur largeur supérieur à six pour un (voire 11,4 pour un dans le cas du langskip d'Hedeby) et leur faible tirant d'eau, les bateaux s'échouaient sur n'importe quelle plage et rentraient dans presque n'importe quel cours d'eau d'Europe. Les charpentiers vikings visaient essentiellement la vitesse. Ils réduisaient l'épaisseur des bordages à deux centimètres seulement et éliminaient tout bois superflu des membrures. Préoccupés de perfection technique, ils ne négligeaient pas la beauté des lignes, particulièrement dans les courbes nobles de la proue et de la poupe. Un barde de la cour chantait ainsi le dragon du roi Harald Hårdråde : « Quand, à la rame, les hommes du Nord font avancer le serpent, le

bateau riveté, dans le fleuve glacé, on croit voir les ailes d'un aigle. »

Six mille ans d'évolution

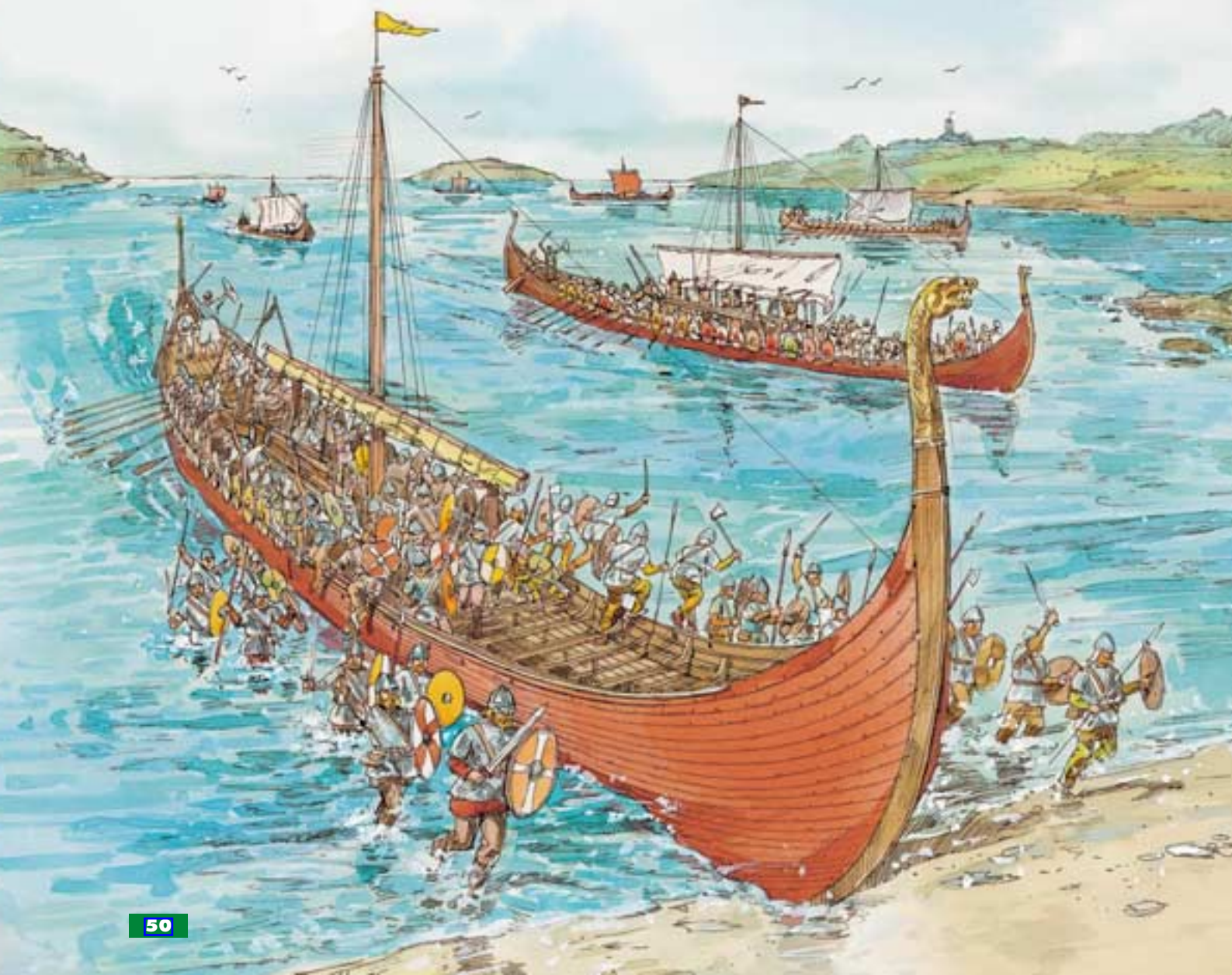
La perfection de la conception et de la réalisation du langskip n'est pas le fruit d'un génie créatif isolé. Ces navires sont l'aboutissement de 6 000 ans d'évolution technique.

Au Néolithique, les habitants des côtes danoises construisaient des pirogues : les plus anciennes datent d'environ 5 000 ans avant notre ère. Utilisant des outils de silex, des hommes sculptaient déjà des grumes de tilleul, bois tendre et résistant, jusqu'à obtenir une épaisseur régulière de deux centi-

mètres. Ces pirogues « monoxyles », dont la longueur atteignait dix mètres, s'aventuraient apparemment en mer, à la pagaie, pour la pêche à la morue, à la baleine, ainsi que pour des raids. Certaines servirent de sépulture.

Puis, il y a environ 5 000 ans, des constructeurs qui vivaient au bord de l'Âmose (une rivière du Danemark) commencèrent à creuser une rangée de trous, le long du bord supérieur de leurs pirogues. À l'aide de cordes en tendons ou en fibres végétales, ils fixèrent dans la partie haute des flancs de la pirogue le bord inférieur d'une planche portant des trous similaires. Ces planches supplémentaires augmentaient la navigabilité en surélevant le franc-bord, la

2. LES LANGSKIPS TRANSPORTAIENT LES TROUPES en mer et permettaient l'accostage : grâce à leur fond plat, ils approchaient n'importe quelle plage, ou pénétraient profondément à l'intérieur des terres en empruntant des cours d'eau peu profonds. Les guerriers, en nombre supérieur à 60 sur les plus gros bateaux, sautaient par-dessus bord à quelques pas de la terre ferme. Les populations priaient Dieu de les protéger : « Seigneur, délivre-nous du fléau des Normands. »



Le royaume du langskip

Les principales routes des expéditions des navires de guerre vikings.
Tous les villages côtiers étaient susceptibles d'être attaqués.



distance verticale entre la ligne de flottaison et la partie supérieure de la coque. Ainsi naquit la technique de bordé à clin, caractéristique de l'Europe du Nord (le bordé est l'ensemble des bordages, les planches longitudinales qui recouvrent la membrure du navire). La découverte de haches de silex danoises en Norvège et en Suède montre que ces bateaux ont permis le rayonnement de leurs constructeurs.

Les navires scandinaves évoluèrent au cours de l'Âge du bronze (2 000 à 500 avant notre ère) : leurs extrémités se relevèrent et s'ornèrent de spirales ou de têtes d'animaux. Quelques-unes de ces têtes sont certainement des

serpents ou des dragons : l'art de cette époque montre des dragons qui planent au-dessus des bateaux. L'équipage de ces bateaux porte souvent les casques à cornes devenus les symboles des caricatures de Vikings dans les opéras ou les dessins animés. Lorsque l'ère viking arriva, ces couvre-chefs étaient démodés depuis longtemps.

Les gravures sur métal ou sur pierre de l'Âge du bronze illustrent des bateaux avec une proue en forme de bec. Bien que relativement rare dans la construction navale européenne, la même structure se retrouvait au début du XX^e siècle dans les pirogues surélevées à bordé cousu en Sibérie, en Afrique

centrale et dans le Pacifique Sud. Le bec était en fait la pointe extrême de la carène de la pirogue. Une branche courbée qui y était assemblée faisait office de taillemer (une pièce qui se superpose à l'avant de l'étrave), protégeant la proue fragile à l'endroit où le bordé fermait la partie avant de la coque. Finalement, le taillemer en bois de l'Âge du bronze scandinave a fusionné avec l'extrémité sculptée pour former la haute proue recourbée des bateaux vikings.

Le bec devint la particularité marquante des embarcations de guerre, au début de l'Âge du fer (500 avant notre ère à 600 de notre ère), une époque caractérisée par un refroidissement du

Quelques-uns des sites majeurs de découverte de bateaux et de navires



3. LES SITES DE DECOUVERTE des langskips sont marqués par un point rouge sur la carte. Les navires de guerre antérieurs ont été retrouvés sur les sites marqués d'un point bleu.

Les ancêtres du langskip

Pirogue monoxyle de Lystrup, Danemark, environ 5 000 ans avant notre ère

Pirogue monoxyle surélevée d'Amose, Danemark, environ 2 500 ans avant notre ère



Bateau de guerre à bec d'Ostfold, Norvège, 1 000-500 ans avant notre ère



Bateau de guerre à double bec d'Hjortspring, Danemark, 350 avant notre ère



Pirogue évasée de Bornholm, Danemark, 1-200 de notre ère



Navire de guerre à rames de Nydam, Danemark, vers 300



Navire de guerre à rames avec quille et gouvernail latéral fixe de Kvalsund, Norvège, vers 700

climat et des tensions économiques en Europe du Nord. Trop haut et trop peu solide pour servir d'éperon, ce bec a sans doute été conservé par les constructeurs parce qu'il protégeait et stabilisait la coque. Les charpentiers l'ont même jugé suffisamment important pour en mettre aux deux extrémités, créant une forme symétrique.

On a retrouvé, dans un marais près de Hjortspring, au Danemark, une embarcation complète du début de l'Âge du fer, avec pagaies, armes et autres équipements. Elle avait été construite aux environs de l'an 350 avant notre ère. Avec ses extrémités bifides symétriques et ses grandes pagaies servant de gouvernails, à chaque extrémité, le bateau de Hjortspring pouvait rebrousser chemin sans tourner. Cette adaptabilité devait être décisive en cas de rencontre avec des ennemis dans un fjord étroit ou en cas de retraite après un raid sur une côte hostile. Pendant les 1 500 ans suivants, les embarcations de guerre scandinaves conservent cette symétrie des extrémités du bateau de Hjortspring, même après que la fixation du gouvernail, du mât et des voiles eut finalement différencié la proue de la poupe. Cette caractéristique était unique : même les Romains, qui laissèrent peu de commentaires sur la Scandinavie, mentionnent les bateaux symétriques.

Des caractéristiques du Néolithique restent visibles dans le bateau de Hjortspring : l'utilisation de tilleul pour la coque, et celle de ligatures végétales pour la fixation des bordages à clin. En revanche, le fond plat de la pirogue est réduit à une étroite planche légèrement courbée – une étape vers la quille viking. Ses extrémités élevées évitaient les entrées d'eau lorsqu'il naviguait en mer agitée, tandis que la profondeur accrue de la partie centrale facilitait les manœuvres. Les constructions ultérieures conservèrent cette courbure. La quille des bateaux vikings était plus profonde de 30 centimètres au milieu du bateau qu'aux extrémités, un raffinement architectural presque aussi subtil que l'amincissement de la partie supérieure des colonnes du Parthénon.

Les 20 guerriers qui pagayaient dans le bateau de Hjortspring étaient assis par deux sur des bancs fixés sur des membrures en tilleul, en frêne et en noisetier. L'intervalle de 90 centimètres séparant les bancs de nage laissait un espace confortable à chaque pagayeur. Cet espacement s'étant stan-

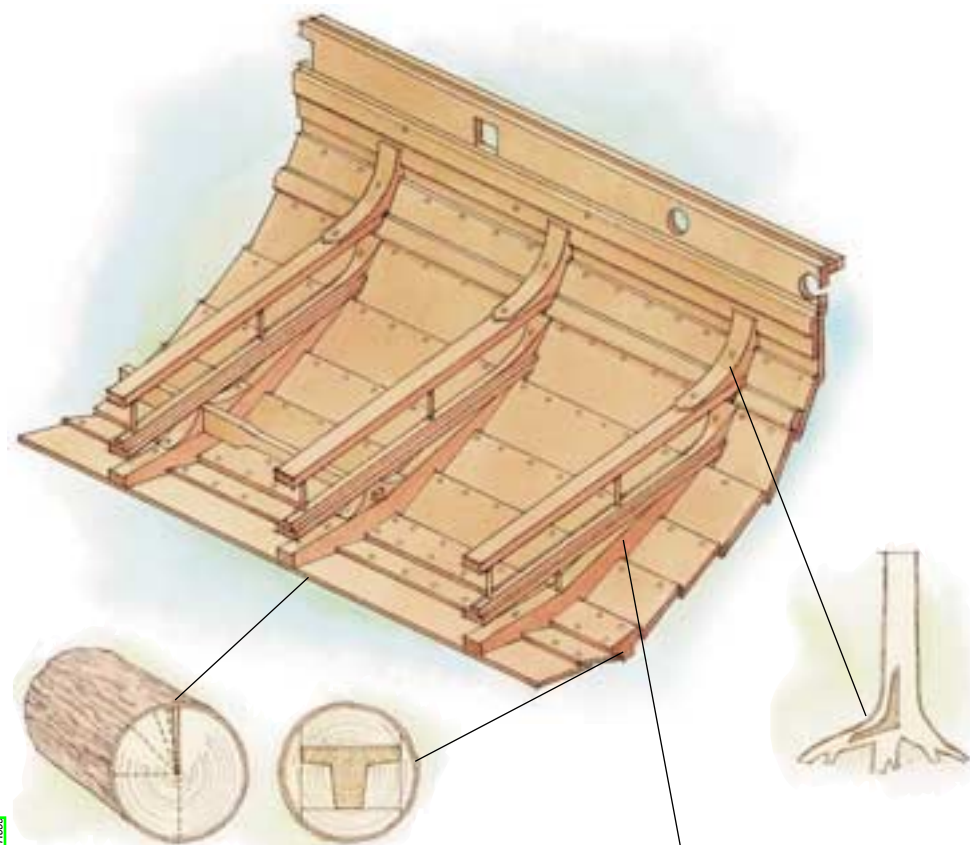
dardisé, les Scandinaves calculaient la longueur d'un bateau en comptant les «compartiments» entre les membrures. Avec son fond étroit et ses membrures largement espacées, la coque avait une souplesse remarquable ; comme dans les pirogues ancestrales, c'est la «coquille», c'est-à-dire le bordé, plutôt que les membrures qui donnaient sa résistance au bateau.

Des innovations dans la conception

Vers la fin de l'Âge du fer, grâce à une hybridation technique, la structure du bateau de Hjortspring fut simplifiée. Selon O. Crumlin-Pedersen, l'innovation vint des pirogues monoxyles évadées, un type d'embarcation qui



Musée du Bateau Viking, Roskilde



4. CETTE SECTION TRANSVERSALE d'un langskip montre l'ingéniosité de la construction. Des arbres droits, les charpentiers tiraient des courbes angulaires pour fixer les barrots. Les arbres courbés fournissaient des membrures épousant la courbure de la coque, ainsi que les pièces d'étrave et d'étambot. La quille en forme de T était taillée dans le cœur du tronc d'un chêne. En fendant des troncs encore verts suivant des lignes radiales (la technique est reprise par les archéologues, ci-dessus, à droite), les charpentiers obtenaient des bordages qui avaient tous la même section, ce qui garantissait une homogénéité de résistance et de souplesse sur toute la longueur du bateau.



Musée du bateau viking, Roskilde

5. LE PLUS LONG NAVIRE VIKING a été découvert en 1997... en bordure du Musée du bateau viking de Roskilde! Les archéologues n'ont pas eu beaucoup de chemin à faire pour l'étudier. Ici, deux membres de l'équipe travaillent sur des échafaudages suspendus au-dessus des pièces de charpente en chêne gorgées d'eau.

apparaît pour la première fois dans les tombeaux de l'Âge du fer, sur l'île danoise de Bornholm. Dans le monde entier, les fabricants de pirogues ont été gênés par l'épaisseur insuffisante des troncs d'arbres, où le creusement d'une pirogue était irréalisable. De manière indépendante, ils ont appris à creuser une gouttière dans le tronc en formant d'abord une fente sur le dessus, puis en écartant progressivement les bords par l'action de la chaleur et par l'insertion d'écarteurs de plus en plus longs. Lorsque le tronc s'ouvre, les extrémités se redressent et se courbent symétriquement, esquissant la courbure gracieuse des futurs bateaux vikings.

Un bateau découvert à Nydam, au Nord d'Hedeby, est le plus ancien exemple de croisement entre la pirogue évasée et la coque bordée à clin du bateau de Hjortspring. Construit aux environs de l'an 300 de notre ère, il comporte plusieurs innovations : les bordages, les membrures et les pièces d'extrémité étaient en chêne ; des rivets de fer remplaçaient les assemblages cousus des

débuts. L'équipage, assis de dos, propulsait le bateau au moyen de longues rames qui pivotaient contre des tolets, au sommet du bordage. Toutefois, l'innovation principale est l'utilisation de cinq larges bordages, de chaque côté, entre l'étrave et l'étambot : la structure classique du langskip viking était née.

Un changement encore plus révolutionnaire apparut aux environs de l'an 700, un siècle avant les premiers grands raids vikings : un bateau retrouvé à Kvalsund, dans l'Ouest de la Norvège, était doté d'une quille embryonnaire. La planche du fond, après avoir été rétrécie, est finalement devenue verticale, avec une section en forme de T. Un gouvernail fixé sur le côté, dérivé de la pagaie de gouverne des bateaux plus anciens, augmentait encore la stabilité du bateau et limitait la dérive en se prolongeant au-dessous de la coque. Puis les bordages s'amincirent et se multiplièrent pour atteindre le nombre de huit sur les langskips. Les robustes Scandinaves acceptaient stoïquement les fuites supplémentaires occasionnées par ces nouveaux assemblages. Une loi norvégienne considérait qu'un bateau n'était pas en état de naviguer s'il fallait l'écoper trois fois en deux jours (l'équipage avait néanmoins le droit d'assumer le risque).

La quille et le gouvernail latéral du bateau de Kvalsund annonçaient l'arrivée d'éléments qui étaient inexplicablement restés dans les coulisses jusqu'à l'aube de l'ère viking : le mât et la voile. Des gravures, sur des pierres tombales de l'île suédoise de Gotland, représentent des bateaux à voile vers l'an 700, mais les plus anciens vestiges d'un mât proviennent d'un bateau royal construit seulement vers 815 et enterré à Oseberg vers 835. À cette époque, la voile avait plus de quatre millénaires d'histoire ; les bateaux à voiles celtes croisaient dans les eaux proches de la Scandinavie depuis l'époque de Jules César. Selon l'archéologue norvégien Arne Emil Christensen, le plus grand spécialiste des premiers navires vikings et de l'introduction de la voile, la résistance à l'utilisation de celle-ci était moins technique que culturelle : pour les Vikings, les vrais hommes rament. Les anciens devaient mépriser les jeunes, qui étaient trop paresseux pour ramer comme eux et qui voulaient traverser la mer en se laissant porter par le vent. Cependant, les avantages de la voile prévalurent finalement.



Scalabrini, Roskilde



Musée du bateau viking, Roskilde

6. LES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION NAVALE VIKING étaient illustrées sur la tapisserie de Bayeux (en haut), qui date du XI^e siècle. Les archéologues ont expérimentalement cherché les opérations exactes qui étaient représentées. Des marques laissées sur les pièces de charpente d'origine montrent que l'outil essentiel était la hache à fer large plutôt que l'herminette ou la scie.

Une longue perche de bois reliait le pont à un coin inférieur de la voile. Le déplacement de cet espar orientait la voile et permettait de mieux remonter au vent. La rame avait transporté les ancêtres immédiats des Vikings jusqu'à la Russie, à l'Est, et jusqu'aux îles Britanniques, à l'Ouest, mais c'est avec la voile que les Vikings envahirent l'Ancien Monde. Son utilisation détermina la plupart des innovations ultérieures : l'approfondissement des quilles, qui limite la dérive lors des remontées au vent, l'élargissement de la coque et le surélèvement des bords, pour éviter l'entrée d'eau quand le bateau gîte.

Les navires vikings, descendants directs des pirogues du Néolithique, se trouvèrent rapidement entourés d'une famille de bateaux apparentés, qui utilisèrent différemment le potentiel évolutif du mât et de la voile. Les nouvelles conceptions proliférèrent, comme les pinsons décrits par Darwin dans les îles Galápagos, occupant toutes les «niches écologiques» disponibles. Des bateaux à voiles furent construits pour le commerce, l'exploration et la colonisation : par exemple, de lourds navires à cale profonde, les «knorrer», transportèrent les Vikings à travers l'Atlantique jusqu'au continent américain. Utilisés aussi comme sépultures, ces divers bateaux emmenaient les Vikings pour leur dernier voyage.

Les reconstitutions de drakkars

De petits bateaux de conception viking persistèrent durant des siècles comme caboteurs ou «bateaux-églises» dans des régions retirées comme les îles de l'Ouest de la Norvège ou les lacs suédois. Toutefois, après 1100, les grosses et lourdes cogues à fond plat de la ligue hanséatique s'imposèrent, au point que même les vaisseaux «amiraux» des monarques suédois en utilisèrent la conception. Les langskips vikings, conçus pour de rapides coups de main, devenaient inefficaces dans un monde de cités portuaires fortifiées, de batailles navales organisées et de rois qui exigeaient la pompe et le confort d'une cabine lorsqu'ils étaient à bord. L'ultime levée des navires de guerre vikings eut lieu en 1429 et fut défaite par sept cogues. Le dragon entra alors dans la légende.

Après le capitaine Magnus Andersen, qui reconstitua en 1893 le bateau de Gokstad, en Norvège, de nombreuses équipes ont voulu démontrer



Musée du bateau viking

7. LA QUILLE PEU PROFONDE des langskips permettait un portage rapide. Ici, on teste la traction du *Helge Ask* sur des rondins de bois (ci-dessous, à droite, la proue du navire, ornée d'une tête de dragon). Au XI^e siècle, la facilité du portage a permis au roi norvégien Magnus Barelegs de mettre à profit une lacune de la loi.

Un traité signé avec le roi d'Ecosse attribuait au roi Magnus toutes les terres dont il pouvait faire le tour en bateau. Le Norvégien navigua jusqu'à la péninsule écossaise de Kintyre et, assis au gouvernail, se fit traîner par ses hommes à travers le mince bras de terre pour réclamer la péninsule.

expérimentalement les extraordinaires qualités de navigabilité et de souplesse des bateaux de commerce et des voiliers vikings. Les langskips, eux, restaient des pièces de musée.

En 1963, des scouts danois construisirent une réplique du bateau de Ladby. Ayant observé que les bateaux de guerre illustrés sur la tapisserie de Bayeux, qui date du XI^e siècle, étaient utilisés pour le transport des chevaux, les jeunes marins voulaient vérifier si l'on pouvait embarquer des chevaux à partir d'une plage. Cette préoccupation d'embarquer les animaux aurait expliqué la conservation d'un franc-bord très bas pendant toute l'ère viking. Les essais en mer de la reconstitution furent un succès, les chevaux, les scouts et la coque se comportant tous très bien. Le bateau se révéla rapide et maniable, ce qui montra encore une fois la maîtrise et l'ingéniosité des constructeurs vikings.

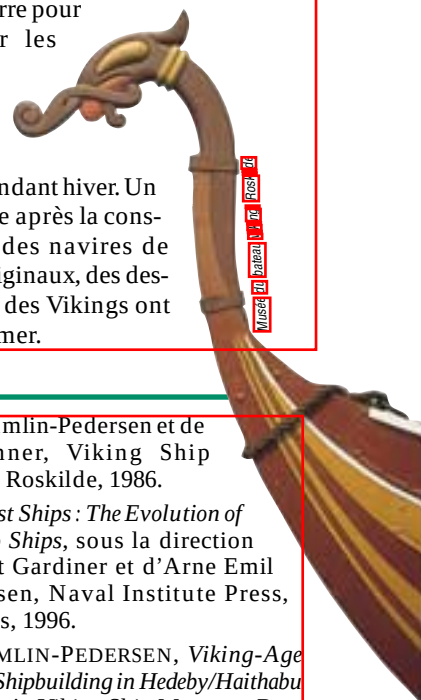
Après la fouille et le renflouement des bateaux de Skuldelev, en 1962, le Musée du bateau viking fut construit à Roskilde, pour exposer les vestiges et devenir un centre d'étude et de reconstitution. En 1991, l'équipe du musée construisit le *Helge Ask*, une réplique du plus petit (17 mètres) langskip de Skuldelev et démontra ainsi sa puissance remarquable : avec seulement la moitié de l'équipage de 24

hommes aux avirons, le bateau prit facilement de vitesse une réplique du bateau de commerce le plus court et le plus large retrouvé aussi à Skuldelev (le *Roar Ege*). Le langskip battit également à la course le navire marchand à voiles, avec une vitesse de croisière approchant les huit nœuds, soit 15 kilomètres par heure.

Ce navire remontait mieux au vent, mais l'équipage du *Helge Ask* le battit en baissant les voiles et en ramant. O. Crumlin-Pedersen a calculé que le langskip pouvait fondre sur sa proie quelles que soient les conditions, excepté par grand vent. Des sagas ont décrit ses capacités : un Viking nommé Gauti Tófa-son avait arraisonné quatre knorrers danois avec son langskip ; il en aurait pris un cinquième si une tempête ne

s'était levée, ce qui permit à sa proie de s'enfuir.

Au XX^e siècle, plus de 30 bateaux vikings ont été reconstruits. Beaucoup sont régulièrement utilisés. À Roskilde, la guilde du *Helge Ask* sort régulièrement le bateau en mer pour des essais et des croisières, le tire jusqu'à terre pour éprouver les récits de portage durant l'été, et le répare pendant hiver. Un millénaire après la construction des navires de guerre originaux, des descendants des Vikings ont repris la mer.



Musée du bateau viking

John HALE est archéologue à l'Université de Louisville, dans le Kentucky.

A.W. BRØGGER et Haakon SHETELIG, *The Viking Ships*, Twayne Publishers, New York, 1971, et C. Hurst, Londres, 1971.

John R. HALE, *Plank-Built in the Bronze Age*, in *Antiquity*, vol. 54, n° 211, pp. 118-126, 1980.

Sailing into the Past : Proceedings of the International Seminar on Replicas of Ancient and Medieval Vessels, sous la direction

d'Ole Crumlin-Pedersen et de Max Vinner, Viking Ship Museum, Roskilde, 1986.

The Earliest Ships : The Evolution of Boats into Ships, sous la direction de Robert Gardiner et d'Arne Emil Christensen, Naval Institute Press, Annapolis, 1996.

Ole CRUMLIN-PEDERSEN, *Viking-Age Ships and Shipbuilding in Hedeby/Haithabu and Schleswig*, Viking Ship Museum, Roskilde and Provincial Museum of Archaeology, Schleswig, 1997.

Des scientifiques dans l'ombre

JEFFREY RICHELSON

Quelques spécialistes des sciences de la Terre collaborent avec les services secrets américains. Ils accèdent à des informations importantes et, jusqu'à présent, confidentielles.

Durant les 50 années de la guerre froide, les États-Unis ont dépensé plusieurs milliers de milliards de francs pour concevoir, construire et utiliser un imposant réseau de renseignements qui donnait des images des zones stratégiques de la planète. Dans l'espace, des dizaines de satellites de reconnaissance envoyaient des millions d'images de la Terre ; les images en lumière visible étaient complétées par des images infrarouges qui montraient l'activité sur les sites de lancement de missiles et sur les aires de tests nucléaires. Dans le ciel, des avions de reconnaissance prenaient des photographies et des mesures météorologiques. Des réseaux immergés de sonars suivaient les mouvements des sous-marins, tandis qu'en surface des bateaux surveillaient le fond des océans.

Les millions d'images et les billions d'octets de données collectées par ce réseau mondial sont aujourd'hui archivés dans des centres de données, dans des centres informatiques, dans des bibliothèques et dans d'autres bâtiments proches de Washington. Certaines de ces informations ont encore une valeur militaire, mais l'éclatement du bloc de l'Est a réduit l'intérêt stratégique de toutes les autres.

Cette masse de données intéresse beaucoup les sciences de la Terre. Sous certaines conditions, leur exploitation scientifique ne compromettrait pas le secret qui a présidé à leur collecte et à leur utilisation. Aussi le gouvernement américain a-t-il créé un groupe

de quelques dizaines de scientifiques habilités, qui ont accès à une partie des données et des images compilées. Ce groupe, nommé Médée, est informé des avancées les plus récentes dans le domaine des détecteurs militaires ; il conseille les services de renseignements sur la façon de concevoir les nouveaux satellites et sur la manière d'exploiter les appareils existants, afin d'en tirer le meilleur parti, du double point de vue scientifique et militaire.

Cette collaboration est trop récente pour qu'on en fasse le bilan, mais sa pérennité – elle a démarré en 1992 – est déjà remarquable : jamais la communauté du renseignement n'avait collaboré si étroitement avec un groupe de scientifiques indépendants, afin que les données secrètes soient transmises à la communauté scientifique. Une telle coopération exige pourtant l'harmonisation de deux cultures opposées : en science, les progrès résultent de la publication rapide et générale des données, tandis que, dans le renseignement, règne la politique du « besoin d'en connaître », où chaque personne, habilitée à un certain niveau de secret, n'est autorisée à connaître que les informations strictement nécessaires à l'accomplissement de sa mission.

Depuis la création du groupe Médée, ses membres ont principalement cherché quelles étaient les données pertinentes pour l'étude du réchauffement global, des températures océaniques, de l'évolution de la couverture végétale et forestière, de



Steve Johnson et Lou Rancie



l'état des calottes polaires et d'autres sujets ayant trait à l'environnement. Deux articles scientifiques ont été fondés sur les données du renseignement : ils montrent que des travaux scientifiques publics peuvent s'appuyer sur des données secrètes des archives gouvernementales. De surcroît, la collaboration a incité les services de renseignements à coopérer davantage avec des experts extérieurs ; des avantages inattendus en ont découlé. Ainsi, les images des satellites de reconnaissance militaire se sont déjà révélées inestimables pour les équipes chargées des secours, lors de l'éruption volcanique de l'île de Montserrat, dans les Caraïbes, et lors de graves feux de forêt, en Alaska.

Des yeux dans le ciel

Comme les données du renseignement sont très rarement publiées, l'évaluation de ces données pour les sciences de l'environnement reste difficile. Néanmoins, au fil des ans, un certain nombre de détails ont été officiellement dévoilés, ou ont filtré, concernant les caractéristiques des satellites espions et des capteurs secrets, ainsi que leurs périodes de fonctionnement.

Au cours des 37 dernières années, plusieurs centaines de satellites de reconnaissance aérienne ont été lancés. Les plus récents de ces satellites sont de type *Keyhole-11* (*KH-11*) et *Advanced KH-11* (*AKH-11*), qui retransmettent presque instantanément leurs images via un satellite-relais (*Keyhole* signifie «trou de serrure»). Neuf satellites *KH-11* ont été mis sur orbite entre 1976 et 1988, et trois *AKH-11* ont été lancés dans les années 1990. Ces derniers, qui coûtent chacun près de dix milliards de francs, envoient des images dont la résolution au sol (la taille des plus petits détails que l'on peut distinguer) est meilleure que 15 centimètres.

Le gouvernement américain n'a pas encore publié les données des satellites de haute résolution qui ont fonctionné de 1963 à 1984 (les satellites *KH-7* et *KH-8*), du satellite de reconnaissance *KH-9* à imagerie grand angle, ou des satellites *KH-11* et *AKH-11*. Néanmoins, beaucoup d'informations ont déjà filtré dans la presse professionnelle : quelques images prises par ces satellites ont été publiées, tandis que le public découvrait des données confidentielles sur le *KH-11* lors des procès

d'anciens agents inculpés pour avoir divulgué des secrets.

Les satellites des générations *KH-1* à *KH-9* (le programme *KH-10* fut abandonné avant même qu'un seul satellite ne vole) larguaient sur le territoire américain des conteneurs remplis de films photographiques des régions névralgiques du Globe comme l'Union soviétique, la Chine, Cuba ou le Moyen-Orient. Entre 1960 et 1972, 144 satellites *KH-1* à *KH-9* ont été lancés (il y eut quelques échecs). Ils ont produit plus de 800 000 images qui ont été publiées récemment (voir *La reconnaissance aérienne*, par Dino Brugioni, *Pour La Science*, mai 1996), en partie grâce aux scientifiques de Médée. Les appareils photographiques des satellites *KH-1* avaient une résolution de 12 mètres, qui fut ramenée à environ 1,5 mètre pour les *KH-4*.

Les satellites *KH-7*, *KH-8* et *KH-9*, avec leurs caméras plus précises, ont fourni plusieurs millions d'images entre les années 1970 et le début des années 1980. Chaque image prise par l'unique *KH-9* couvrait des dizaines de milliers de kilomètres carrés, avec une résolution d'environ 30 centimètres. Les programmes *KH-8* et *KH-9* se sont achevés en 1984.

Dotés de capteurs infrarouges, les satellites *DSP* (l'acronyme de *Defense Support Program*, soit «Programme de soutien à la défense») de l'armée de l'air américaine constituent un autre groupe de satellites militaires dont on a reconnu l'utilité scientifique ; le premier de ces satellites a été lancé en 1970, et le 18^e en février 1997. Les satellites *DSP* sont géostationnaires, à 35 900 kilomètres d'altitude. Leurs principaux détecteurs sont des capteurs infrarouges, conçus pour repérer la chaleur émanant de tirs de missiles nucléaires soviétiques et chinois. Ces satellites embarquent aussi des capteurs qui détectent les signatures d'explosions nucléaires atmosphériques. Au fil des ans, les détecteurs infrarouges des satellites *DSP* ont aussi enregistré les lancements de missiles de moyenne portée (dont les *SCUD*), la signature de la post-combustion des avions, les satellites en orbite basse et même des événements terrestres tels que des grandes explosions.

Le programme *Lacrosse* a également enrichi les banques d'images. Les satellites de ce programme ne photogra-

phient pas des objets, mais émettent des ondes radio dont ils détectent les réflexions sur les objets du sol. Ces ondes réfléchies sont ensuite converties en images. Les instruments embarqués, nommés radars à ouverture synthétique, permettent de s'affranchir de l'obscurité et des nuages.

Excepté les satellites *DSP*, qui appartiennent à l'armée de l'air américaine, tous les satellites décrits ici sont commandés par l'Office américain de reconnaissance, un organisme créé le 6 septembre 1961 afin de coordonner les efforts de reconnaissance spatiale de la CIA et de l'armée de l'air américaine. Cet organisme était autrefois si secret que son nom ou son acronyme (*NRO*, pour *National Reconnaissance Office*) apparaissaient uniquement sur les documents d'un

niveau de confidentialité supérieur au «Top Secret». Le ministère américain de la Défense n'a admis publiquement l'existence du *NRO* qu'en 1992.

Des avions ont également donné de nombreuses images. Le plus connu des avions américains de reconnaissance est l'*U-2*, dont le rôle d'espion fut révélé lorsque le pilote de la CIA fut abattu au-dessus de l'Union soviétique en mai 1960. L'incident marqua la fin du survol de l'Union soviétique, mais, depuis plus de 40 ans, les *U-2* survolent et photographient des zones sensibles dans le monde entier. Aujourd'hui, ils montrent si l'Irak se conforme aux termes du cessez-le-feu de la guerre du Golfe. Un autre avion de reconnaissance de l'armée de l'air, le *SR-71*, a été en opération de la fin des années 1960

jusqu'à sa retraite temporaire en 1990. Quelques-uns demeurent en activité. Volant à plus de 26 000 mètres, à des vitesses supérieures à Mach 3 (trois fois la vitesse du son, soit près de 3 000 kilomètres par heure à cette altitude), les *SR-71* peuvent photographier plus de 260 000 kilomètres carrés en une heure de vol. Les missions des *SR-71* ont ainsi fourni des photographies couvrant des millions de kilomètres carrés.

Des oreilles sous la mer

Durant la guerre froide, alors que la CIA, le *NRO* et l'armée de l'air photographiaient les territoires ennemis et alliés, la Marine mettait en œuvre un réseau mondial de sonars pour localiser et suivre le mouvement des sous-

Quelques systèmes de renseignement et leur utilisation scientifique

	NOM	PÉRIODE D'UTILISATION	CAPTEURS/ CARACTÉRISTIQUES	APPLICATIONS MILITAIRES	APPLICATIONS SCIENTIFIQUES
SATELLITES	KH-1 - KH-6 KH-7 et KH-8	1960-1972 1963-1984	Images enregistrées sur film	Reconnaissance	Étude de l'expansion, du retrait ou de l'état des terres arables et des forêts, des déserts et d'autres écosystèmes ; surveillance de l'érosion du littoral, des incendies de forêt et de l'activité volcanique
	KH-9	1971-1984	Optiques grand angle couvrant des milliers de kilomètres		
	KH-11 KH-11 avancé	1976-1995 1992 à aujourd'hui	Images retransmises en temps réel à la Terre		
	DSP	1970 à aujourd'hui	Infrarouge	Détecte les lancements de missiles, les explosions, les incendies	Surveillance des entrées de météorites dans l'atmosphère terrestre
	Lacrosse	1988 à aujourd'hui	Images radar par tous les temps et à tout instant	Reconnaissance	Surveillance de la couverture glacée et neigeuse ; localisation et prévision du niveau des lacs, cours d'eau et nappes d'eau
AVIONS	U-2	1956 à aujourd'hui	Prend des images électro-optiques en temps réel	Reconnaissance	Étude de l'expansion, du retrait ou de l'état des terres arables et des forêts, des déserts et d'autres écosystèmes ; surveillance de l'érosion et des catastrophes naturelles
	SR-71	1964-1990	Photographiait plus de 260 000 kilomètres carrés par heure		
NAVIRES	Navires océanographiques militaires (dernière génération : la série TAGS-60)	1950 à aujourd'hui	Système multifaisceaux de relevé bathymétrique ; système sonar à faisceau large en eaux profondes ; établissement de profils sous le fond océanique	Données sur les champs magnétiques et gravimétriques marins ; bathymétrie du fond océanique et propriétés des sédiments ; profils verticaux de salinité et de température	Données de base pour de futures études marines ; calibration des algorithmes des satellites ; échantillonnage plus efficace de la salinité et des températures
RÉSEAUX DE SONARS	SOSUS	Mi-1950 à aujourd'hui	Hydrophones	Identification et suivi des sous-marins hostiles	Surveillance des températures océaniques ; suivi des populations de cétacés et de leurs déplacements

marins soviétiques. L'information était vitale : les sous-marins nucléaires lanceurs d'engins s'efforcent d'échapper aux sous-marins d'assaut, qui tenteraient immédiatement de les détruire en cas de conflit nucléaire.

Les sonars étaient groupés en ensembles nommés Réseaux fixes de surveillance acoustique (*Sound Surveillance System*, ou SOSUS). Durant la majeure partie de la guerre froide, une vingtaine de ces SOSUS furent déployés en divers endroits du fond océanique pour détecter les signaux acoustiques issus des sous-marins soviétiques. Ils surveillaient également les mouvements des navires et, même, ceux des avions volant à basse altitude.

Les travaux de mise au point des SOSUS commencèrent en 1950 ; quatre ans plus tard, le premier réseau fut installé sur la plate-forme continentale de la côte Est des États-Unis. Les réseaux ont été régulièrement perfectionnés, et la technique en est aujourd'hui à sa cinquième ou sixième évolution.

Chaque sous-marin est identifié à partir de son écho sonar et des bruits caractéristiques de son moteur, de son système de refroidissement et du mouvement de ses hélices. À partir de ces informations, des programmes informatiques déterminent une signature sonore qui permet aux experts de reconnaître non seulement le type du sous-marin (sous-marin d'attaque de la classe *Alfa*, par exemple, ou sous-marin nucléaire lanceur d'engins, de la classe *Typhoon*), mais aussi, grâce à la sensibilité du réseau, chaque sous-marin individuel.

Derrière la porte secrète

Cet ensemble de détecteurs sous-marins, aériens et spatiaux remplit correctement sa fonction stratégique, mais ses données seraient-elles utilisables par les sciences de la Terre ? Cette question fut officiellement posée en mai 1990, lorsque Al Gore se posa des questions d'environnement qui intéressaient le Tennessee, dont il était sénateur. Il écrivit à un responsable de la CIA pour savoir si l'Agence possédait des données sur les océans, les nuages, les vents tropicaux et les précipitations. Comme la CIA avait effectivement des données utiles, elle organisa une réunion avec quelques scientifiques ne faisant pas partie de la communauté du renseignement, dont



EVEN Christie

1. LE SYSTÈME AMÉRICAIN DE SURVEILLANCE SONORE (ou SOSUS) est composé de réseaux d'hydrophones déployés sur le fond de l'océan. Au début des années 1980, 66 réseaux étaient en fonctionnement (emplacements en rouge) ; après la fin de la guerre froide, leur nombre a diminué.

Jeffrey Dozier, directeur du département des sciences de l'environnement à l'Université de Santa Barbara, et Gordon MacDonald, géophysicien à l'Université de San Diego.

Puis, au printemps 1992, le directeur de la CIA accorda leurs habilitations à un groupe de scientifiques, afin que ces derniers puissent évaluer l'intérêt scientifique des données de renseignement. Onze groupes d'études touchant diverses disciplines environnementales furent créés : ils comprenaient 70 scientifiques issus de l'Université, du secteur privé et d'agences gouvernementales telles que l'Agence pour la protection de l'environnement et le ministère américain de la Mer et de l'Atmosphère (NOAA). Lors de la première réunion officielle, en octobre 1992, les scientifiques examinèrent les besoins et les sources potentielles de données environnementales.

Ces scientifiques discutèrent aussi avec des collègues non habilités pour établir une liste des problèmes cruciaux et des informations qui seraient nécessaires pour les traiter. Par exemple, le groupe d'études sur les gaz à effet de serre conclut que la répartition de l'ozone était une information qui lui manquait. Pour mieux corréler la proportion de cette molécule avec les observations climatiques, le groupe conclut que l'on devait connaître la répartition de l'ozone en fonction de l'altitude, de la saison et de la latitude, avec une précision suffisante pour détecter une variation de cinq pour cent sur dix ans.

Une fois ce besoin identifié, les services secrets – en particulier la CIA et

le NRO –, ainsi que les ministères de la Défense et de l'Énergie, préparèrent des séances d'information sur plus de 100 systèmes de collecte secrets et leurs données. Puis, à la fin de novembre 1992 et au début de 1993, les scientifiques eurent connaissance des techniques utilisées par les renseignements américains : ils apprirent l'organisation des réseaux de surveillance jusqu'au détail des noms de code – une donnée très sensible pour ce qui concerne les satellites de renseignement –, de leur localisation et du type de données qu'ils recueillaient. Ces réunions devaient aider les scientifiques à déterminer les données archivées dont ils avaient besoin, et à savoir comment les satellites, les réseaux de sonars et autres systèmes actuellement en opération pourraient recueillir de nouvelles données.

En décembre 1993, le premier rapport du comité Médée concluait que les potentialités scientifiques des archives secrètes étaient immenses. Les images archivées, tout d'abord, pouvaient préciser les modifications des zones urbanisées, des zones cultivées, des zones forestières et des déserts, afin de dépister d'éventuels changements climatiques. Le premier satellite civil américain (*Earth Resources Technology Satellite*) n'ayant pas été lancé avant 1972, les images des archives secrètes permettraient d'avoir des données continues du début des années 1960 jusqu'à aujourd'hui.

À partir des images des satellites espions, les scientifiques voulaient calibrer les systèmes civils, de résolution moindre. En comparant des images basse et haute résolution d'un

même objet, ils prévoyaient d'extraire des informations supplémentaires de leurs photographies à faible résolution. Cet étalonnage est particulièrement utile pour les études de la végétation, la détermination des espèces et la mesure du degré de couverture végétale.

Les images de haute résolution montrent également l'expansion ou le retrait des forêts, des déserts et des

zones humides. Elles permettent d'étudier les modifications des surfaces arables, l'intégrité des écosystèmes et de l'habitat animal, les dommages subis par la forêt dus à la pollution et à l'activité humaine, l'utilisation de l'eau et l'érosion du littoral, des sujets aux conséquences considérables pour la santé humaine.

Le comité signalait aussi que les satellites DSP pouvaient détecter et sur-

veiller les grands incendies dans les régions reculées ; de tels feux produisent du monoxyde de carbone et du dioxyde de carbone, qui contribuent à l'effet de serre. À l'aide des données du réseau SOSUS, on pouvait évaluer le réchauffement global : comme les sons se propagent plus vite dans l'eau tiède que dans l'eau froide, la mesure des fluctuations de la vitesse du son à travers des milliers de kilomètres d'océan révèle de faibles variations de la température. Le réseau SOSUS détecte aussi le déplacement des cétacés, tout en caractérisant leurs populations. Toutes ces propositions ont été acceptées : le ministère américain de la Défense et les services des renseignements participent aujourd'hui aux études.

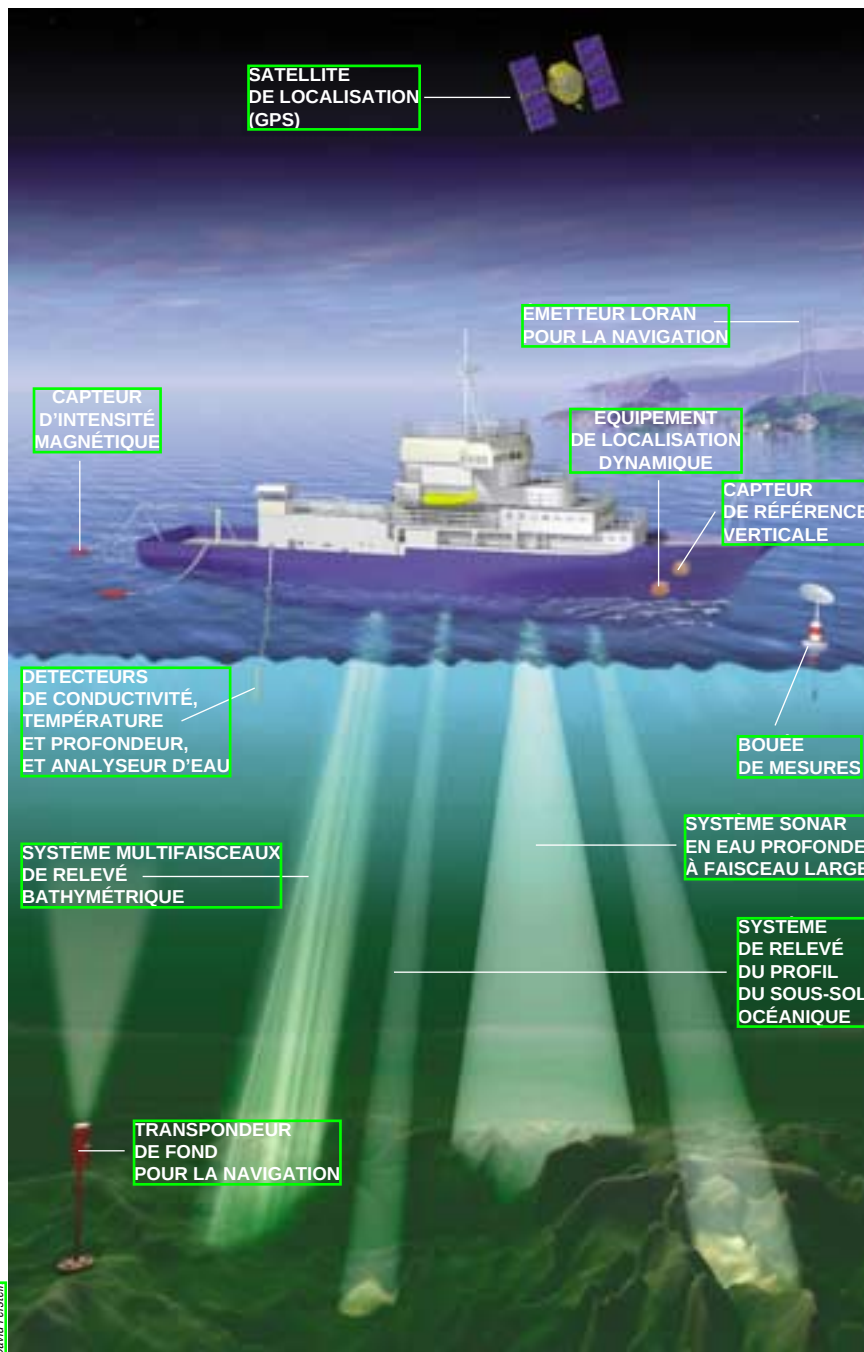
En outre, les matériels des services secrets servent à déterminer l'épaisseur de la banquise, l'étendue de la déforestation, la teneur en eau de la troposphère, la présence de déchets toxiques ou radioactifs sous le sol.

Médée devient permanent

Encouragés par le succès de la collaboration, les services des renseignements ont décidé de pérenniser le projet. En 1994, Linda Zall, de la CIA, a nommé le projet Médée, en référence à l'héroïne de la mythologie grecque qui aida Jason et les Argonautes à voler la Toison d'or. Aujourd'hui, près de 70 scientifiques ont accès à un bureau spécial, près du siège de la CIA.

Jusqu'à présent, les scientifiques du comité Médée ont produit plus d'une dizaine de rapports, évaluant comment les données archivées et l'ensemble des systèmes de collecte actuels pouvaient aider les sciences de la Terre. Ils se sont intéressés aux prévisions des éruptions volcaniques, aux méthodes d'identification des zones humides, aux vagues et à la circulation océanique, à l'évolution des glaciers. À une exception près, tous leurs rapports sont secrets.

Le seul rapport public, *Utilité scientifique des données environnementales de la Marine*, a été publié en juin 1995. Il avait été demandé par la Marine américaine, qui voulait connaître les possibilités en météorologie et en océanographie. Le rapport examinait l'utilité scientifique des bases de données pour l'étude de la banquise, de sa géologie et de sa géophysique, du



2. LE NAVIRE OcéANOGRAPHIQUE MILITAIRE TAGS-60 est le dernier d'une série de bâtiments commencée voici 40 ans. Ce navire de la Marine américaine, associé à d'autres ressources telles que les satellites du Système mondial de localisation (GPS) et le système de radionavigation à longue portée (dit Loran), est équipé de divers capteurs qui mesurent des paramètres de l'océan utiles pour les militaires. Des sonars cartographient le fond sous-marin et sondent même la région située juste en dessous.

volume de l'océan et des propriétés des interfaces avec les autres milieux. Le rapport comprenait également des recommandations pour accroître les connaissances océanographiques. Par exemple, il proposait d'établir un centre d'exploitation permettant aux scientifiques habilités d'accéder à la plupart des bases de données du commandement et il suggérait que la Marine s'efforce surtout de construire des modèles régionaux de l'océan (ces modèles simulent numériquement les conditions de la mer).

Les scientifiques du comité Médée ont également étudié comment des modifications des satellites espions amélioreraient la collecte de données environnementales. Ils ont rendu au NRO une dizaine de rapports comprenant des recommandations techniques. Ces recommandations auront vraisemblablement un impact sur les futurs satellites de renseignement.

Le comité a aussi joué un rôle important dans la conception du Programme de zones-témoins de référence, qui surveillera 500 sites d'intérêt pour les sciences de l'environnement : les nuages au large de la côte californienne, entre Los Angeles et San Diego ; la forêt tropicale humide sur les basses terres de La Selva, au Costa Rica ; la forêt expérimentale de Luquillo, à Puerto Rico ; le sol gelé en profondeur de la Fish Creek, en Alaska ; les glaciers de Griegsletchner, en Suisse ; les pentes du Kilimandjaro, en Tanzanie...

Herman Shugart, membre du comité Médée et écologiste à l'Université de Virginie, pense que, d'ici quelques décennies, les images du Kilimandjaro montreront une augmentation de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère : l'un des premiers indices naturels d'un tel accroissement sera l'épaississement de la végétation dans les zones végétales les plus hautes, telles celles des flancs du Kilimandjaro ; de cet épaississement résultera un verdissement identifiable sur les images.

Les images seront gardées dans une photothèque d'accès limité au Service géologique. Durant les 20 prochaines années, les données ne seront disponibles qu'aux personnes habilitées, mais leur mise à la disposition de l'ensemble de la communauté scientifique est prévue. Pourquoi priver si longtemps la science de données utiles ? La question est vivement débattue.



3. CE VOLCAN, l'un des plus hauts du monde, se situe dans la péninsule du Kamchatka, à l'extrême Est de la Russie. L'analyse des images de reconnaissance, telle celle-ci, qui date de 1962, renseigne sur l'historique de l'activité volcanique de la péninsule, une région sismiquement et volcaniquement active.

Science et secret

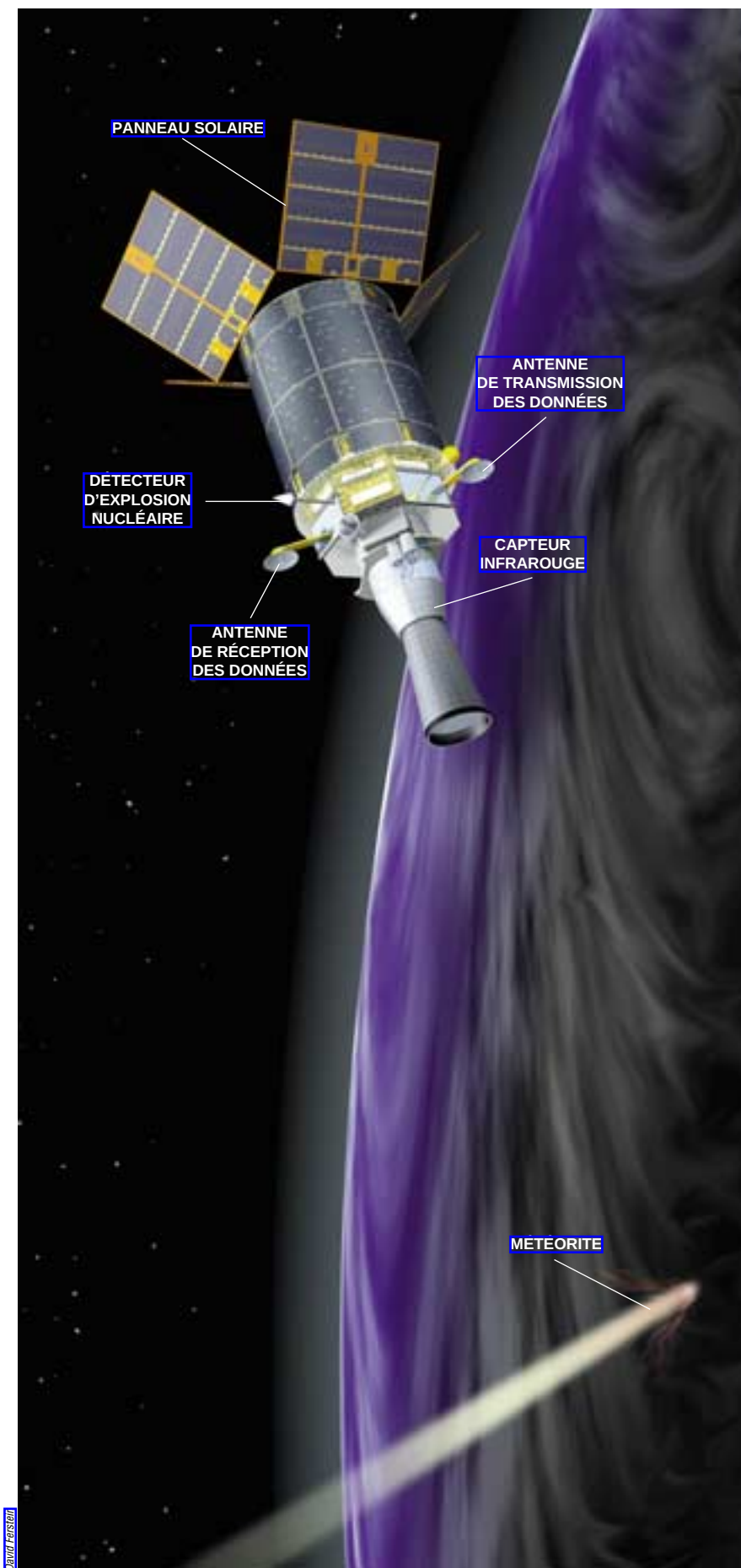
Bien que le comité Médée ait principalement étudié l'intérêt scientifique des données et des systèmes de renseignements, il a publié trois articles scientifiques sur la base de données confidentielles. Ces articles montrent la difficulté de conciliation des soucis de sécurité et des préoccupations scientifiques.

Les deux piliers essentiels de la science sont la reproductibilité – deux personnes qui font la même expérience doivent obtenir le même résultat – et la réfutabilité : des observations ou des expériences doivent confirmer les hypothèses. Les rapporteurs sollicités par les publications scientifiques se préoccupent souvent de savoir comment les données ont été recueillies et avec quelle fiabilité : quels instruments ont été utilisés ? Quelles étaient leurs performances ? Combien de mesures ont été faites et dans quelles conditions ?

Dans les études effectuées à partir de données confidentielles, la reproductibilité n'est pas assurée, car les scientifiques non habilités (c'est-à-dire la quasi-totalité de la communauté scientifique) n'ont pas accès aux informations. En outre, les rapporteurs ne sauront pas comment les données ont été recueillies. Dans certains cas, les résultats d'une recherche

seront vérifiables, même s'ils ne sont pas reproductibles, ce qui augmenterait la confiance dans les méthodes et données secrètes utilisées pour produire les résultats : par exemple, la précision d'une carte topographique du fond océanique peut être vérifiée, même si les moyens par lesquels elle a été produite ne sont pas connus. Toutefois, cette vérification n'est pas possible pour les phénomènes transitoires : certaines caractéristiques océaniques et atmosphériques auront peut-être disparu au moment où d'autres scientifiques essaieront de les observer.

Plusieurs de ces problèmes se sont posés à propos des deux premiers articles scientifiques du comité Médée. Le premier a été rédigé par William Schlesinger, de l'Université Duke, et par Nicholas Gramenopoulos, de la Société *Mitre*. Dans cet article, publié en 1996, les auteurs étudient l'extension vers le Sud du désert soudanais. Se fondant sur des photographies du Soudan occidental prises entre 1943 et 1994 par des satellites et par des avions, les auteurs analysent l'abondance des arbres en une douzaine de sites répartis le long d'un axe Nord-Sud. Ces photographies sont beaucoup plus précises que celles du Radiomètre avancé à très grande résolution embarqué sur le satellite NOAA depuis 1980. L'expansion du désert



modifierait le climat et accroîtrait la probabilité d'une famine... mais les observations des satellites espions ne décèlent pour l'instant aucune expansion du désert.

Comme beaucoup d'images sur lesquelles les auteurs se sont fondés pour formuler leurs conclusions proviennent d'archives secrètes, leur article n'a pas été accepté par la revue *Science*. W. Schlesinger indique que les rapporteurs de la revue lui ont posé des questions techniques auxquelles il ne pouvait répondre sans divulguer des informations confidentielles. *Science* n'a pas décidé de bloquer systématiquement la publication d'articles provenant des données militaires, mais sa rédactrice en chef, Monica Bradford, a précisé que les articles que les rapporteurs ne pouvaient évaluer ne seraient pas publiés.

Dans l'article finalement publié par la revue *Global Change Biology*, très peu d'informations sur les détecteurs sont données. Les auteurs écrivent seulement qu'ils ont utilisé des archives de photographies prises à distance à partir d'avions et de satellites militaires pour obtenir des mesures de la quantité de la végétation ligneuse dans la province de Darfur, au Soudan occidental.

Les éditeurs ont ajouté un avertissement : «De nombreuses données utilisées dans cet article sont issues d'archives secrètes. Aussi, les possibilités d'évaluer l'article et de permettre à d'autres scientifiques de reproduire l'analyse sont restreintes. La publication de cet article a pour objet d'illustrer l'exploitation potentielle des données classées et de stimuler la discussion sur leur rôle dans la littérature scientifique ouverte. Les limitations d'accès aux données rendent impossibles l'estimation de tous les aspects concernant la qualité, la sélection ou l'interprétation des données par le mécanisme habituel du comité d'évaluation.»

Membre du comité Médée, Thomas McCord, de l'Institut de géophysique et de planétologie d'Hawaii, a cosi-

4. UN SATELLITE MILITAIRE DSP (pour *Defense Support Program*) possède des capteurs infrarouges susceptibles de détecter l'entrée dans l'atmosphère terrestre d'une météorite de grande taille. Le 1^{er} février 1994, un tel satellite a enregistré l'arrivée d'une météorite qui explosa en libérant une énergie d'environ 630 kilotonnes. Les satellites DSP gravitent sur des orbites géostationnaires, à 35 900 kilomètres d'altitude.

gné un autre article qui utilise des données confidentielles : le texte envisage la possibilité qu'une grosse météorite s'écrase sur la Terre.

La crainte d'un tel impact météoritique avait déjà conduit l'armée de l'air à publier les données des 17 premières années du programme *DSP*, depuis 1970. Les satellites *DSP* détectent l'énergie infrarouge libérée par des explosions dont l'intensité est supérieure à celle qui est libérée lors de la destruction d'un avion. Aussi, lorsqu'une météorite assez grosse pénètre dans l'atmosphère terrestre, elle explose en émettant une signature infrarouge spécifique, détectable par les satellites *DSP*.

Ayant accès aux mesures *DSP* plus récentes et à d'autres données, T. McCord a décrit une météorite qui a pénétré dans l'atmosphère le 1^{er} février 1994, au-dessus de l'océan Pacifique, non loin de l'île de Kosrae. Selon T. McCord, la masse de cette météorite était comprise entre 500 et 9 000 tonnes.

T. McCord a publié l'analyse de l'événement le 25 février 1995 dans le *Journal of Geophysical Research* : à partir des enregistrements des *DSP* et d'autres détecteurs, il a estimé l'orbite, la masse, la fragmentation et l'énergie libérée par la météorite (entre 34 et 630 kilotonnes). L'article précisait l'endroit où la météorite a été détectée pour la première fois (à 54 kilomètres d'altitude), sa trajectoire, son angle de pénétration dans l'atmosphère, sa désintégration, et comment les auteurs ont calculé son orbite et l'énergie libérée.

En revanche, T. McCord n'a pas décrit les capteurs utilisés ni mentionné leur embarquement dans les satellites *DSP*. Il indiquait seulement que les données provenaient de capteurs sensibles aux infrarouges et à la lumière visible, embarqués dans des engins du ministère américain de la Défense.

Renseignements d'urgence

Les membres du comité Médée ont aidé la communauté du renseignement à évaluer les dégradations environnementales et les catastrophes naturelles. Ces études écologiques sont devenues importantes, en 1993, lorsqu'une directive présidentielle décréta que les problèmes d'environnement sont des facteurs importants de la politique des États-Unis.

Par ses études de la Russie et de l'Europe de l'Est, le comité Médée a aidé les services de renseignements à évaluer les effets d'une série de marées noires dans la région de Komi, en Russie, et de la mise en décharge des armes chimiques russes dans l'Arctique. Selon un membre du NRO, les spécialistes du Bureau de cartographie et d'imagerie du ministère américain de la Défense ont appris quelques méthodes astucieuses de combinaison des données recueillies à différentes longueurs d'onde, pour créer une image unique contenant plus d'informations que chacune des images initiales.

Plusieurs membres du comité ont aussi participé au Groupe de travail sur l'environnement, présidé par le vice-président Al Gore et par le Premier ministre russe Viktor Chernomyrdine. Le groupe de travail a notamment échangé des images satellites, afin d'aider au nettoyage des zones entourant les installations militaires russes.

Puis, ensemble, les services secrets américains et le comité Médée ont étudié les inondations de l'hiver 1996-1997, en Californie du Nord, les dégâts causés par les ouragans dans le Sud-Est des États-Unis et les changements de régime du volcan de Montserrat, peu avant qu'il n'entre en éruption, en 1995. Dans ce dernier cas, ils ont alerté le gouvernement de l'île, qui a évacué 4 000 personnes de la zone dangereuse.

Enfin le comité a aidé les services forestiers américains qui n'avaient pas assez d'avions pour déterminer l'étendue des incendies en Alaska, en juin 1996. La tâche était aisée pour les satellites *DSP* et de reconnaissance.

L'avenir de Médée

Doit-on intensifier le programme Médée? Le gouvernement américain craint que l'utilisation de données secrètes par des organismes civils ne perturbe la discussion démocratique de leur politique : une telle utilisation interdirait aux responsables de donner l'ensemble des informations nécessaires aux prises de décision, de sorte que les experts extérieurs n'auraient pas accès aux données sur lesquelles ces politiques sont fondées. L'utilisation de systèmes de renseignements pour la recherche environnementale pourrait aussi freiner l'utilisation de satellites com-

merciaux de résolution suffisante pour la recherche environnementale – dont les résultats seront immédiatement disponibles pour un auditoire beaucoup plus vaste. Enfin, certains ont craint que les services de renseignements ne passent trop de temps à des tâches qui ne sont pas de leur ressort, mais selon Bo Tumas, directeur du programme Renseignement et environnement à la CIA, la collecte de données pour l'environnement occupe moins de un pour cent du temps des satellites de reconnaissance.

Malgré les difficultés, le comité Médée prépare une base de données importante sur l'environnement pour les scientifiques du XXI^e siècle. Au sein de la CIA, il promeut l'élargissement de la diffusion des données. Par exemple, les scientifiques de Médée ont déjà proposé de publier toutes les images satellites en rapport avec l'environnement jusqu'à aujourd'hui, quitte à réduire la résolution des satellites actuels en fournissant des images plus grossières. Les responsables de la CIA ont rejeté cette proposition, mais, sans le programme Médée, une telle possibilité n'aurait même sans doute jamais été envisagée.

Médée est autant une expérience que le fruit du travail de ses participants. Comme pour chaque expérience, il y aura des théories, des découvertes inattendues et, espère-t-on, des progrès à mesure que la collaboration entre les scientifiques et les espions mûrira.

Jeffrey RICHELSON travaille aux Archives pour la sécurité américaine, à Washington D.C.

Atlas de géographie de l'espace, sous la direction de Fernand Verger, éditions Belin, 1997.

Robert A. MACDONALD, *Corona : Success for Space Reconnaissance : A Look into the Cold War*, in *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, n° 6, pp. 689-720, juin 1995.

Gregg EASTERBROOK, *A Moment on the Earth : The Coming Age of Environmental Optimism*, Viking, 1995.

Scientific Utility of Naval Environmental Data, Medea Program Office, McLean, Va., 1995 (tel : 703-883-5265).

Scott PACE et al., *Using Intelligence Data for Environmental Needs : Balancing National Interests*, Rand, Santa Monica, Calif., 1997.

Les nouvelles théories des cordes

MICHAEL DUFF

Les physiciens qui cherchent à décrire tous les types de forces par un même formalisme ont amalgamé la théorie des cordes à une théorie des membranes et à une théorie des trous noirs.

La science serait un édifice achevé? Toutes les découvertes importantes auraient déjà été faites? C'est douteux : les deux principaux piliers de la physique du XX^e siècle, la mécanique quantique et la théorie de la relativité générale, restent incompatibles : la relativité générale ne se plie pas aux lois quantiques, qui décrivent le comportement des particules élémentaires, tandis que les trous noirs ne sont pas décrits par la mécanique quantique. Cette difficulté est la promesse d'une révolution scientifique à venir.

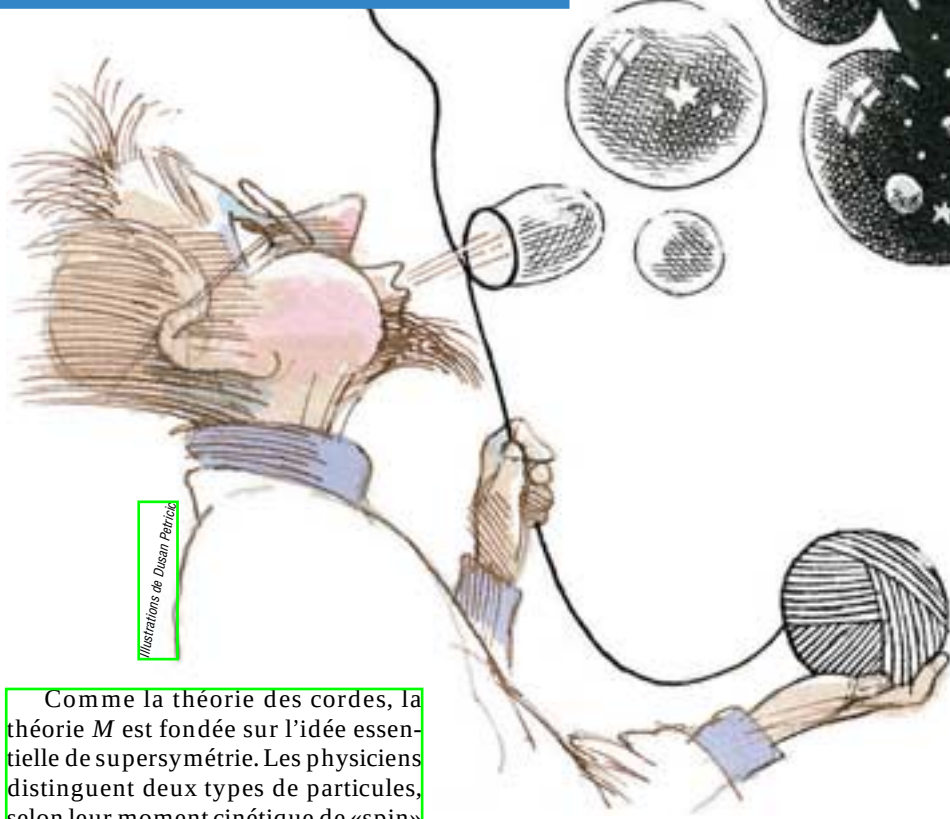
Encore récemment, on espérait que la théorie des cordes unifierait la gravitation et la mécanique quantique, et décrirait tous les phénomènes physiques à l'aide du même formalisme : les cordes sont des objets à une dimension dont on utilise les modes de vibration pour représenter les particules élémentaires. Puis, au cours des deux dernières années, la théorie des cordes a été détrônée par la théorie *M*, ou théorie des membranes, que nous examinerons plus loin. Chaque jour, cette théorie semble de plus en plus assurée : depuis l'apparition de la théorie des cordes, jamais la physique théorique ne s'est sentie aussi près du but.

Comme la théorie des cordes, la théorie *M* est fondée sur l'idée essentielle de supersymétrie. Les physiciens distinguent deux types de particules, selon leur moment cinétique de «spin» (le spin est un moment cinétique de rotation intrinsèque, comme si les particules tournaient sur elles-mêmes, à la façon de toupies). La supersymétrie stipule que, pour chaque particule connue dont le spin est un multiple entier de la constante de Planck (0, 1, 2, 3), il existe une particule de même masse ayant un spin demi-entier ($1/2$, $3/2$, $5/2$...), et vice versa.

Pourquoi les physiciens n'ont-ils découvert aucun de ces superpartenaires? Ils supposent que la symétrie existe, mais qu'elle est «brisée» : les particules postulées seraient trop massives pour être observées dans les accélérateurs actuels. Malgré l'absence de confirmations de la supersymétrie, les théoriciens ont conservé leur foi en l'hypothèse, parce qu'elle permet d'unifier les interactions faible, électromagnétique et forte à la force de gravitation.

La supersymétrie transforme les coordonnées d'espace et de temps, de sorte que les lois de la physique soient les mêmes pour tous les observateurs. Comme la théorie de la relativité générale découle de cette condition, la supersymétrie peut décrire la gravitation. La supersymétrie prédit même la «supergravité», où une particule de spin égal à 2 – le graviton – transmet les interactions gravitationnelles et possède le gravitino comme partenaire supersymétrique de spin égal à $3/2$.

Cependant la relativité générale peut être généralisée à n'importe quel nombre de dimensions d'espace-temps (notre Univers a trois dimensions d'espace et une dimension de temps) : en principe, ses équations peuvent être écrites dans un espace à plus de quatre dimensions. En revanche, la super-



Illustrations de Dusan Petricek



1. L'UNIVERS résulte-t-il de l'interaction de cordes, de bulles et de feuilletés dans des dimensions supérieures d'espace-temps ?

Witten (lauréat de la médaille Fields, en 1990) et d'autres physiciens observèrent que cette «hélécité» ne s'expliquait pas par une réduction du nombre de dimensions de onze à quatre.

Les *p*-branes

La théorie des supercordes à dix dimensions supplanta alors la supergravité. Plus précisément, cinq théories des supercordes s'opposaient : la théorie des cordes hétérotiques $E_8 \times E_8$, la théorie des cordes hétérotiques $SO(32)$, la théorie des cordes de type I $SO(32)$, les théories des cordes de type IIA et de type IIB. Une corde de type I est «ouverte», composée seulement d'un segment, tandis que les autres sont des cordes «fermées» qui forment des boucles. La théorie des cordes $E_8 \times E_8$ semblait – du moins en principe – expliquer les particules élémentaires et les interactions connues, y compris leur hélécité. Contrairement à la supergravité, les théories des cordes semblaient réconcilier la relativité et la mécanique quantique.

Après l'euphorie initiale, les partisans des théories des cordes ont toutefois déchanté. Tout d'abord, de nombreuses questions importantes semblaient insolubles par les méthodes classiques de calcul ; des techniques radicalement nouvelles étaient nécessaires. Ensuite, pourquoi cinq théories des cordes différentes ? Une seule est la bonne, mais laquelle ? Troisièmement, si la supersymétrie admet onze dimensions, pourquoi les théories de supercordes s'arrêtent-elles à dix dimensions seulement ? Enfin, pourquoi assimiler les particules ponctuelles à des cordes, et non à des surfaces ou, plus généralement, à des objets à p dimensions ?

Ainsi, alors que la plupart des théoriciens se préoccupaient de «super-spaghettis», un petit groupe préférait les «super-raviolis» et la théorie des membranes, ou théorie M . Une particule ponctuelle, de dimension nulle, laisse une trace unidimensionnelle, ou «digne d'Univers», quand elle évolue dans l'espace-temps (voir la figure 2). De même, une corde, à une dimension,

gravité limite le nombre de dimensions d'espace-temps à 11.

Au début des années 1920, le physicien polonais Theodore Kaluza et le physicien suédois Oskar Klein ont proposé que l'espace-temps ait une cinquième dimension cachée. Cette dimension supplémentaire ne serait pas infinie, contrairement aux autres ; elle se refermerait sur elle-même en un cercle où se propageraient des ondes quantiques de longueur d'onde appropriée. Selon la mécanique quantique, seules les ondes dont la longueur d'onde est un sous-multiple exact de la longueur du cercle s'y propageraient ; chacune correspondrait à une particule d'énergie particulière, de sorte que l'énergie des particules serait quantifiée.

Un observateur vivant dans les quatre autres dimensions verrait un ensemble de particules dont les charges, plutôt que les énergies, sont discontinues. Le quantum de charge, ou unité de charge, dépendrait du rayon du cercle. Voilà qui nous rapprocherait du monde que nous connaissons, où la charge électrique est quantifiée : elle est toujours un multiple de la charge e de l'électron. Pour que la théorie décrive la valeur correcte de e , on doit supposer que le cercle de la cinquième dimension est minuscule, avec un rayon de l'ordre de 10^{-33} centimètre seulement. La petite taille de la dimension invi-

sible explique pourquoi nous ne percevons pas cette dimension et pourquoi les atomes n'y sont pas sensibles. Pourtant l'électromagnétisme en découlerait, et la gravitation serait alors unifiée avec ce dernier.

En 1978, à l'École normale supérieure de Paris, Eugène Cremmer, Bernard Julia et Joël Scherk ont compris que la supergravité autorise jusqu'à sept dimensions supplémentaires et gagne en élégance dans un espace-temps à onze dimensions (dix dimensions d'espace et une dimension de temps). Le monde réel que la théorie décrit finalement dépend de la façon dont les dimensions complémentaires bouclent, telle la cinquième dimension de la théorie de Kaluza et de Klein. Comme les dimensions supplémentaires pouvaient expliquer à la fois l'électromagnétisme et les interactions nucléaires fortes et faibles, de nombreux physiciens étudièrent la supergravité à onze dimensions, dans l'espoir qu'elle serait la théorie unificatrice dont ils rêvaient.

Cependant la supergravité à onze dimensions fut abattue en 1984, quand on lui découvrit une grave insuffisance. Dans le monde réel, la gauche et la droite ont une importance : les lois qui décrivent l'interaction nucléaire faible se modifient quand on les examine dans un miroir ; les neutrinos, par exemple, ont toujours un spin gauche. Or Edward

décrit une «surface d'Univers», à deux dimensions ; et une «membrane», à deux dimensions, balaie un «volume d'Univers» à trois dimensions. Plus généralement, une p -brane, à p dimensions, décrit un hypervolume d'univers à $p + 1$ dimensions (comme une p -brane doit pouvoir se déplacer dans l'espace-temps, $p + 1$ doit être inférieur ou égal au nombre de dimensions d'espace-temps).

Dès 1962, le physicien Paul Dirac, l'un des fondateurs de la mécanique quantique, avait imaginé un modèle théorique fondé sur l'idée des membranes. Il avait supposé que l'électron n'était pas ponctuel, mais en forme de bulle, avec une membrane refermée sur elle-même ; les oscillations de la bulle auraient engendré des particules comme le muon, une version plus lourde de l'électron. L'idée théorique échoua, mais les équations utilisées aujourd'hui diffèrent peu de celles de Dirac. Elles décrivent que les membranes peuvent prendre la forme de bulles ou s'étendre dans deux directions, comme des feuilles de caoutchouc.

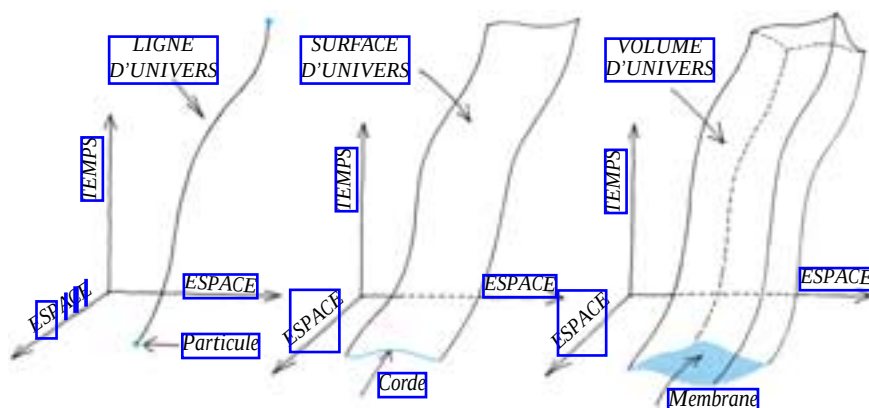
L'hypothèse de la supersymétrie limite les dimensions possibles d'une p -brane. Dans l'espace-temps à onze dimensions flotte une membrane, découverte mathématiquement par Eric Bergshoeff, de l'Université de Groningen, par Ergin Sezgin, de l'Université du Texas, et par Paul Townsend, de l'Université de Cambridge. Cette membrane a deux dimensions spatiales, et elle ressemble à une feuille. Paul Howe, du Collège royal de Londres, Takeo Inami, de l'Université de Kyoto, Kellogg Stelle, du Collège impérial de Londres, et moi avons montré que, si l'une des onze dimensions est un cercle, on peut enrouler une fois la membrane autour de cette dimension et recoller les bords opposés pour former un tube. Si le rayon du cercle est suffisamment petit, la membrane ainsi enroulée ressemble à une corde à dix dimensions ; plus précisément, c'est une supercorde de type IIA.

L'étude des membranes est d'abord restée marginale, mais des progrès réalisés dans un domaine apparemment sans relation avec celui qui nous inté-

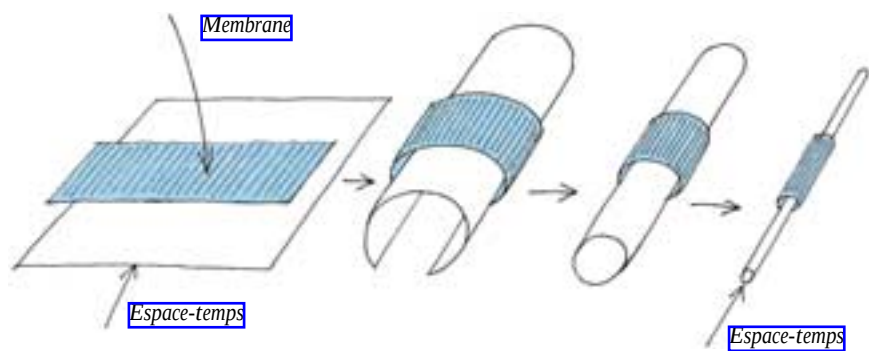
ressait ont changé l'état de la recherche. En 1917, la mathématicienne allemande Amalie Emmy Noether avait montré que la masse, la charge et d'autres caractéristiques des particules élémentaires sont généralement conservées en raison de l'existence de symétries. Par exemple, la conservation de l'énergie résulte de l'hypothèse d'une invariance des lois de la physique dans le temps, ce que l'on nomme une symétrie par rapport au temps ; de même, la conservation de la charge électrique découle de la symétrie de la fonction d'onde d'une particule (la fonction d'onde d'une particule est une fonction dont le carré correspond à la probabilité de présence de la particule en un point de l'espace ; cette fonction est une solution de l'équation de Schrödinger).

Néanmoins, certains attributs sont conservés en raison de déformations des champs. Les lois de conservation de ces attributs sont dites topologiques, parce que la topologie est cette branche des mathématiques qui s'intéresse aux caractéristiques des objets qui sont préservées quand les objets sont déformés : du point de vue topologique, une sphère percée d'un trou est analogue à un carré, parce que, si la sphère trouée est déformable, on peut pousser les bords du trou et l'aplatir. En revanche, les nœuds d'un ensemble de lignes de champ nommé soliton ne peuvent être dénoués lors de leurs déformations (le mascaret, cette vague qui remonte les fleuves, est un soliton) : c'est pour cette raison que les solitons ne se dissipent pas et qu'ils se comportent comme des particules. Les monopôles magnétiques, analogues à des pôles isolés de barreaux aimantés, seraient ainsi des solitons, parce qu'ils seraient associés à des configurations enchevêtrées dans certaines théories des champs (les physiciens ne les ont pas encore observés).

La physique considérait ainsi que les électrons et les quarks (qui portent les charges dites de Noether) étaient des particules fondamentales, et que les monopôles magnétiques (qui portent une charge topologique) étaient des particules dérivées. Néanmoins, en 1977, Claus Montonen, de l'Institut de physique d'Helsinki, et David Olive, de l'Université de Swansea, ont proposé l'idée inverse : existerait-il une formulation de la physique où les rôles des charges de Noether (comme la charge électrique) et des charges topologiques (comme la charge magnétique)



2. LA TRAJECTOIRE d'une particule dans l'espace-temps est une courbe nommée ligne d'univers. De même, une corde et une membrane décrivent respectivement une surface d'univers ou un volume d'univers.



3. UNE CORDE apparaît quand une membrane et une dimension de l'espace-temps deviennent simultanément plus compactes. Quand l'espace, représenté ici par une surface à deux dimensions, s'enroule en un cylindre, la membrane s'enroule autour de lui. Quand le diamètre du cylindre rétrécit, l'espace bidimensionnel finit par ressembler à une ligne, à une dimension. La membrane ressemble alors à une corde.

seraient échangés? Existe-t-il une description «duale», où les monopôles magnétiques représenteraient les objets élémentaires, tandis que les particules familières – quarks, électrons, etc. – apparaîtraient comme des solitons?

Une particule fondamentale de charge e , par exemple, serait équivalente à un soliton de charge $1/e$. Comme la charge d'une particule mesure l'intensité de ses interactions, un monopôle interagirait faiblement quand la particule originelle interagit fortement (c'est-à-dire quand la charge est grande), et vice versa.

La démonstration de cette conjecture faciliterait considérablement le travail des physiciens théoriciens. Dans la théorie des quarks, par exemple, les physiciens ne peuvent calculer les situations où les quarks interagissent fortement. En revanche, les monopôles interagiraient alors très peu, de sorte qu'on pourrait calculer les interactions de monopôles, avant d'en déduire, dans l'espace dual, les résultats sur les quarks. Malheureusement, on manquait de méthodes pour démontrer la conjecture.

Alors que les physiciens se décourageaient, on découvrit que les p -branes sont également analogues à des solitons. En 1990, Andrew Strominger, de l'Institut de physique théorique de Santa Barbara, a trouvé qu'une corde à dix dimensions correspond à une 5-brane qui se comporte comme un soliton. Reprenant une de mes conjectures, A. Strominger a proposé qu'une corde interagissant beaucoup soit l'équivalent dual de 5-branes qui interagiraient peu.

Cette idée était intéressante, mais manquait de fondement : d'une part, la dualité entre électricité et magnétisme à quatre dimensions restait hypothétique, de sorte que la dualité entre cordes et 5-branes à dix dimensions était encore plus douteuse. Ensuite, comme on ignorait comment trouver les propriétés quantiques des 5-branes, on voyait mal comment prouver la nouvelle dualité.

Le premier obstacle fut levé lorsque Ashoke Sen, de l'Institut de recherches fondamentales Tata, à Bombay, établit que les théories supersymétriques prévoient l'existence de solitons qui portent à la fois une charge électrique et une charge magnétique, comme ceux que conjecturaient C. Montonen et D. Olive. Ce résultat convertit de nombreux sceptiques et suscita une avalanche d'articles scientifiques. Notamment, il poussa

4. LA DIMENSION SUPPLEMENTAIRE refermée en un tube permet d'apercevoir la construction de l'espace-temps.



Nathan Seiberg, de l'Université Rutgers, et E. Witten à rechercher la dualité dans des versions plus réalistes (quoique toujours supersymétriques) des théories des quarks. Les deux physiciens ont obtenu, à propos des champs quantiques, des résultats inespérés.

La dualité des dualités

En 1990, plusieurs théoriciens ont généralisé l'idée de la dualité de C. Montonen et D. Olive aux supercordes à quatre dimensions, domaine où l'idée devient encore plus naturelle. Cette dualité, qui demeurait spéculative, est la dualité S .

Entre-temps, les théoriciens des cordes s'étaient habitués à un tout autre genre de dualité : la dualité T , qui relie deux types de particules qui émergent lorsqu'une corde forme une boucle autour d'une dimension compacte. Les particules d'un premier type (les particules «vibrantes») sont analogues à celles qui avaient été prédites par T. Kaluza et O. Klein : elles résultent des vibrations de la corde refermée sur elle-même (voir l'encadré de la page 70), et elles sont plus énergiques si le cercle est petit. En outre, la corde peut s'enrouler plusieurs fois autour du cercle, comme un élastique autour d'un poignet ; son énergie croît à mesure qu'elle s'enroule et que le cercle s'agrandit. Chaque niveau d'énergie représente une nouvelle particule (il correspond à une particule d'«enroulement»).

La dualité T stipule que les particules d'«enroulement» pour un cercle de rayon R sont identiques aux particules «vibrantes» pour un cercle de rayon $1/R$, et vice versa. Pour un physicien, les deux ensembles de particules sont indiscernables : une dimension compacte, épaisse, donne apparem-

ment les mêmes particules qu'une dimension mince.

L'identification de cette dualité est importante. Pendant des décennies, les physiciens ont cherché à comprendre la nature aux échelles extrêmement petites, près de la longueur de Planck, égale à 10^{-33} centimètre. Ils ont toujours supposé que les lois de la nature, telles que nous les connaissons, ne s'appliquent pas aux distances inférieures. Cependant, selon la dualité T , l'Univers apparaît le même à ces échelles et aux grandes distances. On peut même imaginer que, si l'Univers rétrécissait jusqu'à ce que son rayon soit inférieur à la longueur de Planck, il se transformerait en un univers dual qui enflerait progressivement.

La dualité entre cordes et 5-branes demeurait cependant conjecturale en raison des problèmes de quantification des 5-branes. Dès 1991, à l'Université du Texas, Jianxin Lu, Ruben Minasian, Ramzi Khuri et moi-même avons résolu le problème en l'évitant. Nous avons démontré que, si quatre des dix dimensions sont refermées en boucles et si la 5-brane s'enroule autour d'elles, cette dernière devient un objet unidimensionnel, une corde (de type soliton) dans un espace-temps à six dimensions. De surcroît, une corde fondamentale à dix dimensions reste fondamentale même à six dimensions. Ainsi le concept de dualité entre cordes et 5-branes a abouti à une autre conjecture : la dualité entre une corde de type soliton et une corde fondamentale.

Comme on sait quantifier les cordes, on peut tester les prévisions de cette dernière dualité. On peut démontrer, par exemple, que l'intensité des interactions de cordes de type soliton est inversement proportionnelle à l'intensité d'interaction des

cordes fondamentales, comme le prévoyait la conjecture.

Puis, en 1994, à Cambridge, Christopher Hull et P. Townsend proposèrent qu'une corde hétérotique qui interagirait faiblement soit la duale d'une corde de type IIA qui interagirait fortement, si elles ont toutes deux six dimensions : les différences entre les trop nombreuses théories des cordes s'estompent.

D'autre part, j'ai compris que la dualité corde-corde a une autre retombée inattendue : si nous réduisons l'espace-temps de six dimensions à quatre dimensions, en admettant que deux dimensions sont des boucles, la corde fondamentale et la corde de type soliton ont chacune un homologue par une dualité T . Or la duale T d'une corde de type soliton n'est rien d'autre que la duale S de la corde fondamentale, et *vice versa* ! Ce phénomène – où l'échange de charge dans une représentation est une inversion de longueurs dans la

représentation duale – est nommé dualité des dualités. La dualité S , jusqu'à spéculative, se retrouve sur un pied aussi ferme que la dualité T , bien établie. En outre, elle prédit que l'intensité d'interaction des objets – leur charge – dépend de la taille des dimensions invisibles. Ce qui est une charge dans un univers peut être une longueur dans un autre.

Au cours d'un exposé mémorable, à l'Université de Californie du Sud, en 1995, E. Witten a synthétisé tous les travaux sur la dualité T , la dualité S et la dualité corde-corde sous la bannière de la théorie M à onze dimensions. Au cours des mois suivants, des centaines d'articles ont été échangés sur le réseau Internet, confirmant que les membranes jouent certainement un rôle important dans la théorie M .

Même la théorie des cordes $E_8 \times E_8$, dont l'hélicité paraissait impossible à déduire en onze dimensions, trouve une origine dans la théorie M . À Prin-

ceton, E. Witten et Petr Horava ont montré comment compacter la dimension supplémentaire de la théorie M en un segment de droite. La théorie prévoit alors l'existence simultanée de deux univers à dix dimensions (chacun à une extrémité du segment) reliés par un espace-temps à onze dimensions. Les particules – et les cordes – n'existent que dans les univers des extrémités, qui ne communiquent que par l'intermédiaire de la gravitation (on peut imaginer que toute la matière visible de notre Univers se trouve sur un mur, alors que la « matière sombre », supposée rendre compte de la masse invisible de l'Univers, se trouve dans un univers parallèle sur l'autre mur).

Comment tester expérimentalement la théorie M ? Les physiciens savent que l'intensité intrinsèque des diverses interactions dépend de l'énergie des particules qui transmettent ces interactions. Dans les théories supersymétriques, on trouve que les intensités des

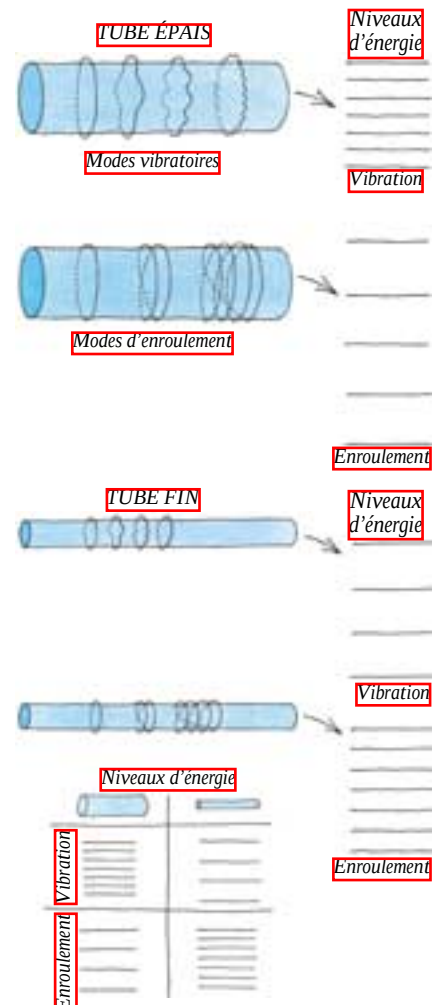
Dualité dans l'espace-temps

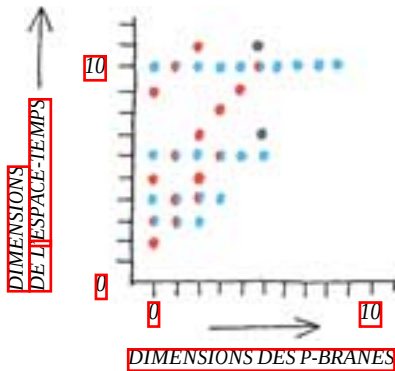
La dualité T relie la physique des grands espaces-temps à celle des petits espaces-temps. Imaginons un espace-temps enroulé sur lui-même comme un cylindre. L'énergie d'une corde enroulée autour du cylindre varie de deux façons. Tout d'abord, elle varie quand la corde ondule : ce sont les « modes vibratoires ». Quand le diamètre est notable, les longueurs d'ondes des ondulations sont grandes, et les énergies sont faibles : les énergies correspondant aux différents nombres d'onde autour du cylindre sont séparées par de petites quantités ; les niveaux d'énergie sont peu espacés.

La corde peut aussi s'enrouler autour du cylindre comme un élastique tendu. Si le cylindre est gros, la tension importante de la corde correspond à une énergie élevée. Les énergies des états correspondant à des nombres différents de boucles – ou modes « d'enroulement » – sont espacées.

Examinons maintenant les niveaux d'énergie dans l'hypothèse d'un cylindre fin. Les ondes qui l'enveloppent sont de courte longueur d'onde, et leur énergie est élevée : les états « vibratoires » sont largement espacés. Inversement les boucles correspondent à des états de faible énergie, et les modes « d'enroulement » sont peu espacés.

Un observateur extérieur ne perçoit pas les origines physiques différentes des états de vibration et d'enroulement. Les tubes fins et les tubes épais conduisent aux mêmes niveaux d'énergie, que les physiciens interprètent comme les particules. Donc, les plus petites échelles de l'espace-temps peuvent donner exactement la même physique que les grandes échelles de notre Univers.





5. LES MEMBRANES que l'espace-temps peut accueillir dépendent de la dimension de cet espace-temps. Les 0-branes, à zéro dimension, sont des particules ponctuelles ; les 1-branes, à une dimension, sont des cordes, et les membranes, ou 2-branes, à deux dimensions, sont des feuilles ou des bulles. Certaines *p*-branes, à *p* dimensions, sont dépourvues de spin (en rouge), mais les *p*-branes de Dirichlet ont un spin égal à 1 (en bleu).

interactions forte, faible et électromagnétique convergent, à une énergie E égale à 10^{16} gigaélectronvolts. En outre, ces intensités diffèrent alors peu du nombre sans dimension GE^2 , où G est la constante de gravitation. Cette quasi-égalité, qui n'est certainement pas fortuite, appelle une explication que les physiciens ont longtemps cherchée.

Dans l'espace-temps envisagé par P. Horava et par E. Witten, on peut choisir la taille de la onzième dimension de sorte que les quatre forces se rencontrent à cette énergie commune. Elle est bien inférieure à l'énergie de Planck de 10^{19} gigaélectronvolts, à laquelle on pensait précédemment que la gravité devenait forte (une énergie élevée correspond à une courte portée). Ainsi les effets de gravitation quantique apparaîtraient à des énergies inférieures à celles que les théoriciens prévoient ; cette découverte imposerait des modifications des théories cosmologiques.

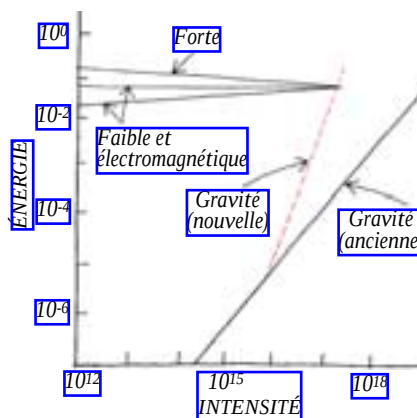
Récemment, à l'Institut de physique théorique de Santa Barbara, Joseph Polchinski a montré que certaines *p*-branes ressemblent à une surface découverte au XX^e siècle par le mathématicien allemand Peter Gustav Lejeune-Dirichlet. Dans certaines circonstances, ces *p*-branes peuvent être interprétées comme des trous noirs ou, plutôt, comme des membranes noires, des objets hors desquels rien ne sort, pas même la lumière.

Les cordes ouvertes, par exemple, seraient comme des cordes fermées dont certaines parties sont cachées par des membranes noires. Les progrès récents ont conduit à supposer que les trous

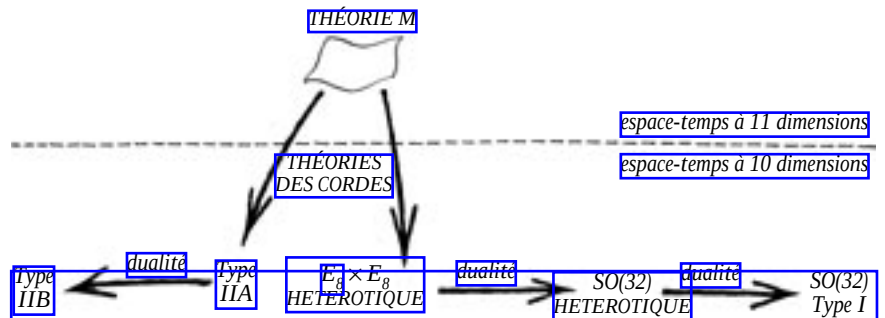
noirs sont des membranes noires qui se coupent, enveloppant sept dimensions compactifiées : les cosmologistes espèrent que la théorie *M* éclaircira les paradoxes des trous noirs soulevés par Stephen Hawking, de Cambridge.

En 1974, ce dernier avait calculé que les trous noirs ne sont pas totalement noirs : ils rayonneraient de l'énergie. Dans cette hypothèse, les trous noirs posséderaient une entropie non nulle (l'entropie mesure le désordre ; elle se définit à partir du nombre d'états quantiques disponibles). Pourtant l'origine microscopique de ces états quantiques restait un mystère. Grâce aux membranes de Dirichlet, A. Strominger et Cumrun Vafa, de Harvard, ont compté le nombre d'états quantiques dans les membranes noires : ils déterminent une entropie en très bon accord avec les prédictions de S. Hawking, corroborant la théorie *M*.

Les membranes noires seront-elles la clé d'un des plus grands problèmes de la théorie des cordes ? Comme il semble exister des milliards de façons de réduire le nombre de dimensions de dix à quatre, les comportements possibles du monde réel prévus par la théorie sont en nombre excessif, et ils ne peuvent pas être testés. Cependant la masse d'une membrane noire peut s'annuler quand le trou qu'elle enveloppe se contracte. Cette propriété modifie l'espace-temps, permettant à un espace-temps qui contient un certain nombre de trous internes (ressemblant à un morceau de gruyère) de



6. LES INTERACTIONS électromagnétiques, faibles et fortes convergent vers la même intensité quand l'énergie des particules qu'elles lient atteint 10^{16} gigaélectronvolts. Les physiciens pensaient naguère que la gravitation ne passait pas par le point de convergence, mais des calculs qui tiennent compte de la onzième dimension de la théorie *M* suggèrent que la gravité converge vers le même point.



7. LA THÉORIE M, qui décrit un espace-temps à onze dimensions, engendre cinq théories des cordes à dix dimensions. Quand les dimensions excédentaires se referment en cercle, la théorie M engendre les supercordes de type IIA, qui sont reliées aux cordes de type IIB par une opération nommée dualité. Cependant, si les dimensions excédentaires se contractent en un segment, la théorie M devient la théorie des cordes hétérotiques $E_8 \times E_8$, physiquement plausible. Cette dernière est reliée aux théories des cordes $SO(32)$ par des dualités.

se transformer en un autre avec un nombre différent de trous, violant les lois de la topologie classique.

Si tous les espaces-temps sont ainsi reliés, la recherche de l'espace-temps où nous vivons devient un problème abordable. Les cordes peuvent se placer dans l'espace-temps d'énergie minimale, par exemple. Leurs ondulations engendreraient alors les particules élémentaires et les interactions que nous connaissons, c'est-à-dire le monde réel.

De onze à dix

Malgré ces succès, les physiciens n'ont encore que des fragments de la théorie M. Récemment Thomas Banks et Stephen Shenker, de l'Université Rutgers, Willy Fischler, de l'Université du Texas, et Leonard Susskind, de l'Université de Stanford, ont proposé une définition rigoureuse de la théorie M. Leur théorie «matricielle» est fondée sur un nombre infini de 0-branes (c'est-à-dire de particules). Les coordonnées, ou positions, de ces particules, au lieu d'être des nombres ordinaires, sont des matrices (des tableaux de nombres) qui ne commutent pas : le produit XY de deux matrices X et Y n'est pas égal au produit YX . Dans cette représentation, l'espace-temps est un concept flou où les

coordonnées ne sont plus des nombres usuels, mais des matrices.

Les physiciens soupçonnent depuis longtemps que l'unification de la relativité (la géométrie de l'espace-temps) et de la physique quantique conduira à un espace-temps mal défini, au moins jusqu'à ce qu'une nouvelle définition soit découverte. L'approche matricielle a beaucoup intéressé les théoriciens, mais elle ne semble pas parfaitement adaptée. Au cours des prochaines années, nous espérons découvrir ce qu'est réellement la théorie M.

E. Witten s'amuse parfois à imaginer comment la physique se développerait sur une autre planète, où l'on aurait découvert la relativité générale, la mécanique quantique et la supersymétrie dans un ordre différent de celui que nous avons connu. De même, on peut imaginer comment, sur une planète plus logique que la nôtre, onze dimensions d'espace-temps ont constitué le point de départ pour l'élaboration d'une théorie des cordes à dix dimensions. Les historiens de demain auront peut-être le sentiment que les physiciens du XX^e siècle ont été comme des enfants sur une plage : ils ont joué avec les fragments de supercordes les plus lisses ou les plus beaux, tandis que l'immense océan de la théorie M s'étendait, inexploré, à leurs pieds.

Michael DUFF est professeur de physique à l'Université du Texas.

Michael DUFF et Christine SUTTON, *The Membrane at the End of the Universe*, in *New Scientist*, vol. 118, n° 1619, pp. 67-71, 30 juin 1988.

Paul TOWNSEND, *Unity from Duality*, in *Physics World*, vol. 8, n° 9, pp. 1-6, septembre 1995.

Madhusree MUKERJEE, *Explaining Everything*, in *Scientific American*, vol. 274, n° 1, pp. 72-74, janvier 1996.

Edward WITTEN, *Reflections on the Fate of Spacetime*, in *Physics Today*, vol. 49, n° 4, pp. 24-30, avril 1996.

Edward WITTEN, *Duality, Spacetime and Quantum Mechanics*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 5, pp. 28-33, mai 1997.

Le sang artificiel

MARY NUCCI • ABRAHAM ABUCHOWSKI

La menace d'une pénurie de sang et les craintes de contamination ont relancé les recherches de substituts du sang. Plusieurs produits sont prometteurs.

Au milieu des années 1980, le public s'effraya quand les médecins découvrirent que le virus de l'immunodéficience humaine (VIH), responsable du SIDA, avait été transmis lors des transfusions ; avant que les services sanitaires n'aient instauré des dépistages systématiques et trouvé des méthodes de décontamination, de nombreuses personnes transfusées avaient été infectées. Les craintes n'ont pas disparu : alors que le risque de contamination par le VIH au cours d'une transfusion est aujourd'hui de seulement un sur 600 000, le public redoute encore la transfusion.

D'autre part, les banques de sang ont des difficultés croissantes d'approvisionnement. Dans le monde industrialisé, une transfusion a lieu toutes les secondes environ, et cette fréquence augmente, parce que la population vieillit : au total, les besoins mondiaux en sang semblent croître chaque année de 7,5 millions de litres. Or le nombre des donneurs de sang diminue : en France, entre deux et huit pour cent de la population donne son sang.

Pour pallier les insuffisances, les biochimistes cherchent des substituts du sang. Depuis les années 1950 et, surtout, depuis les années 1980, ils ont exploré des solutions variées et obtenu des résultats importants : bien qu'aucune solution ne soit parfaitement satisfaisante, plusieurs produits sont testés ou déjà commercialisés.

Les chaînes de la vie

La mise au point de sang artificiel est difficile, parce que le sang est composé de cellules variées, dispersées dans le plasma, solution de divers sels et molécules (par exemple, des protéines et des vitamines). Les cellules sont de trois types : les globules rouges (ou héma-

ties), les globules blancs (ou leucocytes) et les plaquettes constituent environ 45 pour cent du volume du sang ; un millimètre cube de sang humain contient entre 4 et 6,2 millions de globules rouges, entre 4 000 et 10 000 globules blancs, et entre 150 000 et 450 000 plaquettes.

Ces cellules et les diverses molécules dissoutes ont une myriade de fonctions : le sang apporte des substances nutritives ou des hormones aux cellules ; il évacue leurs déchets ; il défend l'organisme contre les infections ; sa coagulation referme les blessures. Surtout, il convoie l'oxygène capté lors de la respiration et le dioxyde de carbone rejeté par le métabolisme. L'hémoglobine est la protéine qui fixe l'oxygène et le dioxyde de carbone ; chaque globule rouge en contient 250 millions de molécules.

L'hémoglobine assure cette fonction de fixation de l'oxygène et du dioxyde de carbone chez presque tous les vertébrés. La molécule diffère légèrement selon les espèces, mais elle est toujours composée de quatre chaînes. Chez l'homme, elle est composée de deux chaînes alpha identiques et de deux chaînes bêta identiques, longues chacune de 140 acides aminés environ. Chaque chaîne alpha est fortement associée à une chaîne bêta, et les deux « dimères » formés sont associés par une liaison faible.

Chacune des quatre chaînes contient un groupe chimique nommé groupe hème, au centre duquel se trouve un atome de fer. L'oxygène se lie à ces atomes de fer : chaque molécule d'hémoglobine fixe ainsi jusqu'à

quatre molécules d'oxygène. Plus la molécule d'hémoglobine a fixé de molécules d'oxygène, plus elle en fixe facilement d'autres, dans la limite des quatre molécules : la fixation d'une molécule d'oxygène déforme l'hémoglobine et facilite l'accès à de nouvelles molécules d'oxygène. Puis, lorsque l'hémoglobine libère l'oxygène dans les diverses parties de l'organisme, les globules rouges captent du dioxyde de carbone et le conduisent jusqu'aux poumons, où il est libéré.

L'hémoglobine fixe également d'autres gaz : la protéine transporte notamment le monoxyde d'azote, qui participe au maintien de la pression sanguine et à bien d'autres fonctions physiologiques (voir *Les fonctions biologiques du monoxyde d'azote*, S. Snyder et D. Bredt, *Pour la Science*, juillet 1992).

Compatibilités vitales

Les hémorragies menacent l'organisme. Quand un individu perd moins de 30 à 40 pour cent de son sang, l'organisme compense les pertes en accélérant la production de globules rouges, en raréfiant le sang dans les organes qui ne sont pas vitaux et en récupérant du liquide dans l'organisme afin de rétablir un volume de sang suffisant. Toutefois le décès survient quand les pertes de sang sont excessives.

Comment l'éviter ? Pendant longtemps, les médecins ont cherché soit à redonner du sang à ceux qui en avaient trop perdu, soit à remplacer le sang perdu par des liquides variés : bière, urine, opium, résines de plantes,

1. UNE TRANSFUSION s'impose dès qu'une personne a perdu plus de 40 pour cent de son sang environ. En France, une transfusion est effectuée toutes les dix secondes environ, et 3,15 millions d'unités de sang sont consommées chaque année (une unité correspond environ à 500 millilitres). Comme la population vieillit, les besoins augmentent ; vers 2030, les pays industrialisés auront besoin de quatre millions d'unités de plus qu'aujourd'hui.



ANTICOAGULANT
CPD WHOLE BLOOD (HUMAN)
Contains 450 ml human blood plus 63 ml Anticoagulant
Solution, USP

4525

KELL
NEGATIVE

hr (c)
positive

lait et sang de mouton... En 1667, Jean-Baptiste Denis, médecin de Louis XIV, réussit la première transfusion sanguine d'homme à homme officiellement reconnue, mais sa tentative n'eut pas de suite : après la mort d'un patient transfusé, Denis fut poursuivi en justice par la femme de cet homme... alors qu'on découvrit ultérieurement qu'elle avait empoisonné son mari à l'arsenic ! À la suite de cette triste affaire, la transfusion fut interdite en France, et aussi à Rome et en Angleterre. Il est vrai que la pratique causait autant de décès qu'elle prolongeait de vies.

La médecine ne s'intéressa véritablement à la transfusion qu'au début des années 1900, lorsque Karl Landsteiner découvrit l'existence des groupes sanguins et augmenta consi-

dérablement le taux de réussite des transfusions. Il observa que les globules rouges peuvent porter deux sucres – qu'il nomma A et B – à leur surface. La présence de ces sucres varie selon les individus. Les médecins ont aujourd'hui compris qu'il existe quatre combinaisons de ces sucres, et donc quatre groupes sanguins différents. Au cours d'une transfusion, les anticorps du receveur attaquent les globules rouges du donneur si ces cellules portent des sucres qui sont reconnus comme étrangers ; la réaction immunitaire provoque la formation de minuscules caillots, une hémolyse (l'hémoglobine s'échappe des globules rouges), puis la mort.

Les transfusions modernes tiennent compte des incompatibilités. On donne du sang de type A aux per-

sonnes dont le sang est de type A ou AB ; du sang de type B aux personnes de type B ou AB ; et du sang AB aux personnes de type AB ; le sang de type O, dépourvu d'antigènes A et B, peut être donné à n'importe qui. Les personnes dont le type sanguin est O sont donc des donneurs universels, mais ils ne peuvent recevoir qu'un sang de type O. À l'inverse, les individus qui ont du sang de type AB sont des receveurs universels : ils acceptent du sang de type A, B, AB ou O.

Les transfusions tiennent également compte des groupes Rhésus. Dans les années 1940, des chercheurs qui étudiaient des singes Rhésus découvrirent que le sang de certaines personnes contient, en plus des sucres qui définissent le type A, B, AB ou O, un anti-

LA COMPOSITION DU SANG

CONSTITUANTS		FONCTION PRINCIPALE
EAU		ROLE DE SOLVANT
IONS SODIUM, POTASSIUM, CALCIUM, MAGNÉSIUM, CHLORURE, BICARBONATE		EQUILIBRE OSMOTIQUE, MAINTIEN DU pH, RÉGULATION DE LA PERMÉABILITÉ MEMBRANAIRE
PROTEINES DU PLASMA ALBUMINE FIBRINOGENE IMMUNOGLOBULINES		EQUILIBRE OSMOTIQUE, MAINTIEN DU pH, COAGULATION, DÉFENSE (ANTICORPS)
TYPE CELLULAIRE		FONCTION CELLULAIRE
ERYTHROCYTES (GLOBULES ROUGES) 4 À 6,2 MILLIONS PAR MILLIMÈTRE CUBE DE SANG 		TRANSPORT DE L'OXYGÈNE ET DU DIOXYDE DE CARBONE
LEUCOCYTES (GLOBULES BLANCS) 4 000 À 10 000 PAR MILLIMÈTRE CUBE DE SANG 		PRODUCTION D'ANTICORPS POUR LA DÉFENSE CONTRE LES INFECTIONS
PLAQUETTES 150 000 À 450 000 PAR MILLIMÈTRE CUBE DE SANG 		COAGULATION
SUBSTANCES TRANSPORTÉES PAR LE SANG		
NUTRIMENTS (GLUCOSE, ACIDES GRAS, VITAMINES, ETC.), DECHETS MÉTABOLIQUES, GAZ (OXYGÈNE ET DIOXYDE DE CARBONE), HORMONES		

2. LE SANG assure de nombreuses fonctions, parce qu'il contient des constituants variés. Composé à parts presque égales de plasma et de cellules, le sang transporte des composés nutritifs et des

messagers chimiques dans tout l'organisme ; il participe également à l'oxygénation des tissus, à la coagulation et aux défenses immunitaires.

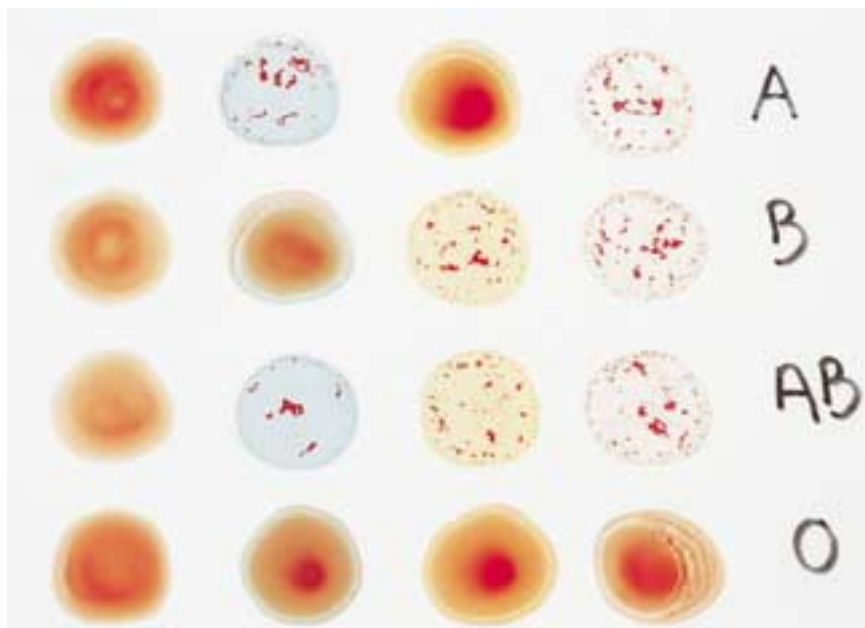
gène nommé *Rh* : ce type de sang est alors *Rh+*. Quand l'antigène *Rh* est absent, le sang est de type *Rh-*. Le sang *Rh+* ne peut être donné qu'à des patients *Rh+* ; en revanche, le sang *Rh-* peut être donné aussi bien à des personnes *Rh+* que *Rh-*.

En France, plus de cinq millions d'unités de sang sont transfusées chaque année. Le risque de décès par suite d'une transfusion sanguine est d'environ un pour 100 000, deux fois inférieur au risque de décès après un accident de voiture et dix fois inférieur au risque de décès par suite d'une grippe (dans le risque de décès des suites d'une transfusion, on inclut l'éventualité d'erreurs de groupe sanguin ou d'infections d'origine virales ou bactériennes). Toutefois les médecins et les services de santé, qui craignent la propagation d'épidémies, telle celle du SIDA, ou, plus généralement, des contaminations par des virus présents dans le sang (les virus des hépatites B ou C, par exemple), préféreraient utiliser des produits dont l'innocuité serait assurée.

L'artificiel et le synthétique

Pour être un substitut du sang, un produit doit remplir des conditions draconiennes : il ne doit pas être toxique ; il ne doit pas transmettre de maladie ; il ne doit pas provoquer de réaction immunitaire ; il doit être facilement transportable ; il doit être compatible avec tous les groupes sanguins ; il doit rester dans la circulation sanguine jusqu'à ce que l'organisme soit en mesure de reconstituer son propre sang ; il doit ensuite être éliminé sans effets secondaires. Des conditions secondaires s'ajoutent : notamment le sang artificiel doit pouvoir se stocker (conservé à 4 °C, le sang ne reste frais que pendant 42 jours), et il doit remplir plusieurs des fonctions du sang.

Les substituts sanguins qui sont déjà commercialisés, comme ceux qui le seront bientôt, ambitionnent de satisfaire toutes ces exigences sauf la dernière ; ils ne reproduisent toutefois que la fonction la plus fondamentale du sang, le transport de l'oxygène (ils diffèrent de ce qu'on nomme des diluants – telles les solutions salines, le plasma ou les solutions de dextrose – dont la seule fonction est seulement d'accroître le volume de sang dans l'organisme).



3. LE GROUPE SANGUIN est défini par la présence ou l'absence d'antigènes (*A*, *B* et *Rh*) à la surface des globules rouges. Le sang est du groupe *A* quand il contient l'antigène *A* ; il est du groupe *B* quand il contient l'antigène *B* ; le sang du groupe *AB* contient les deux, antigènes *A* et *B* ; le sang du groupe *O* ne contient aucun de ces deux antigènes. D'autre part, le sang est dit *Rh+* s'il contient l'antigène *Rh* ; il est de type *Rh-* dans le cas contraire. Le sang transfusé à un malade ne doit contenir aucun antigène que le système immunitaire du receveur reconnaîtrait comme étranger, ce qui conduirait à une destruction du sang et à la mort du receveur (zones irrégulièrement colorées). Ici les colonnes correspondent aux receveurs *AB*, *B*, *A*, *O*, et les lignes aux donneurs.

Ces dernières années, les biochimistes ont principalement étudié deux types de sang artificiel : les substances chimiques et l'hémoglobine.

Les partisans de la voie chimique, d'une part, se sont intéressés aux composés transporteurs d'oxygène de la famille des fluorocarbures, cousins du Téflon. Les partisans de l'utilisation de l'hémoglobine, d'autre part, affirment que l'aptitude du sang à capter et à transporter des gaz ne peut être reproduite que par l'élément qui en est directement responsable. D'autres recherches en cours n'ont pas encore conduit à des produits au stade des essais cliniques : elles visent à faire produire de l'hémoglobine par des animaux transgéniques, à modifier la surface des globules rouges pour les transformer en ceux d'un donneur universel, à lyophiliser des globules rouges ou à encapsuler l'hémoglobine dans des néo-hématies, c'est-à-dire des sphères de molécules de matière grasse.

Les fluorocarbures sont des molécules composées d'atomes de carbone, d'hydrogène et de fluor. Ils forment des liquides qui dissolvent des quantités importantes de gaz tels que l'oxygène et le dioxyde de carbone. Leur intérêt a été démontré en 1960, lorsque

Leland Clark, de l'Université de l'Alabama, montra qu'une souris immergée dans un fluorocarbure liquide respirait presque normalement. Plus récemment, le film *Abyss* a montré l'un des personnages qui survivait à une plongée dans les profondeurs océaniques en «respirant» un liquide qui dissolvait de l'oxygène. Comme les fluorocarbures sont chimiquement inertes et ne se dissolvent pas dans le plasma, ils ne sont pas toxiques, mais on doit les «émulsionner» en particules que l'on peut ensuite disperser dans le sang.

Contrairement à l'hémoglobine – qui capte et libère l'oxygène de façon active –, les fluorocarbures assurent des transferts passifs de gaz : l'oxygène passe directement des poumons aux fluorocarbures en suspension dans le plasma, sans transiter par les globules rouges ; ensuite, les fluorocarbures se répartissent dans tout l'organisme, échangeant progressivement l'oxygène qu'ils ont dissous contre du dioxyde de carbone.

Les fluorocarbures dissolvent une quantité d'oxygène directement proportionnelle à la quantité d'oxygène inspirée : si l'on fait respirer à un malade un mélange gazeux où la pression d'oxygène est supérieure à celle

de l'air ambiant, l'organisme est mieux oxygéné. Par ailleurs, le transport des gaz par les fluorocarbures est rapide, car la diffusion n'est pas gênée par la membrane des globules rouges (les molécules d'hémoglobine, pour leur part, ne véhiculent que quatre molécules d'oxygène à la fois – quelle que soit la quantité d'oxygène disponible – et le gaz doit traverser la membrane des cellules sanguines avant de passer dans le sang).

Les fluorocarbures quittent le sang par le système réticulo-endothélial, qui stocke les gouttelettes dans la rate et dans le foie, d'où elles sont ensuite éliminées. Cette évacuation se fait quatre à douze heures après l'injection des fluorocarbures dans l'organisme, mais on ignore les effets à long terme de la rétention de fluorocarbures.

Lorsque les fluorocarbures furent utilisés pour la première fois comme substituts du sang chez des souris, dans les années 1960, ils présentaient un inconvénient majeur : mal éliminés par l'organisme, ils s'accumulaient dans les tissus. Toutefois, dans les années 1980, un nouveau type de fluorocarbures fut introduit et testé cliniquement. L'utilisation de ce produit, le *Fluosol-DA* (fabriqué par la Société *Croix verte*, à Osaka, au Japon),

fut agréée pour quelques patients sélectionnés, notamment pour des personnes qui refusaient les transfusions sanguines pour des motifs religieux. En raison de la faible stabilité du produit, de ses effets secondaires et de sa faible efficacité, ce produit fut peu utilisé.

Quelques sociétés testent aujourd'hui une autre gamme de substituts du sang à base de fluorocarbures. L'*Oxygent* de la Société pharmaceutique *Alliance*, par exemple, est stable pendant deux ans quand il est conservé au froid. D'autres fluorocarbures plus récents fournissent jusqu'à quatre fois plus d'oxygène que leurs prédécesseurs, mais l'accroissement de la capacité de transport d'oxygène par le sang conduit parfois à une accumulation excessive d'oxygène dans les tissus. Des études cliniques de ces substituts à base de fluorocarbures sont en cours ; les biochimistes cherchent à réduire leurs effets secondaires.

Du côté de l'hémoglobine

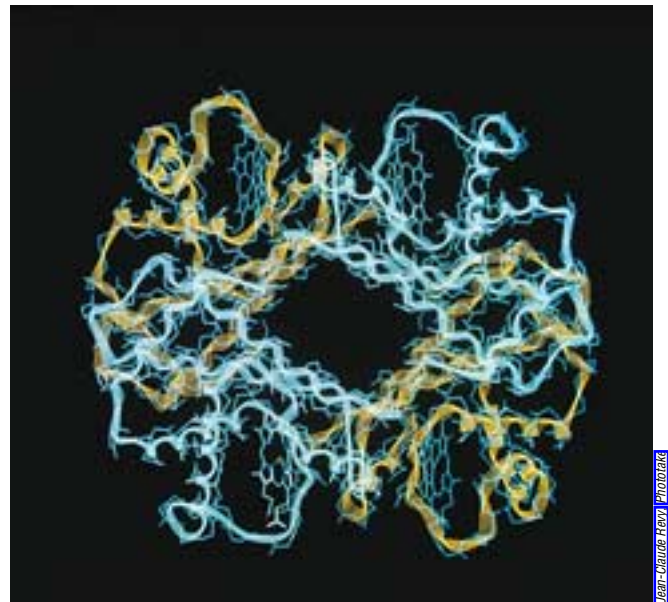
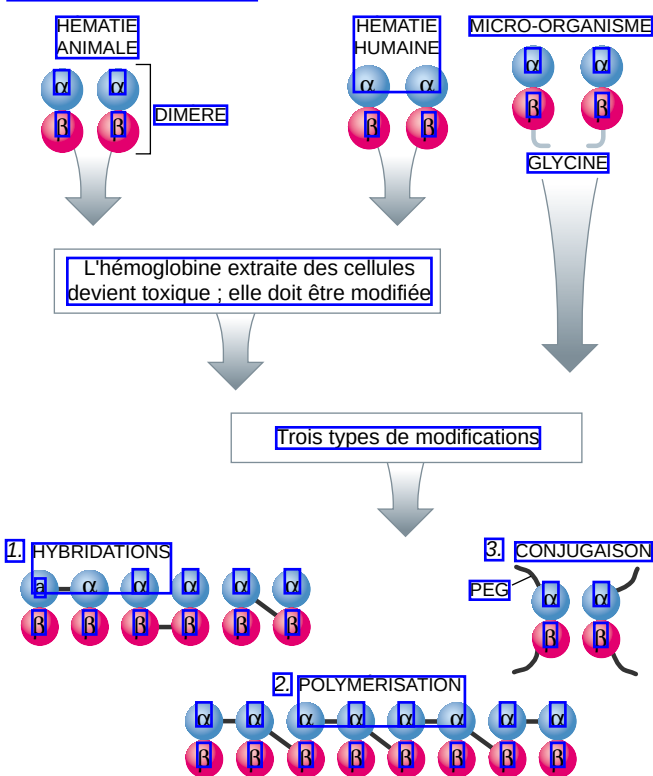
L'autre voie, la production d'hémoglobine, a été beaucoup plus étudiée. L'administration d'hémoglobine en solution dans l'eau a été testée pour la première fois, en 1868, sur des chiens, mais les animaux tombèrent malades :

leurs reins furent gravement endommagés, et leur sang perdit une partie de ses capacités de transport. Les analyses montrèrent que, lorsque l'hémoglobine des chiens était libre, c'est-à-dire dissoute dans le sang au lieu d'être intégrée à des globules rouges, elle devenait instable, se fractionnait en dimères, pénétrait dans les reins, qu'elle endommageait ; elle était éliminée en quelques heures seulement, parce que les sous-unités étaient trop petites pour être retenues par les reins.

L'hémoglobine humaine a le même inconvénient. En outre, elle n'est active que si elle est liée à un composé nommé 2,3 diphosphoglycérate (2,3-DPG en abrégé), qui n'est présent que dans les globules rouges. En l'absence de 2,3-DPG, l'hémoglobine se charge en oxygène dans les poumons, mais elle ne le libère pas dans l'organisme. En outre, sans 2,3-DPG et d'autres éléments des globules rouges, l'hémoglobine humaine subit une « auto-oxydation » : ses atomes de fer changent d'état d'ionisation et perdent définitivement leur faculté de fixer des molécules de gaz.

En 1969, des biochimistes réussirent à rendre la transformation réversible en modifiant chimiquement l'hémoglobine dissoute dans l'eau.

SOURCES D'HÉMOGLOBINE



4. LES SUBSTITUTS DU SANG à base d'hémoglobine sont de trois types. L'hémoglobine (ci-dessus, un modèle informatique de la molécule) obtenue lors de dons de sang, lors de prélèvements à des animaux ou à partir d'organismes génétiquement modifiés est toxique lorsqu'elle n'est pas enfermée dans un globule rouge. Pour éviter sa toxicité, les biochimistes modifient la molécule en liant chimiquement des dimères (1), en polymérisant ceux-ci (2), ou en associant les dimères à du polyéthylène glycol (3).

On a ensuite trouvé que plusieurs types de modifications étaient efficaces : liaisons chimiques entre des chaînes alpha, entre des chaînes bêta, ou entre des chaînes alpha et bêta ; liaison de plusieurs molécules d'hémoglobine ; ou encore, association de l'hémoglobine à une grosse molécule nommée polyéthylène glycol. Ces modifications, qui augmentent généralement la taille des molécules d'hémoglobine, évitent les atteintes rénales et l'évacuation trop rapide de la molécule.

Aujourd'hui, cinq produits à base d'hémoglobine sont testés aux États-Unis. Plusieurs d'entre eux sont fabriqués à partir de sang trop ancien pour être utilisé. Le *PolyHème*, fabriqué par les Laboratoires *Northfield*, est composé d'hémoglobine humaine polymérisée, que l'on teste dans les cas de transfusion opératoire. Ce produit est préparé par pyridoxylation, une opération qui déforme la molécule, augmentant

SYNTHÈSE : JOY MATHAROM (19)



5. CETTE SOURIS respire dans un récipient plein d'un fluorocarbure : les composés de ce type dissolvent de grandes quantités d'oxygène. Ce sont des substituts du sang que les biochimistes cherchent aujourd'hui à améliorer.

sa capacité de transport de l'oxygène, puis qui augmente sa taille, par polymérisation. L'*HemAssist* de la Société *Baxter International* est également préparé à partir de sang humain périmé ; cette forme d'hémoglobine, composée de plusieurs chaînes liées, est en cours d'essai en chirurgie cardiaque, ainsi que chez des personnes ayant subi un choc hémorragique ou traumatique.

D'autres produits résultent d'approches différentes. La Société *Somatogen* fabrique l'*Optro* à partir de sous-unités d'hémoglobine humaine liées, qu'elle fait produire par la bactérie *Escherichia coli*. La Société *Bio-pure* fabrique l'*Hemopure* à partir d'hémoglobine polymérisée provenant de sang de bovins. Ce substitut est à l'étude dans les cas de traumatismes, d'interventions chirurgicales et d'anémie falciforme.

Pour nos travaux, nous utilisons également l'hémoglobine bovine, qui est peu coûteuse, disponible en quantité et qui, contrairement à l'hémoglobine humaine, ne nécessite pas de 2,3-DPG pour libérer de l'oxygène. En associant cette hémoglobine bovine à du polyéthylène glycol, nous avons obtenu une molécule stable et plus grosse que l'hémoglobine pure.

L'évaluation de l'hémoglobine couplée au polyéthylène glycol est testée

chez des personnes souffrant de tumeurs solides. En administrant l'hémoglobine couplée au polyéthylène glycol, des médecins sont parvenus à oxygéner les tumeurs et à les rendre sensibles à la radiothérapie. La molécule est également utilisée dans le traitement des infarctus et des accidents vasculaires cérébraux : comme la molécule est plus petite qu'un globule rouge, elle circule même dans des vaisseaux sanguins obstrués et apporte ainsi de l'oxygène à des cellules qui en sont privées.

Sécurité et substituts

Malgré les progrès, les recherches se poursuivent, car aucun substitut parfait n'a été trouvé. En raison de la grande quantité de substitut qui doit être administrée lors des transfusions, les biochimistes doivent tenir compte d'effets secondaires qui ne se manifestent pas lors d'administration de petites doses. Alors qu'on administre seulement quelques milligrammes des divers médicaments, les substituts du sang doivent être fournis en quantités de l'ordre de 50 à 100 grammes.

On ignore les effets secondaires de ces composés. Tous ceux qui sont en cours de test se sont révélés toxiques à court terme, provoquant des hypertensions, des atteintes rénales, des tachycardies, des douleurs gastro-intestinales. Comme la plupart des substituts sanguins seront administrés quand la vie du malade est en jeu, les chercheurs doivent démontrer que les bénéfices immédiats sont supérieurs aux risques.

Chaque type de substitut sanguin a ses inconvénients : les fluorocarbures sont mal éliminés, toxiques, trop instables dans le sang, et ils assurent une oxygénation excessive. Les substituts sanguins fabriqués à partir de sang humain périmé sont en quantité insuffisante. Pour les fabriquer par génie génétique, on devra trouver des procédés de fabrication en masse.

Enfin, les substituts d'origine bovine ne doivent pas transmettre de maladies comme l'encéphalopathie spongiforme bovine ou d'autres maladies non encore identifiées. Les fabricants éviteront naturellement d'utiliser le sang provenant de vaches qui ont été nourries avec les produits d'origine animale responsables de l'épidémie récente, mais ils doivent aussi s'assurer qu'aucun autre agent pathogène n'est présent.

Les substituts qui sont en cours d'essais cliniques seront commercialisés dès qu'ils en auront reçu l'autorisation, mais seront-ils acceptés par le public ? Quel prix acceptera-t-il de payer pour ces produits ? D'autre part, en raison du coût élevé de leur mise au point, ces produits seront sans aucun doute deux à cinq fois plus coûteux que le sang. Les systèmes de soins accepteront-ils ce coût ?

Mary NUCCI et Abraham ABUCHOWSKI travaillent pour la Société *New Paradigm Consulting*.

T.M.S. CHENG, *Blood Substitutes*, Marcel Dekker, 1989.

R.M. WINSLOW, *Blood Substitutes : Physiological Basis of Efficacy*, Springer-Verlag, 1995.

Blood Substitutes : New Challenges, sous la direction de R.M. Winslow, K.D. Vandegriff et M. Intaglietta, Birkhauser, 1996.

Le climat dans les glaces

RICHARD ALLEY • MICHAEL BENDER

La glace du Groenland, accumulée depuis des dizaines de milliers d'années, révèle le climat du passé.

Comment le climat de la planète changera-t-il dans les prochains siècles? L'Europe se réchauffera-t-elle comme il y a 1 000 ans, lorsque les Vikings s'établissaient au Groenland et que l'on cultivait la vigne dans les îles Britanniques? Le Sahara redeviendra-t-il plus humide, comme il y a 10 000 ans, ou se désertifiera-t-il davantage sous l'effet de la sécheresse? Alors que les peuples et les gouvernements s'inquiètent des conséquences de l'émission artificielle de gaz à effet de serre sur le réchauffement de la planète, nous avons plus que jamais besoin de comprendre les mécanismes naturels qui règlent les évolutions climatiques.

Pour prévoir l'avenir, les climatologues se tournent vers le passé. Les études géomorphologiques, puis, plus récemment, les prélèvements de sédiments marins avaient montré que le climat terrestre suit des cycles longs où alternent les périodes glaciaires, froides, et interglaciaires, chaudes. L'analyse des carottes de glace de plusieurs kilomètres de longueur, prélevées au Groenland, en Antarctique et ailleurs, précise les conditions qui régnaient à chaque époque : l'eau gelée depuis des dizaines de milliers d'années a piégé des impuretés, des gaz et des poussières qui sont des témoins du passé.

Les carottes de glace du Groenland ont révélé que des variations climatiques rapides (sur quelques centaines à quelques milliers d'années) et de grande amplitude se sont superposées à ces cycles. Au cours des échanges de chaleur entre les hémisphères Nord et Sud par l'océan Atlantique, les événements se sont produits en opposition de phase dans les deux hémisphères : le Groenland se réchauffait pendant que l'Antarctique refroidissait, et réciproquement.



1. LA CALOTTE GLACIAIRE, au centre du Groenland, résulte de l'accumulation de la neige depuis plus de 100 000 ans. Les climatologues extraient des informations sur les climats du passé en prélevant des carottes de glace de plusieurs kilomètres de longueur.

Des cycles astronomiques

Les grandes variations climatiques du passé ont des causes astronomiques. Pendant les années 1920 et 1930, l'astronome serbe Milutin Milankovitch a étudié comment l'attraction gravitationnelle des autres planètes modifie cycliquement l'orbite de la Terre. Comme la répartition et l'intensité du rayonnement solaire qui parvient à la surface de la Terre sont modifiées, le climat terrestre est perturbé. Selon Milankovitch, trois paramètres de l'orbite sont déterminants : l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur le plan de son orbite, la précession de cet axe (sa rotation autour de sa position moyenne) et l'excentricité de l'orbite autour du Soleil (c'est une ellipse plus ou moins allongée). Les variations de ces trois paramètres entraînent des oscillations, lentes mais perceptibles, des climats, avec des périodes respectives d'environ 40 000, 20 000 et 100 000 ans.

La théorie de Milankovitch fut contestée parce qu'elle ne s'appuyait pas sur des résultats précis d'observations. Puis l'étude des carottes sédimentaires prélevées au fond des océans, initiée par Cesare Emiliani,

en 1955, confirma que les derniers millions d'années ont été marqués par une succession de réchauffements et de refroidissements, au cours de laquelle les glaciers ont avancé ou reculé sur de vastes étendues, au rythme prédit par Milankovitch. Depuis au moins un demi-million d'années, le cycle climatique fondamental, d'un maximum glaciaire au suivant, est d'environ 100 000 ans ; des oscillations plus courtes, de 20 000 à 40 000 ans, s'y superposent.

Plus récemment, nous avons accédé à des enregistrements plus précis des climats du passé, contenus dans les grandes calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique : par des forages, on a récupéré des carottes de glace dans des sites où la neige s'est accumulée, pendant des dizaines de milliers d'années, sur plusieurs kilomètres d'épaisseur et où, tassée sous son propre poids, elle a formé de la glace.

La première étape dans l'étude des carottes de glace ainsi obtenues est la datation de la glace aux différentes profondeurs : c'est seulement ainsi que l'on obtient, ultérieurement, une histoire du climat. Heureusement, dans les régions où il neige fréquemment, la glace forme des couches annuelles, que l'on compte comme les cernes de croissance annuels des arbres. Cette stratification est souvent perceptible à l'œil nu, parce que les cristaux de neige sont plus gros l'été que l'hiver. La glace est aussi généralement plus acide l'été (sans que l'on en connaisse la raison précise). En outre, la concentration en particules de poussière, mesurée par un laser, augmente généralement au printemps, car le vent souffle plus fort pendant cette saison.

En utilisant ces méthodes et d'autres, l'un d'entre nous (R. Alley) a établi, pour

une carotte prélevée au Groenland, une chronologie qui s'accorde avec plusieurs mesures indépendantes. En analysant la composition des cendres trouvées dans certaines couches de glace, par exemple, on a identifié les volcans d'où proviennent les cendres, et l'on a comparé les chronologies des glaces aux dates d'éruption : sur plusieurs siècles, on retrouve les mêmes dates par comptage des couches annuelles de glace. Pour les 11 500 dernières années, l'actuelle période chaude interglaciaire, le comptage des couches donne des dates précises à un pour cent près. Bien que la précision soit un peu moins bonne pour la glace plus ancienne des époques plus froides, elle vaut celle d'autres techniques de datation jusqu'à 50 000 ans au moins.

Les déformations de la glace

Au-delà de 100 000 ans, les couches annuelles restent visibles, mais elles sont souvent déformées : les glaciers et les calottes glaciaires s'étalent et s'amincissent sous leur propre poids. Ce mouvement se poursuivant sur des dizaines de milliers d'années, les couches de glace situées près du socle rocheux s'amincissent jusqu'à disparaître et sont plissées par les déplacements du glacier sur le sol. Ainsi, dans les carottes obtenues par l'équipe américaine au Groenland, les couches annuelles étaient successivement, de haut en bas, horizontales, ondulées, marquées d'un pli en forme de Z et, enfin, pour celles de plus de 110 000 ans, inclinées à des angles de plus de 20 degrés. Les carottes prélevées à proximité par les chercheurs européens ont révélé des formes tout aussi complexes, mais différentes.

Ces déformations empêchent le comptage continu des couches annuelles au-delà d'une certaine profondeur et compliquent leur datation. Ainsi, les climatologues qui étudiaient les carottes prélevées par le forage européen avaient annoncé que, lors de la précédente période interglaciaire, l'Éémien, qui s'est terminé il y a environ 120 000 ans, le climat terrestre avait connu des oscillations fréquentes et rapides : c'était très surprenant, car on pensait que les périodes interglaciaires étaient plutôt stables. La comparaison avec les résultats issus du forage américain a rassuré les climatologues : tandis que les deux séries

Steve Starr / SABA

Des tranches de temps

Les carottes de glace obtenues par forage au Groenland ou en Antarctique sont analysées par plusieurs méthodes.



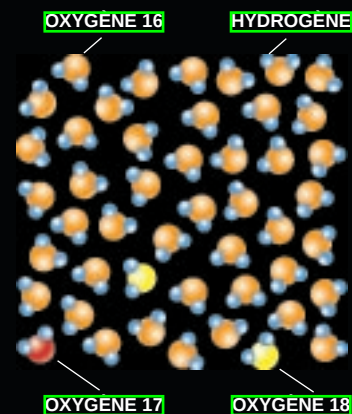
Richard B. Alley

LES COUCHES ANNUELLES de neige indiquent le temps écoulé depuis le dépôt. Souvent visibles à l'œil nu, elles sont généralement horizontales, mais de lents mouvements du glacier les plissent parfois.



Richard B. Alley

DES BULLES D'AIR sont piégées dans la neige lorsque celle-ci se transforme en glace, sous le poids des couches supérieures. Ces échantillons de l'atmosphère du passé montrent l'évolution des concentrations en différents gaz de l'atmosphère, tels le dioxyde de carbone et le méthane.



Jean-Luc Christensen

LES ATOMES D'OXYGÈNE de la glace ont 16, 17 ou 18 nucléons (neutrons et protons). La teneur relative des différents types d'oxygène renseigne sur la température au moment de la précipitation.

d'enregistrements climatiques étaient quasi identiques sur les 110 000 dernières années, elles ne s'accordaient pas pour les périodes antérieures, en raison de déformations différentes des couches de glace. Le socle rocheux perturbe bien plus les couches annuelles qu'on ne s'y attendait initialement ; il avait brouillé les analyses climatiques.

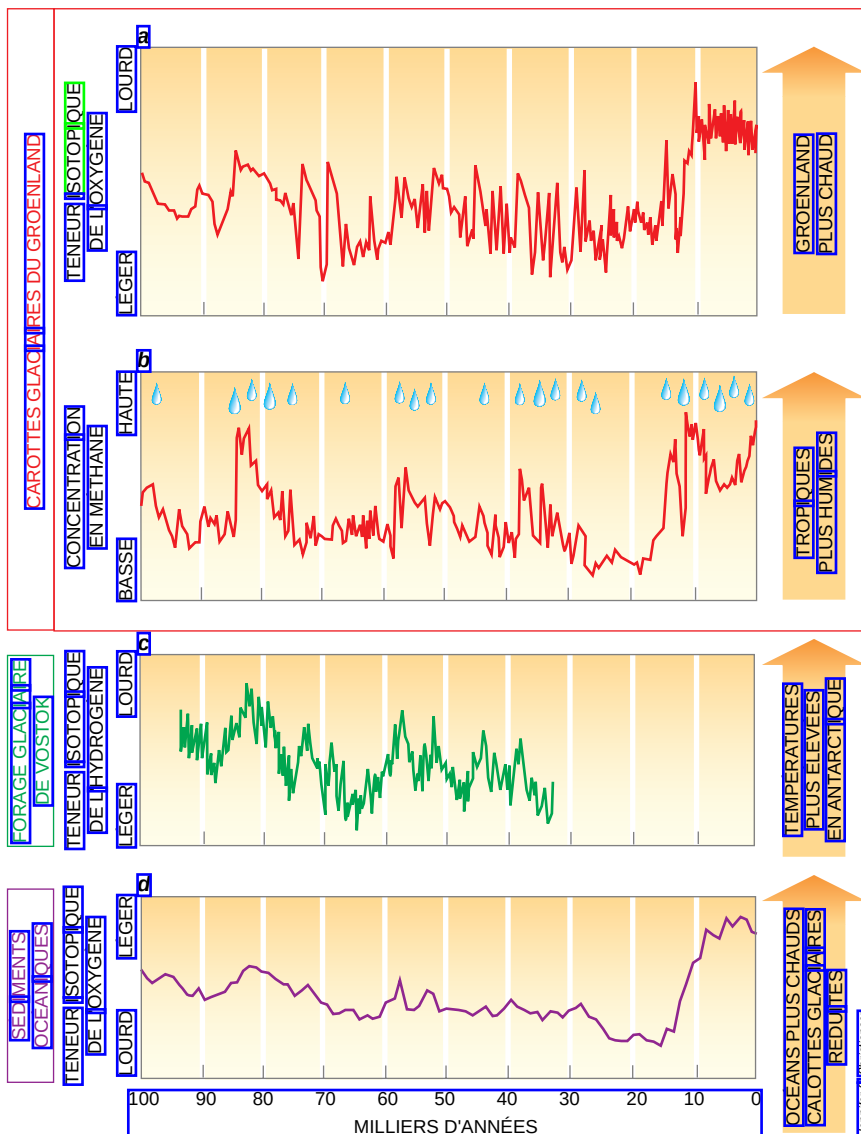
Aujourd'hui, les paléoclimatologues tentent de modéliser informatiquement ces déformations des couches profondes. De surcroît, pour obtenir un enregistrement fiable du climat pendant l'Eémien, l'équipe européenne a entrepris un autre forage, à 340 kilomètres au Nord-Ouest des deux forages précédents. Dans ce nouveau

site, les couches antérieures à 110 000 ans seraient plus loin du socle rocheux que dans les précédents forages : les distorsions dues à l'écoulement de la glace y seraient plus faibles.

Dans les cas où les problèmes de datation sont résolus, on étudie les évolutions climatiques à partir des températures passées. Le principal thermomètre utilisé est la concentration en eau «lourde», dont l'atome d'oxygène contient 17 ou 18 neutrons, au lieu de 16 dans les atomes d'oxygène les plus courants (il existe un autre type d'eau «lourde», utilisée notamment dans les centrales nucléaires, où l'hydrogène est remplacé par sa forme à un neutron, le deutérium). Lorsqu'une masse d'air se

refroidit, l'eau lourde se condense d'abord et précipite (les liaisons «hydrogène» entre les atomes d'hydrogène et les atomes d'oxygène de molécules différentes y sont plus fortes). Ainsi, pendant les périodes plus froides, la neige qui tombe à l'intérieur des terres contient moins d'eau «lourde», parce que celle-ci a déjà précipité, lorsque les nuages étaient au-dessus de l'océan ou des bords de la calotte glaciaire.

La température actuelle de la glace donne d'autres indications. Le phénomène est analogue à celui que l'on observe quand on met un rôti congelé au four : le cœur reste froid longtemps. De même, la glace située à un ou deux kilomètres de profondeur conserve l'enregistrement atténué et déformé des températures extrêmes de la dernière glaciation : elle est plus froide qu'en surface. Ces deux méthodes d'évaluation de la température montrent que



2. LES TEMPÉRATURES (a) et les concentrations en méthane dans l'atmosphère (b) ont été déterminées, pour les 100 000 dernières années, par l'étude des carottes de glace du Groenland. Ces mesures confirment les résultats des études analogues menées sur des carottes glaciaires prélevées à Vostok, en Antarctique (c), et les calculs du

volume total de glace dans le monde réalisés à partir de l'analyse des sédiments marins profonds (d). Le Globe se réchauffe tous les 20 000 ans. Le refroidissement progressif, jusqu'à il y a 20 000 ans, et le réchauffement rapide il y a 20 000 à 10 000 ans suivent un cycle de période plus longue, égale à 100 000 ans environ.

L'opposition climatique Nord-Sud dans les carottes de glace

L'examen des carottes de glace du Groenland, pour les derniers 110 000 ans, a révélé des épisodes de réchauffement et de refroidissement brusques (en quelques décennies), nommés événements Dansgaard/Oeschger. Les carottes glaciaires prélevées en Antarctique témoignent aussi de fluctuations moins rapides et d'amplitude bien moindre. En replaçant les enregistrements sur une même échelle de temps, nous avons confirmé, pour un passé récent, ce que des modèles et des prélèvements sédimentaires océaniques laissent penser : ces fluctuations dans les deux hémisphères sont en opposition de phase.

Comment déterminer une échelle temporelle précise pour les carottes de glace ? On utilise des marqueurs stratigraphiques, témoins d'événements dont les conséquences ont touché simultanément tout le Globe : leur observation dans les carottes du Groenland et de l'Antarctique permet d'établir une chronologie commune. Les principaux sont les éruptions volcaniques importantes, les pics de béryllium 10, radioélément produit dans la haute atmosphère et dont le flux vers la surface dépend de l'activité solaire ou du champ magnétique terrestre, et les variations de la concentration atmosphérique de gaz traces.

Ces dernières ont l'avantage sur les autres marqueurs d'être quasi continues, et de produire une longue échelle de temps relative. Toutefois, la neige séjourne un certain temps sur le glacier avant de se transformer en glace et d'emprisonner de l'air : ce dernier est donc toujours plus récent que la glace qui l'entoure. La quantification de cette différence d'âge détermine la précision des corrélations possibles.

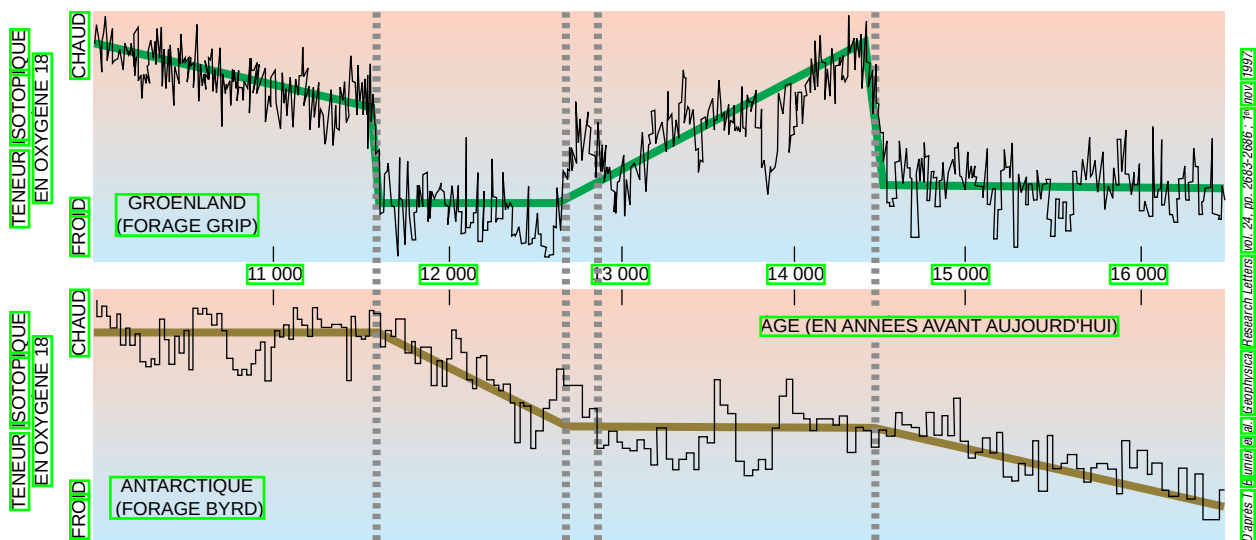
Deux paramètres gazeux ont été utilisés jusqu'ici pour corréler les carottes de glace du Groenland et de l'Antarctique : la composition isotopique de l'oxygène de l'air (le rapport d'abondance entre l'oxygène 18 «lourd» et l'oxygène 16 «léger») et la concentration en méthane. Grâce

au premier, Mike Bender et ses collègues ont montré que la température s'est élevée significativement en Antarctique seulement quand les événements Dansgaard/Oeschger du Groenland ont duré plus de 2 000 ans. L'incertitude sur la différence d'âge entre l'air et la glace, et la faible variabilité de la composition isotopique de l'oxygène atmosphérique les a toutefois empêchés de déterminer la relation temporelle entre Groenland et Antarctique avec une précision meilleure que 3 000 ans.

La concentration en méthane varie beaucoup plus au cours du temps. En collaboration avec nos collègues de l'Université de Berne, en Suisse, nous l'avons mesurée et montré que l'épisode à température constante qui interrompt pendant 1 500 ans le réchauffement de l'Antarctique lors de la dernière déglaciation était simultanément un épisode chaud au Groenland. De même, le refroidissement spectaculaire du Dryas récent (il y a 12 500 à 11 500 ans) au Groenland était accompagné d'un réchauffement en Antarctique.

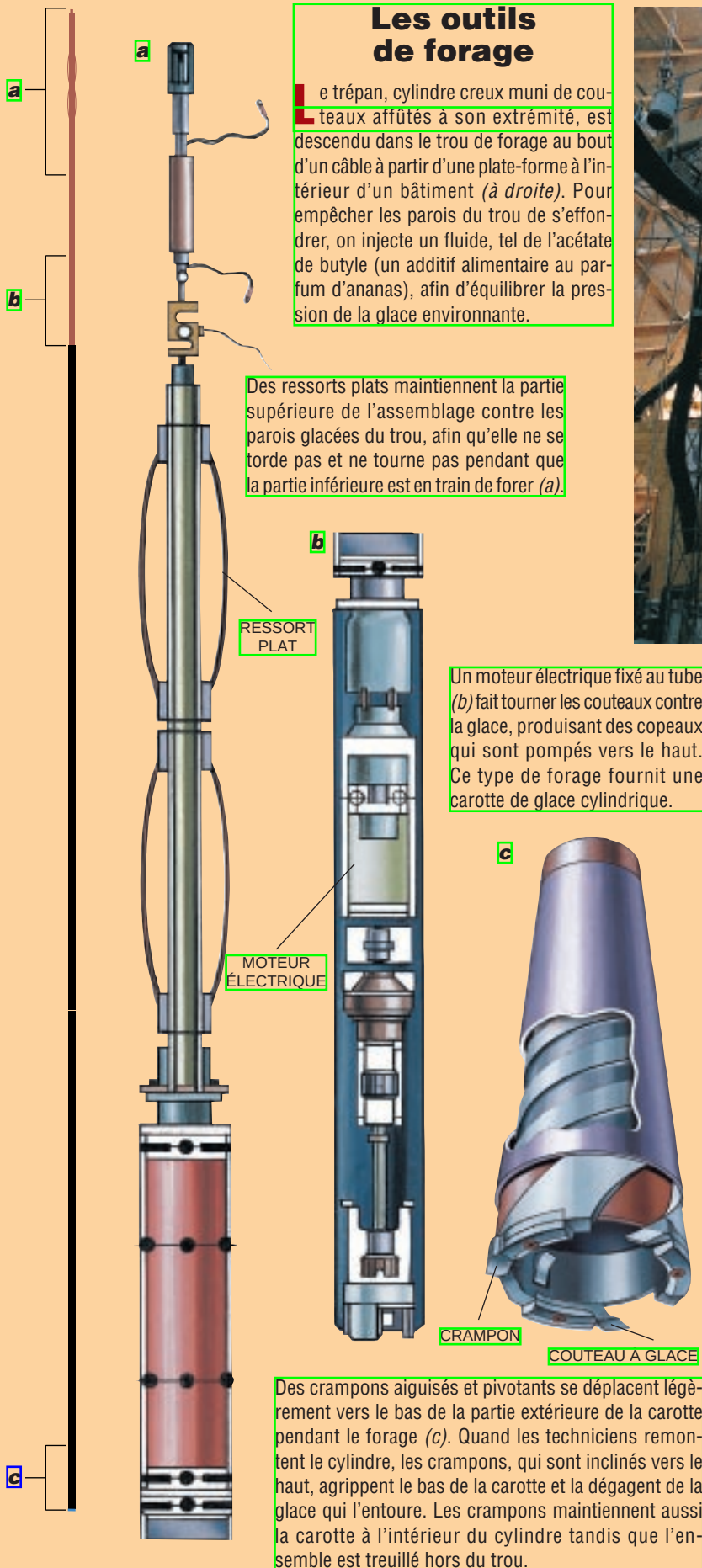
Cette relation temporelle entre les climats du Nord et du Sud prouve que, comme des modèles océaniques l'avaient prédit, pendant la dernière déglaciation, le flux de chaleur provenant de l'océan qui entoure l'Antarctique était en opposition de phase avec celui de l'océan Atlantique Nord. Ainsi, les climats des régions polaires Nord et Sud semblent-ils toujours couplés, via la circulation océanique globale, durant cette phase de changement climatique fondamental, mais avec des conséquences opposées dans les deux hémisphères. Nous poursuivons actuellement les analyses de la concentration en méthane sur la période d'il y a 50 000 à 25 000 ans, afin de vérifier si la même relation existait pendant cette période.

Jérôme CHAPPELLAZ, CNRS
Laboratoire de glaciologie et géophysique
de l'environnement, Saint-Martin-d'Hères



Les variations de température au Groenland (en haut) et en Antarctique (en bas) pendant la dernière transition glaciaire/interglaciaire ont été corrélées à partir des concentrations en méthane dans l'atmosphère. Au début du réchauffement au Groenland (il y a

14 500 à 13 000 ans environ), la température se stabilise en Antarctique. En revanche, pendant la période froide d'il y a 12 700 à 11 600 ans au Groenland, la température a continuellement augmenté en Antarctique.



MARK WICKER / UNIVERSITÉ DE NEW HAMPSHIRE

les périodes les plus rudes de la dernière glaciation étaient vraiment très froides : la température moyenne du Groenland était inférieure de plus de 20 degrés à celle d'aujourd'hui.

Les carottes de glace ont aussi enregistré l'histoire des précipitations, par l'épaisseur des couches annuelles. En corrigeant les distorsions dues à l'écoulement et au tassement de la glace, on calcule la quantité de neige tombée une année donnée. Dans les périodes les plus froides, le centre du Groenland a reçu quatre à cinq fois moins de précipitations qu'aujourd'hui.

Des poussières dans la neige

D'autres informations climatiques sont contenues dans les matériaux transportés par le vent et piégés par la glace. Ainsi, des particules de poussière plus grosses sont apportées quand les vents sont plus violents. On retrace même les anciens systèmes de circulation atmosphérique en déterminant l'origine des poussières d'après leur composition (comme l'analyse des cendres permet l'identification des éruptions volcaniques).

Des produits émis par les algues marines et des isotopes radioactifs produits dans l'atmosphère par les rayons cosmiques ont également été

trouvés dans les carottes de glace. Lorsque la concentration en ces substances diminue, c'est qu'elles ont été apportées en quantité moindre ou que des chutes de neige plus abondantes les ont diluées. Comme on sait calculer la quantité de neige tombée chaque année, on distingue les deux phénomènes. On a ainsi mis en évidence des augmentations d'un facteur 100 de la quantité de calcium apportée par le vent, ce qui indique l'existence de vents beaucoup plus forts et, peut-être, de déserts plus étendus pendant les glaciations.

La glace piège aussi l'air du passé. Dans la neige fraîche, les gaz circulent facilement entre les pores des cristaux de glace. Puis le poids de la neige qui s'accumule comprime les couches inférieures, réduisant le volume des pores jusqu'à les fermer complètement entre environ 40 et 120 mètres de profondeur. L'air est alors emprisonné dans la glace sous forme de bulles isolées.

Les analyses de ces minuscules échantillons d'air révèlent l'évolution des concentrations en divers gaz de l'atmosphère, notamment en gaz à effet de serre. Des périodes glaciaires aux périodes interglaciaires, par exemple, les concentrations en dioxyde de carbone et en méthane ont augmenté respectivement d'environ 50 et 75 pour cent. Ces chiffres relativisent les augmentations récentes dues aux activités humaines : 30 pour cent pour le dioxyde de carbone, mais 160 pour cent pour le méthane. La composition de l'air piégé dans la glace permet en outre de placer dans une même chronologie les mesures réalisées sur les carottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique : comme l'atmosphère se mélange rapidement, on considère que sa composition est toujours identique dans les deux hémisphères.

Les fluctuations climatiques enregistrées par la glace du Groenland correspondent à celles déduites de l'étude des carottes de glace de l'Antarctique et des sédiments marins profonds. Ces enregistrements montrent des températures maximales il y a environ 103 000, 82 000, 60 000, 35 000 et 10 000 ans. La période de ces cycles est proche des 20 000 ans calculés par Milankovitch pour les cycles associés à la précession de l'axe de rotation de la Terre, ce qui est une bonne confirmation de sa théorie.

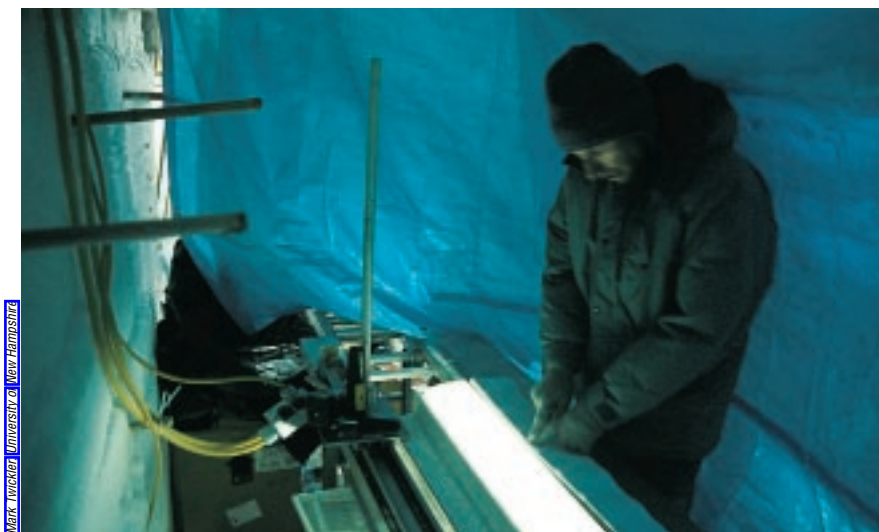
Climats oscillants

En revanche, la théorie de Milankovitch ne prévoit pas les fluctuations climatiques rapides, nommées événements Dansgaard/Oeschger, des noms de leurs découvreurs, enregistrées par les glaces du Groenland : en quelques centaines à quelques milliers d'années, le Groenland se réchauffe rapidement, puis se refroidit, d'abord lentement, puis plus vite. Il y a 100 000 à 20 000 ans, une vingtaine d'événements de ce type se sont produits.

Pendant chacun de ces événements, la concentration en méthane a augmenté dans l'atmosphère. Le méthane est produit par des bactéries dans des environnements où l'oxygène est rare, tels les marais tropicaux et les tourbières. Ces milieux se seraient donc étendus pendant les événements Dansgaard/Oeschger, à cause probablement de l'augmentation des pluies.

L'une des caractéristiques surprenantes de ces événements Dansgaard/Oeschger est leur soudaineté. En une décennie, voire en quelques années, la température moyenne a varié de cinq à dix degrés, les chutes de neige ont doublé et le vent a apporté jusqu'à dix fois plus de poussières. Ces phénomènes spectaculaires ont surtout marqué les périodes de transition entre les stades glaciaires et interglaciaires : alors que la théorie de Milankovitch prévoit un passage progressif des températures chaudes aux températures froides (et inversement), le climat a fait de petits sauts entre le chaud et le froid. Comparativement, la partie la plus froide de la glaciation et l'interglaciaire actuel sont plus stables.

Comment expliquer ces errements climatiques ? Les climatologues en recherchent l'origine dans des phénomènes indépendants de l'orbite terrestre, telles les circulations atmosphériques et océaniques. À l'aide de modèles informatiques, ils étudient comment une modification du climat dans une région du Globe se répercute ailleurs. Ils ont ainsi établi qu'un réchauffement des hautes latitudes modifierait les circulations océaniques et atmosphériques de telle façon que les régions tropicales se réchaufferaient aussi. L'eau s'y évaporerait alors davantage, et l'atmosphère, plus chargée en vapeur d'eau, gaz à effet de serre, se réchaufferait encore. Par ailleurs, pendant les périodes glaciaires, les immenses calottes de glace continentale,



MARK WICKHAM / UNIVERSITY OF NEW HAMPSHIRE

3. LES CAROTTES DE GLACE prélevées au Groenland sont aujourd'hui comparées à celles qui sont récupérées en Antarctique. Les glaciologues examinent quelle est la relation entre les climats des hémisphères Nord et Sud.

entourées d'énormes étendues d'océans gelés, réfléchissaient beaucoup de lumière solaire vers l'espace ; hors des périodes chaudes, au contraire, la fonte des calottes glaciaires permettait une plus grande absorption de la lumière solaire ; l'accumulation de dioxyde de carbone, ainsi que des autres gaz à effet de serre, tels le méthane et la vapeur d'eau, retenait davantage la chaleur.

Comme ces phénomènes réchauffent et refroidissent simultanément les régions de la planète, les climatologues furent surpris lorsque Thomas Stocker, de l'Université de Berne, et Thomas Crowley, de l'Université du Texas, ont annoncé, en 1992, que les événements Dansgaard / Oeschger devaient être inversés au Groenland et en Antarctique.

T. Stocker et T. Crowley avaient observé que, dans l'hémisphère Nord, des eaux salées et tièdes forment le Gulf Stream, de l'Équateur vers l'Arctique, où elles libèrent de la chaleur dans l'atmosphère, créant le climat tempéré et stable de l'Europe du Nord. En se refroidissant, les eaux deviennent plus denses et plongent dans les profondeurs de l'océan, où elles s'écoulent vers l'Antarctique, comme un grand « tapis roulant ». Au plus fort des glaciations, ce tapis roulant ne fonctionnait pas ou était affaibli : les eaux équatoriales s'écoulaient plus lentement vers l'Arctique ; le Groenland et le Nord de l'Europe étaient plus froids. Pendant les événements Dansgaard / Oeschger, le tapis roulant reprenait de la vigueur.

T. Stocker et T. Crowley ont observé que ce système océanique refroidit l'hé-

misphère Sud en même temps qu'il réchauffe le Nord et *vice versa*, à cause de deux phénomènes. Tout d'abord, l'écoulement des eaux profondes et froides vers l'Antarctique engendre un courant de retour vers le Nord : des eaux plus chaudes, peu profondes, ramènent une chaleur supplémentaire qu'elles ont prélevée au Sud. Deuxièmement, le ralentissement du tapis roulant pendant les périodes froides empêche les eaux chaudes originaires des latitudes tropicales de se refroidir beaucoup dans l'hémisphère Nord : il laisse remonter plus d'eau chaude autour de l'Antarctique, ce qui réchauffe l'air de l'extrême Sud.

Cette théorie du déphasage des fluctuations climatiques a été confirmée au milieu des années 1990, lorsque des paléontologues qui étudiaient les foraminifères fossiles (des coquillages microscopiques dont la forme dépend

de la température et de la profondeur) ont constaté que l'océan Antarctique était plus chaud lorsque le tapis roulant ne fonctionnait pas. En outre, Wallace Broecker, de l'Université Columbia, a réexaminé les enregistrements climatiques provenant de carottes sédimentaires et glaciaires de la fin de la dernière glaciation, il y a 20 000 à 10 000 ans : le réchauffement était plus lent en Antarctique pendant les périodes de réchauffement rapide au Groenland, et réciproquement.

Les principaux événements Dansgaard / Oeschger enregistrés dans les carottes de glace du Groenland sont aussi présents en Antarctique, bien que les changements climatiques dans le Sud n'aient pas été aussi importants ni soudains. Des incertitudes quant à la datation des carottes de glace compliquent les corrélations entre les refroidissements au Groenland et les réchauffements en Antarctique pour tous ces événements. Des laboratoires à Grenoble, à Berne et ailleurs tentent de les étendre jusqu'au milieu de la dernière glaciation. Ils pourront, dans les prochaines années, utiliser les nouvelles carottes extraites par les projets de forage profond conduits en Antarctique par des équipes américaines, japonaises, américaines et australiennes.

En forant encore plus profondément dans les calottes glaciaires des deux hémisphères, nous obtiendrons des informations sur les évolutions du climat dans des périodes plus reculées. Nous comprendrons alors mieux les couplages entre l'océan et l'atmosphère qui interviennent fortement dans ces évolutions et nous espérons prévoir les conséquences des activités humaines à moyen terme sur le réchauffement ou sur le refroidissement de la planète.

Richard ALLEY est professeur de sciences de la Terre à l'Université de Pennsylvanie. Michael BENDER est professeur de sciences de la Terre à l'Université Princeton.

R.B. ALLEY et al., *Abrupt Increase in Greenland Snow Accumulation at the End of the Younger Dryas Event*, in *Nature*, vol. 362, pp. 527-529, 8 avril 1993.

W. DANSGAARD et al., *Evidence for General Instability of Past Climate from a 250-kyr Ice-Core Record*, in *Nature*, vol. 364, pp. 218-220, 15 juillet 1993.

Michael BENDER, Todd SOWERS, Mary-Lynn DICKSON, Joseph ORCHARD, Pieter GROOTES, Paul A. MAYEWSKI et

Debra A. MEESE, *Climate Correlations between Greenland and Antarctica during the Past 100,000 Years*, in *Nature*, vol. 372, pp. 663-666, 15 décembre 1994.

Kurt M. CUFFEY, Gary D. CLOW, Richard B. ALLEY, Minze STUIVER, Edwin D. WADDINGTON et Richard W. SALTUS, *Large Arctic Temperature Change at the Wisconsin-Holocene Glacial Transition*, in *Science*, vol. 270, pp. 455-458, 20 octobre 1995.

Wallace BROECKER, *L'origine des glaciations*, in *Pour la Science*, janvier 1996.

Claude BOUTRON, *La mémoire des glaces du Groenland*, in *Pour la Science*, octobre 1996.

Le bruit en $1/f$

EDOARDO MILOTTI

L'origine de ce signal aléatoire, particulièrement intéressant par le nombre de processus physiques où il intervient, reste partiellement énigmatique. On sait cependant en établir certains modèles généraux.

Allumons la radio et sélectionnons une bande où peu de stations transmettent (par exemple, la région des grandes ondes). Changeons lentement la fréquence d'accord de la radio : entre deux stations radiophoniques perceptibles, les signaux sont très faibles et difficilement audibles. Pour d'autres fréquences, nous n'entendons qu'un bruissement : ce signal est appelé «bruit». Notre oreille capte alors la traduction sonore d'un signal électrique que les circuits de la radio envoient au haut-parleur.

Un signal de bruit, aussi désordonné qu'il est possible, présente pourtant des caractéristiques spécifiques. Quand l'amplitude du signal est répartie autour d'une valeur moyenne selon une distribution de probabilité gaussienne, un tel bruit est dénommé bruit blanc gaussien.

Revenons à notre radio : nous continuons à écouter le bruit et agissons sur le bouton qui règle l'intensité des graves et des aigus ; le son est un bruissement uniforme, mais varie néanmoins selon le réglage.

Comme n'importe quel signal, le bruit peut être décomposé en composantes sinusoïdales de fréquences différentes ; le réglage des graves et des aigus filtre ces composantes. Par exemple, lorsque nous augmentons les graves, les composantes du signal qui oscillent à fréquence élevée sont atténuées. La décomposition d'un signal en composantes sinusoïdales a été analysée par le mathématicien Fourier (voir l'article sur Jean-Baptiste Fourier dans *Les mathématiciens*, Bibliothèque Pour la Science).

Grâce à cette décomposition, on sait caractériser le «bruit blanc» : toutes les fréquences y sont présentes avec la même amplitude ; tout comme,

dans la lumière blanche, toutes les couleurs sont représentées avec une intensité égale.

Lorsque nous filtrons le bruit blanc, nous obtenons évidemment un bruit différent qui est dénommé «coloré». Un bruit de type gaussien est caractérisé par sa densité spectrale, une fonction qui exprime la répartition de la puissance du signal entre les différentes fréquences. La densité spectrale du bruit blanc est constante, tandis que le spectre du bruit blanc filtré décroît avec la fréquence.

Nombre de phénomènes physiques engendrent du bruit, et un grand nombre d'entre eux produisent un bruit (à peu près) blanc, quelques-uns des bruits colorés. Un bruit coloré particulièrement important est le bruit «en $1/f$ ». Dans ce bruit, la puissance associée à une composante de Fourier de fréquence f est inversement proportionnelle à f , et la densité spectrale présente un aspect particulièrement simple lorsqu'elle est représentée sur un graphique avec une échelle doublement logarithmique : la densité spectrale en fonction de la fréquence est une droite de pente -1 .

Dans d'autres bruits colorés similaires au bruit en $1/f$, dénommés bruits de scintillation, la puissance associée à une composante de Fourier de fréquence f est inversement proportionnelle à f^a (a étant compris entre 0,5 et 1,5). Comme dans le cas du bruit en $1/f$, la densité spectrale, lorsqu'elle est représentée sur une échelle doublement logarithmique, est une droite, mais la pente est égale à $-a$.

La première observation sur le bruit en $1/f$ remonte à 1925 : le physicien J. Johnson découvrit son existence en étudiant les fluctuations de

courant dans l'émission thermionique des tubes à vide. En 1926, W. Schottky essaya de l'interpréter théoriquement et, en 1936, C. Christenson et G. Pearson l'ont observé dans des microphones et dans des résistances au carbone. Un circuit où l'on mesure le bruit en $1/f$ est le circuit illustré sur la partie droite de la figure 5 : on observe une telle fluctuation de tension aux extrémités de l'une des deux résistances (c'est aussi une fluctuation de courant ou une fluctuation de la résistance R_c). Au cours d'expériences menées avec des résistances à film mince, le bruit mesuré est presque exactement un bruit en $1/f$, et ce, sur au moins six ordres de grandeur (voir la figure 3).

Ce type de comportement est quasi indépendant du matériau utilisé et, en fait, dépend surtout de l'épaisseur de la résistance (plus celle-ci est mince, plus le bruit en $1/f$ est caractérisé).

L'universalité du bruit en $1/f$

L'une des caractéristiques les plus étonnantes du bruit en $1/f$ est son universalité : il survient dans des dispositifs d'une extraordinaire variété. Ce fait fut mis en lumière par Benoît Mandelbrot au cours des années 1970, dans le cadre de ses travaux sur les fractales. La liste, toujours incomplète, des phénomènes où apparaît un bruit en $1/f$ inclut les fluctuations de résistance des semi-conducteurs, le battement cardiaque, les courants dans les fibres nerveuses, le taux d'insuline dans le sang d'un diabétique, l'intensité des courants océaniques, le bruit sismique, les oscillations de l'axe terrestre, l'activité solaire (voir la figure 1 ci-contre), le débit du Nil au cours des 2 000 dernières

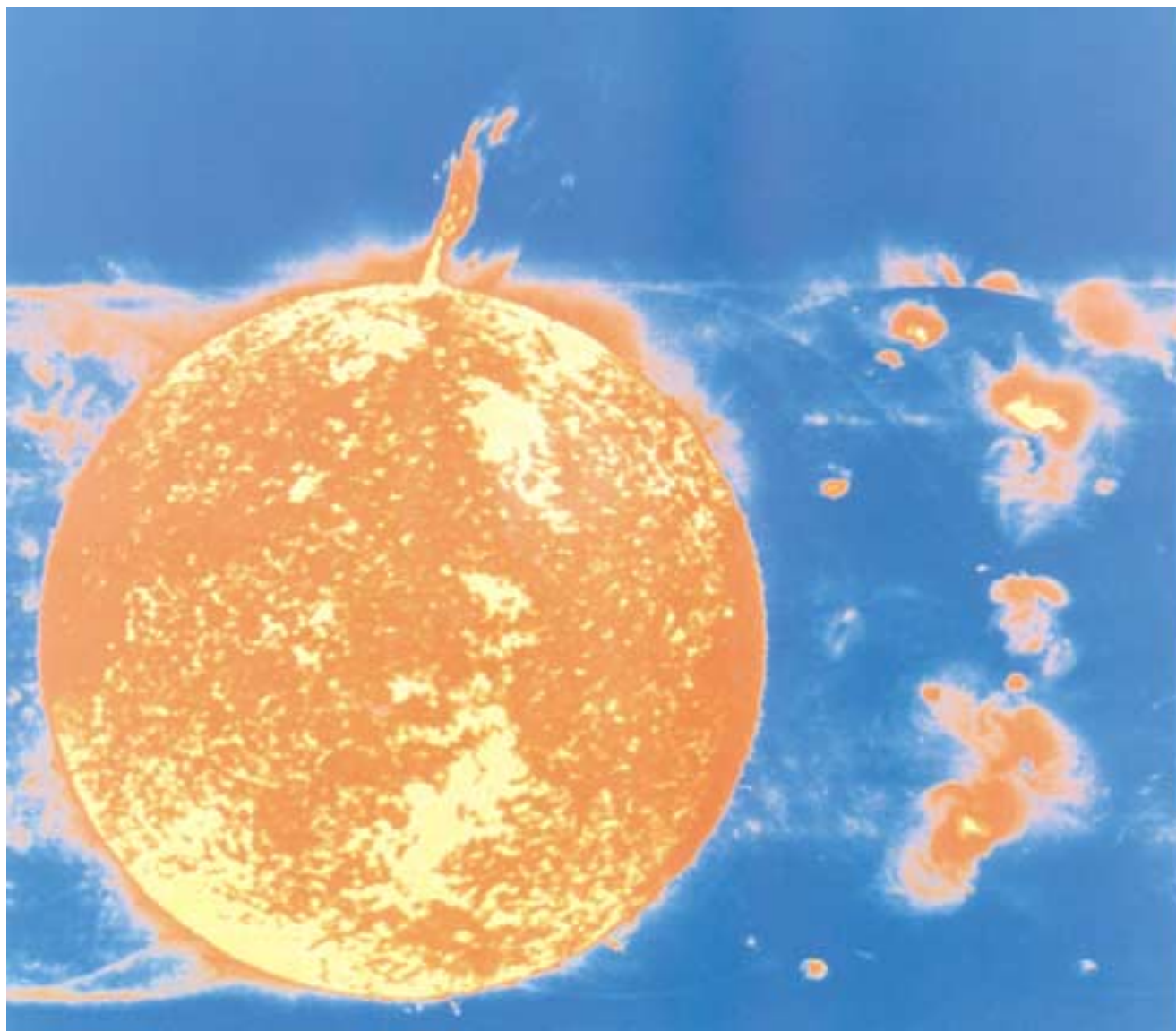
années, la lumière émise par les naines blanches, l'écoulement du sable dans un sablier, l'intensité des fluctuations du trafic routier, le courant dans les solutions ioniques, les jonctions Josephson et la lumière émise par les quasars.

Ces dernières années, la liste des phénomènes s'est enrichie de nom-

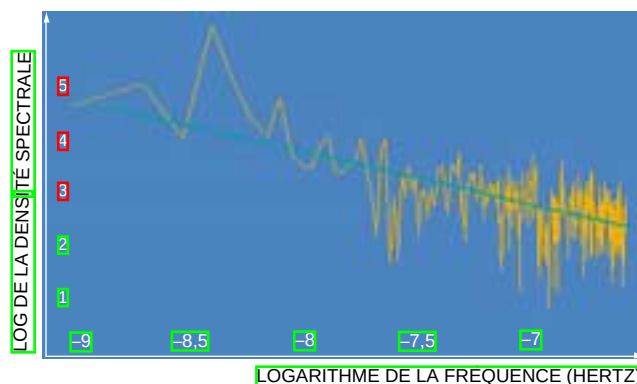
breux processus non linéaires. En outre, R. Voss et J. Clarke ont démontré que le son et la voix transmis par la radio ont également un spectre en $1/f$.

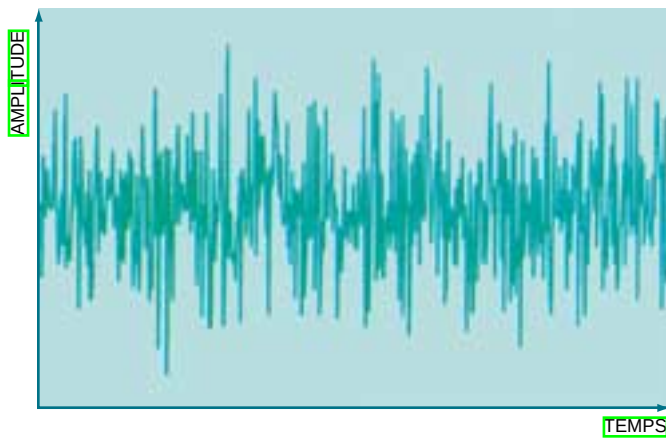
Les physiciens ont mis au point de nombreux modèles physiques pour expliquer l'apparition du bruit $1/f$, particulièrement dans les résistances et les semi-conducteurs. Il s'agit

principalement de modèles spécialisés, qui n'expliquent pas pourquoi le bruit $1/f$ apparaît dans de si nombreux processus différents. S'il existe une explication de cette universalité apparente du bruit $1/f$, celle-ci doit tenir compte de nombreuses autres observations expérimentales dont nous allons établir la liste.

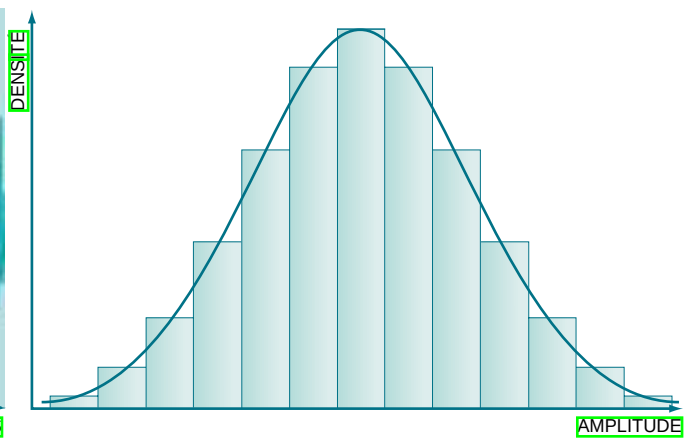


1. LE NOMBRE DES TACHES SOLAIRES varie avec une période d'environ onze ans. Pour mesurer l'activité solaire, on utilise le nombre de Wolf : M est le nombre de taches solaires réunies en G groupes de taches, visibles à un instant donné, alors le nombre de Wolf est égal à $R = 10 G + M$. L'illustration de droite représente la densité spectrale du nombre de Wolf mesurée entre janvier 1953 et août 1995. Le segment bleu représente un spectre en $1/f$: le nombre de Wolf présente un spectre proche de $1/f$. Les oscillations rapides visibles surtout aux fréquences élevées sont dues aux fluctuations statistiques, tandis que le pic visible aux basses fréquences correspond à la périodicité de 11 années. La photographie, prise avec le spectroscopie installé à bord du satellite *Skylab*, représente la lumière émise par la surface du Soleil.





2. BRUIT BLANC gaussien (amplitude du signal en fonction du temps). Pour obtenir cette représentation, on a échantillonné 500 fois un processus qui engendre un bruit blanc : la caractéristique principale de ce type de bruit est qu'il ne possède pas de mémoire, dans le sens



où l'amplitude de chaque partie est totalement indépendante de l'amplitude des échantillons précédents. En outre, les amplitudes sont réparties autour de leur valeur moyenne selon une densité de probabilité gaussienne.

(a) Le bruit en $1/f$ est presque toujours gaussien. Cela semble indiquer que ce bruit résulte de la superposition de nombreux processus élémentaires indépendants et semble exclure des mécanismes non linéaires.

(b) Le bruit en $1/f$ est stationnaire : ses caractéristiques moyennes restent constantes dans le temps.

(c) En général, on n'observe pas d'aplatissement du spectre à basses fréquences. Des observations précises du bruit en $1/f$ dans les semi-conducteurs montrent qu'il s'étend jusqu'aux fréquences les plus basses observables en laboratoire (environ 10^{-7} hertz).

(d) Enfin, il est rare que l'on observe expérimentalement des densités spectrales qui soient exactement du type $1/f$. Il est bien plus fréquent de rencontrer des spectres du type $1/f^a$, avec a compris entre 0,8 et 1,4.

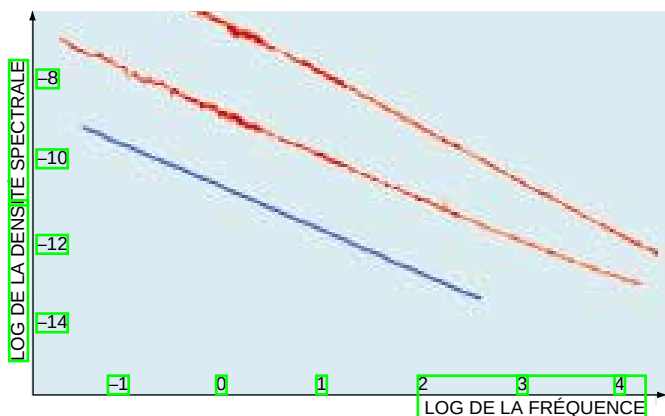
Il convient d'ajouter que, dans un système physique où l'on peut

associer une puissance (et donc une énergie) à l'amplitude du bruit, un «vrai» bruit en $1/f$ présente une caractéristique indésirable. La puissance totale, somme de la puissance associée à chaque composante de Fourier, est infinie.

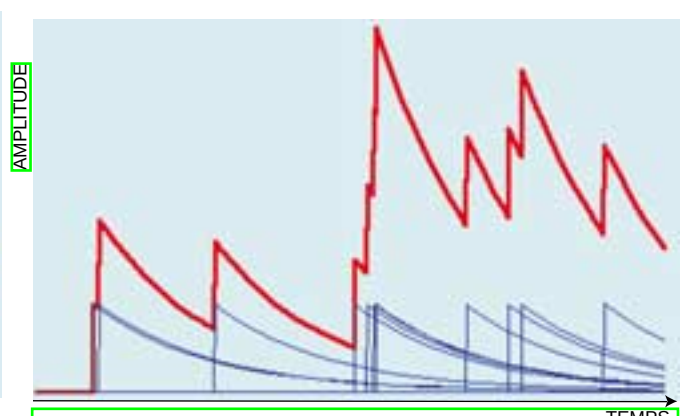
Pour mieux comprendre, prenons d'abord le cas d'un bruit blanc : ses composantes de Fourier ont toutes la même puissance, indépendante de la fréquence, et donc la puissance totale d'un bruit blanc est infinie. En réalité, il n'existe aucun bruit qui soit véritablement blanc, et la puissance ne peut être constante que jusqu'à une certaine fréquence maximale. En effet, des fréquences très élevées ne sont possibles que dans des systèmes physiques qui répondent aux sollicitations de manière extrêmement rapide. Tôt ou tard, l'inertie d'un système physique intervient et la densité spectrale s'annule.

Un phénomène analogue survient pour le bruit en $1/f$, mais, pour les mêmes raisons, il n'y a pas, là non plus, matière à inquiétude. La difficulté associée au bruit en $1/f$ est que la densité spectrale croît de manière indéfinie lorsque la fréquence tend vers zéro, et, pour cette raison, la puissance totale tend vers l'infini. Malheureusement, dans ce cas, aucune raison physique ne vient à notre secours pour éliminer la difficulté.

Dans les systèmes physiques observables, l'énergie totale (et donc la puissance) est finie, ce qui interdit un véritable bruit en $1/f$, tout comme un véritable bruit blanc. À des fréquences suffisamment basses, nous devrions observer un aplatissement de la densité spectrale d'un bruit en $1/f$, de manière que le bruit produit par le système redevienne là un bruit blanc et que la puissance totale reste finie.



3. DENSITES SPECTRALES DES FLUCTUATIONS DE TENSION mesurées sur deux résistances à film mince (en rouge), une en bioxyde d'iridium et à une température de 556 K et l'autre en ruthénium à 300 K. Les spectres expérimentaux sont voisins d'un spectre en $1/f$ (en bleu) dans une région qui couvre six ordres de grandeur.



4. DE NOMBREUX SYSTEMES physiques reviennent à l'équilibre selon une décroissance exponentielle. Lorsqu'un tel système physique est excité par une succession d'impulsions brèves et aléatoires, la courbe de réponse globale (rouge) est donnée par la somme des réponses exponentielles (bleu). Le bruit associé est en $1/f^2$.

Enfin, pour satisfaire le critère d'universalité, l'explication mathématique ne doit faire référence à aucun modèle physique spécifique.

Voyons à présent comment on peut engendrer un bruit de type $1/f$. On part de deux constatations : la première est qu'il est facile de réaliser un générateur de bruit blanc ; la seconde, est qu'il existe dans la nature un grand nombre de systèmes physiques qui peuvent se « charger » d'une manière ou d'une autre et qui, ensuite, se déchargent lentement selon une loi de type exponentiel.

Bruit blanc, bruit en $1/f^2$ et constitution du bruit en $1/f$

Une succession de brèves impulsions qui apparaissent aléatoirement et indépendamment correspond à un bruit blanc ; nous pouvons utiliser chaque impulsion pour charger un système physique qui se décharge de manière exponentielle. Les décharges individuelles associées à chaque impulsion s'additionnent pour constituer une courbe de réponse globale. Le système physique avec décharge exponentielle a transformé le bruit blanc en un bruit différent, et l'on démontre que ce nouveau bruit présente une densité spectrale de type $1/f^2$. Ce résultat semble prometteur

puisque, en envisageant un processus aléatoire très simple, nous sommes « presque » arrivés au bruit en $1/f$. Toutefois, le passage du bruit en $1/f^2$ au bruit en $1/f$ est assez difficile, parce qu'il existe une hypothèse additionnelle très forte et difficilement justifiable : la courbe de décharge doit être variable, comme si les caractéristiques du système étaient changées d'une impulsion à l'autre.

Un système physique idéalisé (proposé par l'auteur) comme celui de la figure 7 présente justement des courbes de décharges différentes d'un moment à l'autre. Le système est constitué de divers éléments tous identiques, qui peuvent être chargés comme ils l'étaient précédemment et qui se déchargent toujours tous de la même manière. Certains éléments communiquent, entre eux et avec l'extérieur, de sorte que les impulsions proviennent tant de l'extérieur que d'un autre nœud en train de se décharger. En outre, on suppose que les liaisons entre les nœuds sont perturbées par un bruit blanc et que la charge est transférée d'un nœud à l'autre de manière partiellement aléatoire. Le nombre de liaisons entre un nœud et ses voisins peut être variable, tout comme l'importance de la liaison peut être plus ou moins grande, dans le sens où le transfert de charge

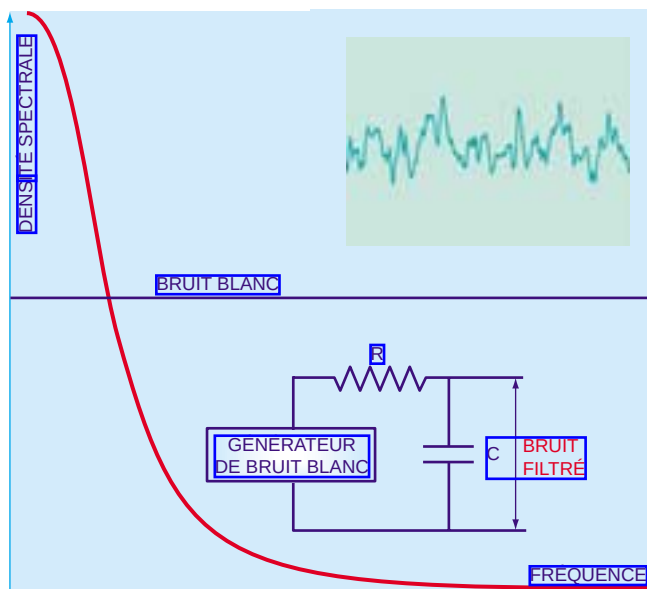
peut survenir plus ou moins facilement (mais ces deux dernières caractéristiques ne sont pas essentielles).

Une mémoire physique

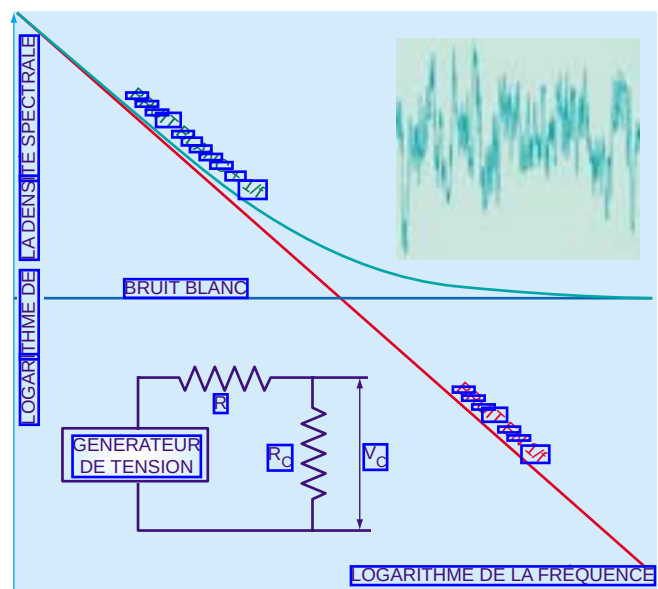
Il est évident qu'un système de ce genre se souvient, du moins en partie, de son propre passé : en effet, lorsqu'un nœud se décharge et, ce faisant, charge son voisin, il peut ensuite être chargé à son tour par ce même voisin. Son état dépend ainsi de son passé. Pour cette raison, même si les nœuds individuels se déchargent toujours de la même manière, le système se comporte globalement comme s'il présentait des temps de décharge différents.

On démontre qu'un réseau carré à deux dimensions produit un bruit en $1/f$, du moins dans une certaine bande de fréquences. En dehors de cette bande, la densité spectrale s'aplatit pour les fréquences très basses, tandis qu'elle acquiert une progression de type $1/f^2$ pour les fréquences hautes. Ce comportement est souhaitable, parce qu'il évite les divergences, tant aux basses qu'aux hautes fréquences.

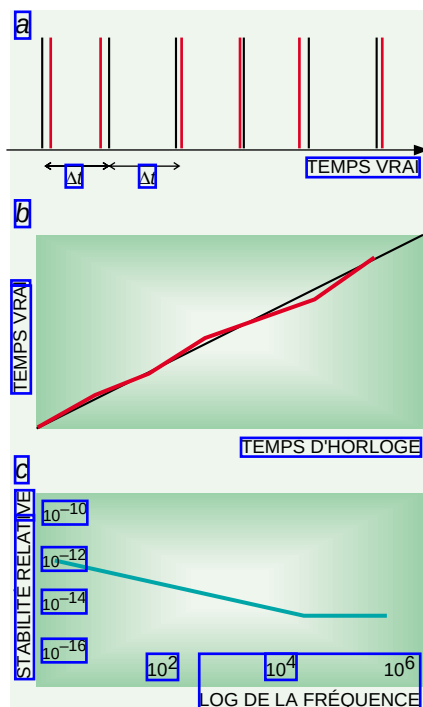
Bien évidemment, l'échange de charge dans les deux sens entre les nœuds adjacents est d'autant plus efficace pour l'établissement d'une



5. DENSITÉ SPECTRALE DU BRUIT BLANC APRES FILTRAGE par un filtre passif RC (en rouge à gauche). Les oscillations plus rapides (associées aux composantes de Fourier à hautes fréquences) ont disparu. À l'aide d'un simple circuit électrique (à droite), on obtient une fluctuation en $1/f$ de la tension aux extrémités d'une résistance. La densité spectrale des fluctuations de tension est représentée sur la courbe verte (échelle doublement logarithmique) ;



elle peut être décomposée en deux contributions : l'une blanche, due au bruit Johnson et une contribution $1/f$ qui n'apparaît qu'à des fréquences extrêmement basses. En haut à droite, on voit comment se présente un bruit qui présente un spectre de type $1/f$ sur l'écran d'un oscilloscope. Contrairement au bruit blanc, un processus physique qui produit ce type de bruit se souvient au moins en partie de son histoire.



6. UNE HORLOGE EXACTE donne des impulsions à intervalles réguliers, comme ceux indiqués en noir (a). Les horloges réelles sont perturbées par des signaux de bruit et donnent des impulsions à intervalles irréguliers, comme indiqué en rouge. La courbe en rouge (b) compare le temps que nous mesurons avec une horloge réelle et le temps réel. Quand le bruit qui perturbe l'horloge est un bruit blanc, la courbe oscille rapidement autour de la droite ; si notre mesure dure suffisamment longtemps, ces oscillations rapides s'annulent : l'erreur relative sur le temps mesuré devient toujours plus petite. Si, toutefois, le bruit est de type $1/f$, l'allongement de la durée de la mesure introduit alors une quantité de bruit toujours plus importante : les deux effets se compensent, et donc une extension de la durée de la mesure n'implique aucun accroissement de la précision. Cet effet est illustré en c : la stabilité relative en fréquence d'une horloge atomique au césium augmente avec le temps pendant lequel on calcule la moyenne des erreurs aléatoires, étant donné que c'est le bruit blanc qui limite initialement la précision de la mesure. À partir d'un certain point, le bruit en $1/f$ prédomine et la stabilité relative reste constante.

«mémoire» que la sortie de la charge du système est difficile. On démontre en effet que la largeur en $1/f$ de la région centrale de la courbe est d'autant plus grande que le système se rapproche d'un système fermé. D'autres réseaux (ordonnés et désordonnés) de connectivités diverses manifestent le même comportement général, et la progression de la zone centrale est du type $1/f^a$, avec a compris entre 0,5 et 1,5.

Mesures de précision

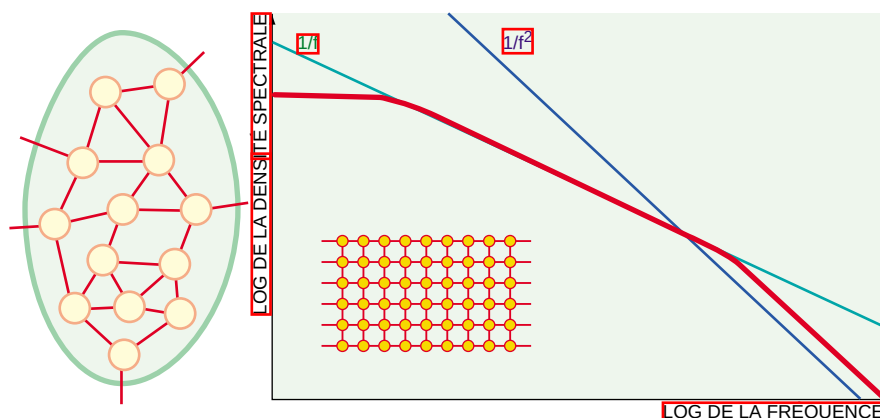
Même les appareils de mesure, tant mécaniques qu'électriques, sont perturbés par le bruit en $1/f$, et ce phénomène entraîne des conséquences importantes dans le cas des mesures de précision ; prenons pour exemple la mesure précise du temps.

Si une horloge était parfaite, elle délivrerait des impulsions à des intervalles fixes ; en réalité, les horloges sont per-

turbées par des bruits et délivrent des impulsions à des intervalles irréguliers. La stabilité relative d'une horloge est mesurée par la variation du nombre d'impulsions qu'elle fournit dans un intervalle de temps donné. Si le bruit qui perturbe une horloge est un bruit blanc, alors le nombre d'impulsions peut varier fortement sur des intervalles courts ; cependant, quand la longueur de l'intervalle temporel augmente, les erreurs tendent à se compenser et à s'annuler ; dès lors, l'horloge est plus précise sur de longues périodes que sur des périodes courtes. Quand la durée de la mesure augmente, l'erreur relative pendant le temps mesuré diminue.

Si, toutefois, le bruit est de type $1/f$, lorsque l'on augmente la durée de la mesure, on introduit simultanément une quantité de bruit toujours plus grande. Les deux effets se compensent, et l'allongement de la durée de la mesure n'améliore rien. Ainsi, la stabilité d'une horloge de précision croît à mesure qu'augmente le temps sur lequel on calcule la moyenne des erreurs aléatoires, parce que c'est le bruit blanc qui limite la précision de la mesure. À partir d'un certain point, toutefois, le bruit en $1/f$ devient prépondérant et la stabilité relative reste constante (voir la figure 6).

Si l'on considère l'ubiquité du bruit en $1/f$ et l'impossibilité de l'éliminer dans des systèmes mécaniques et électroniques de mesure, il est évident que analyses du même type peuvent être étendues à d'autres types de mesures de précision, et le bruit en $1/f$ constitue ainsi plus qu'une simple curiosité : il est à même d'exercer une influence profonde sur notre capacité à connaître la Nature avec précision.



7. RESEAU où les nœuds peuvent interagir (des «charges» peuvent être transférées de l'un à l'autre et, pour certains, avec l'extérieur). Le trait vert divise l'«intérieur» et l'«extérieur» du système. Le nombre de liaisons entre un nœud et ses voisins est variable, et la force de cette liaison peut être plus ou moins grande. La «charge» est une charge électrique, ou une quantité de fluide, ou autre chose encore : le modèle est générique et ne se réfère à aucun système physique particulier. La courbe rouge dans la figure de droite indique la densité spectrale que l'on obtient pour un réseau carré à deux dimensions tel que celui illustré en bas à gauche lorsque la «charge» qui entre dans le système est équilibrée par celle qui en sort. La région centrale de la densité spectrale est exactement du type $1/f$, tandis qu'elle s'aplatit aux basses fréquences et devient de type $1/f^2$ aux hautes fréquences. L'extension de la région du type $1/f$ dépend des caractéristiques d'entrée et de sortie du réseau : plus il est difficile d'entrer ou de sortir du réseau, plus la région en $1/f$ est étendue.

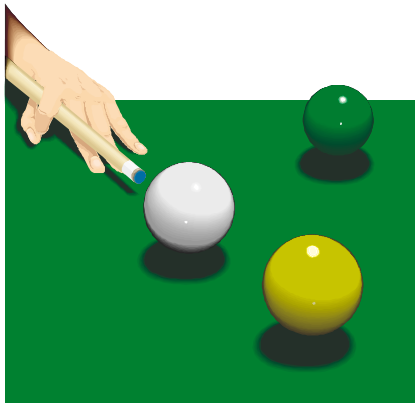
Edoardo MILOTTI est chercheur à l'Université de Trieste.

H. William PRESS, *Flicker Noises in Astronomy and Elsewhere*, in *Comments on Astrophysics*, n° 7, pp. 103-119, février 1978.

M.B. WEISSMAN, *1/f Noise and other Slow, Nonexponential Kinetics in Condensed Matter*, in *Review of Modern Physics*, n° 60, pp. 537-571, avril 1988.

W.E. ITANO et N.F. RAMSEY, *La misura precisa del tempo*, in *Le Scienze*, n° 301, p. 36, septembre 1993.

Edoardo MILOTTI, *Linear Processes that Produce 1/f or Flicker Noise*, in *Physical Review*, E51, pp. 3087-3103, avril 1995.



La pratique du billard

REGIS PETIT

La connaissance des lois de la physique assure une pratique raisonnée et plus sûre. Elle détermine et explique les réglages utilisés par le joueur.

Il existe plusieurs types de billards. Le billard du mathématicien est un billard puissamment idéalisé où les billes sont des points, où les frottements n'existent pas, et où les lois de rebond sont celles de l'optique. Ce billard, dit le physicien, n'a pas de réalité. Le physicien imagine un billard moins idéalisé, où les frottements influent sur la trajectoire des billes, mais il n'a pas l'intelligence «du bout des doigts» du praticien. Nous allons examiner ici comment les règles physiques et mathématiques nous aident à pratiquer ce noble jeu.

Le jeu de billard actuel existe depuis environ un siècle et rassemble de plus en plus d'adeptes, en particulier le billard français ou «carambole» qui se joue avec trois billes et selon cinq spécialités : partie libre, jeux de cadre, jeu par une bande, jeu par trois bandes, billard artistique. L'une d'elles, le «trois bandes», s'est développée à l'étranger, principalement aux États-Unis et au Japon ; les échanges sur Internet, notamment dans le groupe «rec.sport.billiard», sont riches d'enseignements.

Le billard est avant tout un jeu de pratique, fondé sur la connaissance et la maîtrise d'un certain nombre de techniques (par exemple, le «rétro», le «coulé», le «massé», etc.) et de tactiques (par exemple, le «placement», le «rap-

pel», l'«amorti», etc.). La théorie du billard est fondée uniquement sur la mécanique du solide. Le premier traité théorique sur la mécanique des effets du jeu de billard est à notre connaissance celui de G.G. Coriolis, publié en 1835. D'autres traités ont ensuite suivi, tant en France qu'à l'étranger. Entre ces deux approches, l'une très pratique et l'autre très théorique, rares sont les ouvrages qui font le lien ou la synthèse. Est-il vraiment possible d'aborder la pratique du billard sous l'angle de la mécanique et des mathématiques ? Existe-t-il une «pratique raisonnée» du billard ? Dans mon livre récemment paru (voir la bibliographie), et dont cet article est inspiré, les lecteurs intéressés trouveront les justifications mathématiques des affirmations présentées ici.

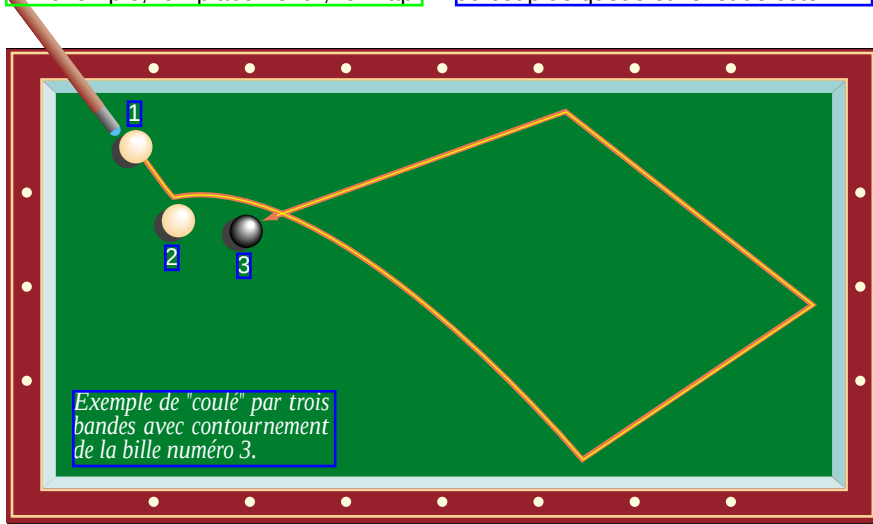
Pour répondre à la question : «Comment utiliser les connaissances de mécanique ?», nous prendrons pour exemple la réalisation d'un «coulé» par trois bandes avec contournement de la bille numéro 3. L'objectif est de choquer la bille numéro 2 avec la bille numéro 1, puis de contourner la bille numéro 3, de faire le tour du billard en choquant successivement les trois bandes, et enfin de faire le point sur la bille numéro 3. Pour ce coup, quatre réglages suffisent, la hauteur d'attaque, la quantité de bille, la force du coup de queue et l'effet de côté.

RÉGLAGE DE LA HAUTEUR D'ATTAQUE

Le premier réglage que doit maîtriser tout joueur de billard est ici la hauteur d'attaque prise sur la bille numéro 1. Trois possibilités sont offertes *a priori* au joueur : attaque plus ou moins basse ; plus ou moins haute ; très haute. L'objectif à atteindre est de choquer la bille numéro 2, puis la grande bande située derrière cette bille. La mécanique du mouvement des billes nous enseigne que, après un choc entre deux billes, la trajectoire de chaque bille est une courbe parabolique, suivie éventuellement d'un segment de droite. Pour obtenir une courbe dont la concavité est tournée vers l'avant et qui frappe la grande bande avant la petite, il faut animer la bille numéro 1 d'une forte rotation en avant pour que cette bille puisse se rabattre le plus rapidement possible vers la grande bande, après le choc entre billes. En pratique, cela s'obtient par une attaque très haute de la bille numéro 1. Le pourquoi de cette attaque haute est esquissé sur la figure ci-contre (voir *Choc frontal* et *Choc oblique de deux billes*).

RÉGLAGE DE LA QUANTITÉ DE BILLE

Le second réglage à maîtriser est ici la quantité de bille prise sur la bille numéro 2. À nouveau, trois possibilités sont offertes au joueur : 1/2 bille ; 3/4 bille ; presque plein. L'objectif est de contourner la bille numéro 3 après le choc sur la bille numéro 2. La mécanique des chocs entre deux solides nous apprend que, juste après un choc parfaitement élastique entre une bille mobile et une bille immobile de même masse, la bille mobile rebondit toujours en suivant la tangente au point de choc. Pour éviter au maximum la bille numéro 3, il faut donc relever cette tangente le plus possible, tout en gardant suffisamment de vitesse pour choquer ensuite les trois bandes. En pratique, le 1/2 bille ne relève pas suffi-



CHOC FRONTAL DE DEUX BILLES

attaque très haute

Pour une attaque très haute (coulé), la bille tourne plus vite qu'elle n'avance. Au point de contact avec le tapis, la vitesse de glissement de la bille 1 est dirigée vers l'arrière (a), et la force de frottement, opposée à cette vitesse, est dirigée vers l'avant. Cette force accélère alors le mouvement de translation de la bille 1 vers l'avant. Lors du choc frontal (b), l'énergie de translation de la bille 1 est intégralement transmise à la bille 2, la bille 1 conservant son énergie de rotation. Les deux billes se déplacent ensuite en tournant vers l'avant (c).

(a)

frottement

(b)

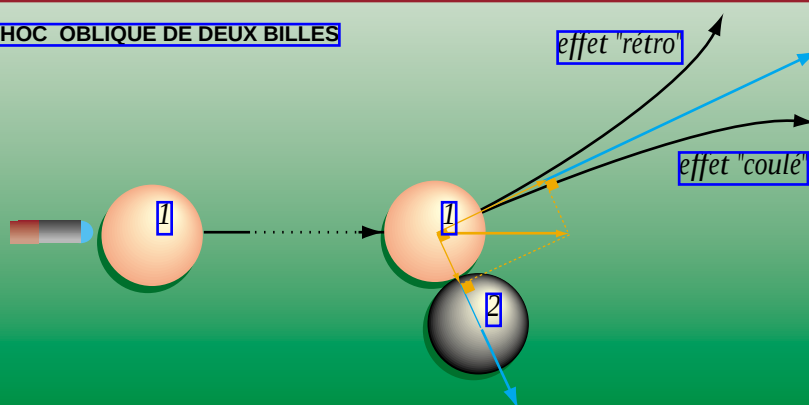
La bille 1 et la bille 2 se déplacent en tournant

(c)

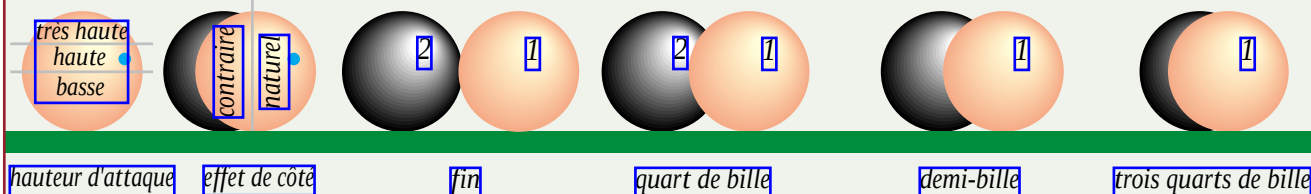
transfert du mouvement de translation

CHOC OBLIQUE DE DEUX BILLES

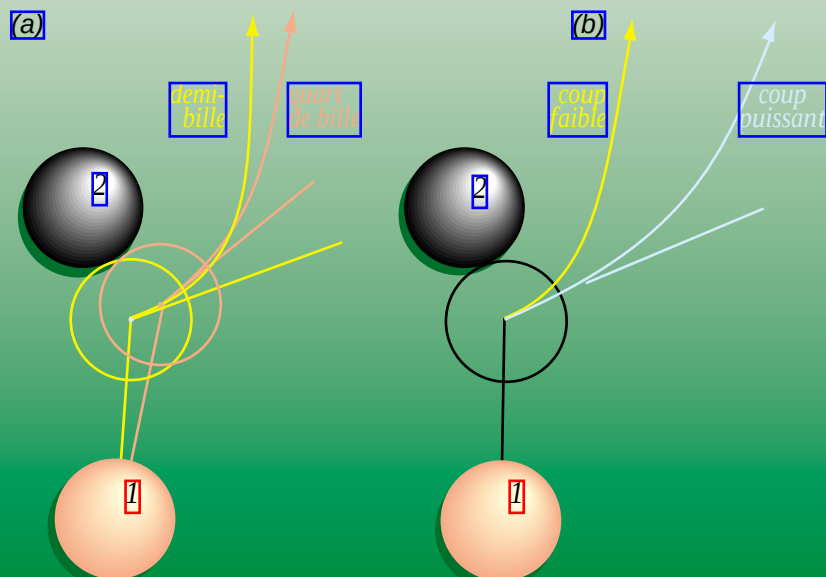
Après un choc oblique, les trajectoires des deux billes sont initialement perpendiculaires (à cause de la conservation de la quantité du mouvement lors du choc élastique). La trajectoire horizontale de la bille 1 est parallèle à la tangente au point de choc entre les deux billes. Selon la rotation de la bille 1 juste avant le choc, on obtient soit un effet rétro soit un effet coulé, qui incurvent la trajectoire de la bille 1.



ATTAQUE DE LA BILLE 1 ET QUANTITÉ DE BILLE PRISE SUR LA BILLE 2

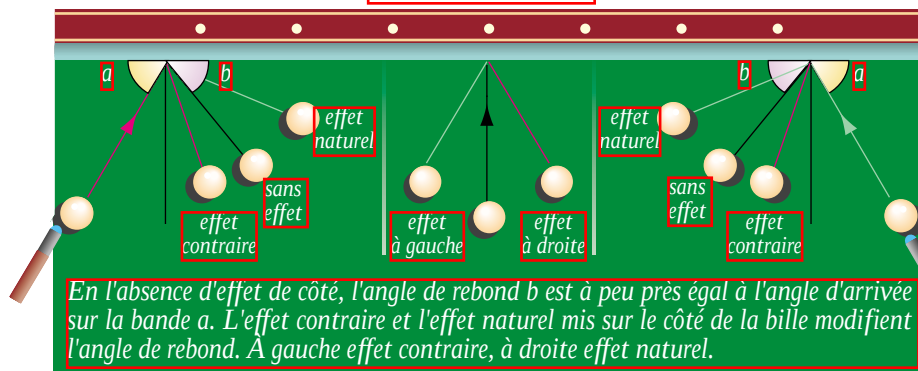


INFLUENCE DE LA QUANTITÉ DE BILLE ET DE LA PUISSANCE DU COUP



(a) La tangente au point de choc entre billes dépend de la quantité de bille (fin, quart de bille, demi bille, trois quarts de bille) prise sur la bille 2 (en noir). Plus on choque plein la bille 2, plus la tangente tourne vers le joueur.
(b) La puissance du coup ne change pas la tangente au point de choc, mais allonge plus ou moins la trajectoire le long de cette tangente.

REBOND SUR LA BANDE



samment la tangente. Le presque plein permet bien d'éviter la bille numéro 3, mais amortit trop la bille numéro 1 sur la bille numéro 2. Un bon compromis consiste à prendre une quantité de bille égale à environ 3/4 bille.

RÉGLAGE DE LA FORCE DU COUP DE QUEUE

Le troisième réglage à maîtriser est ici la force du coup de queue, qui détermine la vitesse de la queue au moment du choc sur la bille numéro 1. Trois possibilités sont encore offertes au joueur : coup de queue faible ; moyen ; fort. L'objectif est de minimiser les risques de collision lors du contournement de la bille numéro 3. Nous avons vu précédemment que la bille numéro 1 rebondit sur la bille numéro 2 en suivant la tangente au point de choc. Pour éviter la bille numéro 3, la bille numéro 1 doit suivre cette tangente le plus longtemps possible. Cela s'obtient par un coup de queue puissant.

RÉGLAGE DE L'EFFET DE CÔTÉ

Le quatrième réglage est ici l'effet de côté mis sur la bille numéro 1. Trois possibilités sont encore offertes *a priori*

au joueur : effet de côté naturel ; nul ; contraire. L'objectif est de régler correctement le rebond de la bille numéro 1 sur la première bande choquée, afin de faire le point en trois bandes sur la bille numéro 3. La mécanique nous enseigne que, juste après un choc contre une bande, la bille numéro 1 rebondit différemment selon l'effet de côté mis sur la bille (voir la figure en haut de la page).

Juste avant ce choc, la vitesse de translation de la bille se décompose en une vitesse tangentielle et une vitesse perpendiculaire à la bande. Que se passe-t-il alors juste après le choc ?

Sans effet de côté, la vitesse perpendiculaire qui est rendue par la bande est diminuée par l'élasticité imparfaite de la bande ; la vitesse tangentielle est fortement diminuée par le frottement de la bille sur la bande. Ces deux paramètres déterminent l'angle de la vitesse de translation de la bille numéro 1 avec la bande.

Avec un effet de côté naturel, la bille frotte beaucoup moins au moment du choc contre la bande. La seule modification par rapport au cas précédent concerne la vitesse tangentielle rendue par la bande, qui devient supérieure. La vitesse de translation de la bille

numéro 1 fait alors un angle plus petit avec la bande.

En pratique, pour faire le point en trois bandes sur la bille numéro 3, l'expérience montre qu'il faut mettre un peu d'effet de côté naturel sur la bille numéro 1.

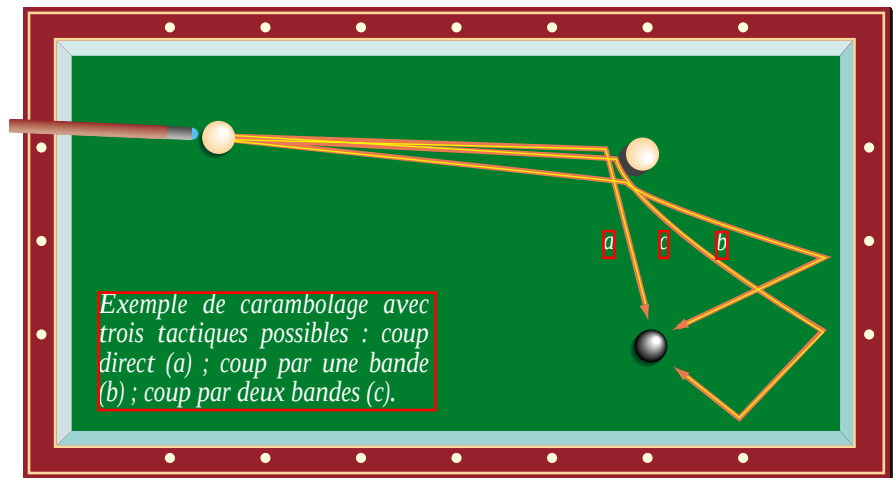
Assemblons maintenant les différents réglages à réaliser : attaque très haute (pour ramener la bille numéro 1 vers la grande bande derrière la bille numéro 2) ; quantité de bille égale à 3/4 bille (pour contourner la bille numéro 3 sans trop amortir la bille numéro 1 sur la bille numéro 2) ; coup de queue puissant (pour minimiser les risques de collision pendant le contournement) ; effet de côté naturel (pour faire le point en trois bandes sur la bille numéro 3). N'est-ce pas là une « pratique raisonnée » correspondant à notre coup complexe ?

Que se passe-t-il pour un autre coup ? Y a-t-il d'autres réglages à maîtriser ? Oui. Trois autres réglages importent. Le cinquième réglage est l'inclinaison de la queue par rapport au tapis, qui permet d'exécuter des « massés », des « piqués » et des sauts de bille ; le sixième réglage est la masse de la queue, qui permet d'« alléger » plus ou moins le coup de queue et d'attaquer la bille plus près de son bord. Le septième et dernier réglage est le plus important de tous. Il concerne le choix de la meilleure tactique à adopter pour réussir le carambolage lorsque plusieurs solutions sont envisageables.

CHOIX DE LA MEILLEURE TACTIQUE

Prenons un exemple à la partie libre (voir la figure en bas de cette page). L'objectif est de réussir le carambolage, c'est-à-dire de toucher avec la bille numéro 1 les deux autres billes, en passant ou non par les bandes. Trois possibilités sont offertes *a priori* au joueur : coup direct ; coup par une bande ; coup par deux bandes. La mécanique nous apprend que, lorsque la bille numéro 1 roule sans glisser sur le tapis juste avant le choc sur la bille numéro 2, il suffit de choquer la bille numéro 2 avec une quantité de bille égale à 1/2 bille pour toujours faire dévier la bille numéro 1 d'un angle final égal à 40 degrés environ ; cette déviation finale est de plus très peu sensible à une erreur de quantité de bille autour de ce 1/2 bille. Quelle aubaine ! Il suffit donc ici de choisir cette quantité de bille particulière et de jouer en deux bandes pour assurer sans risque le carambolage.

Les deux autres tactiques sont-elles aussi fiables ? Le coup par une bande nécessite une quantité de bille proche du fin, et donc une extrême précision dans la visée, ce qui est très risqué en pratique.



Le coup direct demande une rotation arrière de la bille numéro 1 associée à une quantité de bille précise et, compte tenu de la distance élevée entre billes, un coup de queue de puissance donnée pour conserver cette rotation arrière au moment du choc entre billes ; ce qui est encore plus risqué. En pratique, c'est la tactique robuste en deux bandes qui est choisie par le joueur : attaque haute (pour mettre la bille numéro 1 en roulement sans glissement sur le tapis), quantité de bille proche du 1/2 bille (pour obtenir la déviation de 40°), coup de queue faible (pour ne pas disperser les trois billes), effet de côté à doser (pour régler le rebond sur la première bande et faire le point en deux bandes sur la bille numéro 3). N'est-ce pas là encore une «pratique raisonnée» correspondant à la situation présente du jeu ?

Pratique et théorie sont deux approches complémentaires, sans que la théorie puisse un jour remplacer la pratique. Seule la pratique, en effet, permet de progresser sur le plan de la régularité des performances. La théorie a plutôt une vertu pédagogique : elle permet de comprendre et de faire comprendre à autrui les réglages utilisés par le joueur. Pratique et théorie cohabitent ainsi en une «pratique raisonnée» du billard, et continueront de fasciner à la fois les joueurs et les théoriciens.

Régis PETIT est ingénieur-chercheur à la Direction Études et Recherches d'EDF, à Chatou. Les personnes intéressées par la justification des affirmations de cet article pourront lire son ouvrage : R. PETIT, *Théorie du jeu*, Chiron-Casteilla, 1997.

Sur le site Internet de *Pour la Science* vous pouvez consulter le glossaire franco-anglais des termes du billard et le détail des considérations mécaniques du billard. «rec.sport.billiard» est un des groupes de discussion sur l'Usenet.

G.G. CORIOLIS, *Théorie mathématique des effets du jeu de billard*, Éditions Jacques Gabay, 1990 (réimpression du livre original, Paris, 1835).

J.H. KOEHLER, *The Science of Pocket Billiards*, Sportology Publications, Laguna Hills, California, 1995.

W.C. Marlow, *The Physics of pocket Billiards, mast*, Palm Beach Gardens, Florida, 1995.

J.P. PÉREZ, *Mécanique : points matériels – solides – fluides*, Masson, 1995.

R. RUGÈRE, *Traité de billard*, Leymarie, 1988.

R. Shepard, *Amateur Physics for the Amateur Pool Player (APAPP)*, 3^e édition, 1997, disponible gratuitement sur le site Internet de Mark Avlon (<http://www.accessone.com/~mavlon/>)



Les fractions et leurs mystères

JEAN-PAUL DELAHAYE

Divisez, divisez, il en restera toujours quelque chose.

Les fractions nous sont familières ? Erreur : nous les connaissons mal. Nous savons les simplifier $100/500 = 10/50 = 1/5$, $12/18 = 6/9 = 2/3$ (si le numérateur et le dénominateur sont divisibles par un même nombre entier, il faut effectuer la division, et cela jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de facteurs communs, excepté 1).

Nous savons faire des divisions $1/5 = 0,2$ et $2/3 = 0,666666...$ Là commencent les ennuis : la division ne tombe pas toujours juste, ce qui conduit à des suites infinies de décimales qu'on ne peut pas écrire toutes !

Cela est fort intéressant et peut nous entraîner très loin, y compris dans des problèmes encore non résolus. Com-

mençons par les fractions au développement décimal fini. Quelles sont-elles ?

Votre expérience vous l'a peut-être déjà fait deviner : les fractions ayant un développement décimal fini sont celles dont (une fois simplifiées) le dénominateur est un produit de 2 et/ou de 5, autrement dit de la forme $2^i 5^j$. Les fractions $9/16 = 0,5625$, $17/250 = 0,068$, $230/1250 = 0,184$ ont une écriture décimale finie, car $16 = 2 \times 2 \times 2 \times 2$, $250 = 2 \times 5 \times 5 \times 5$, $1250 = 2 \times 5 \times 5 \times 5 \times 5$.

Les nombres qui ont une écriture décimale finie sont bien sûr ceux qui, lorsqu'on les multiplie par une puissance de 10 assez grande, donnent des entiers : $0,23432$ multiplié par 10^5 donne 23 432.

Pour cela, il faut que le dénominateur soit composé uniquement de diviseurs de 10, c'est-à-dire un produit de 2 et de 5. Une fraction s'écrit de manière finie en base 10 si, après simplification, le dénominateur est de la forme $2^i 5^j$. Le nombre exact de décimales est le plus grand des deux entiers i et j . Si le dénominateur contient un autre facteur, alors l'écriture décimale est infinie : $5/12 = 0,41666666...$, $3/11 = 0,272727...$, $2/9 = 0,222222...$ etc.

Et dans une autre base de numération ? Une fraction simplifiée s'écrit de manière finie en base B si et seulement si tout facteur premier du dénominateur est aussi un facteur premier de la base B . Par exemple, $2/5$ en base 3, s'écrit : $0,101210210210210...$ Le développement est infini, car 5 n'est pas un facteur premier de 3. En base 9, $16/27$ s'écrit : $0,53$. C'est fini, car 27 n'a qu'un facteur premier : 3, qui est aussi un facteur premier de 9.

Des rappels d'arithmétique sont proposés dans la figure 1, et la méthode pour écrire un nombre entier ou réel en base B est expliquée à la figure 2.

Les développements infinis que nous avons écrits nous ont montré que l'écriture des fractions, lorsqu'elle n'était pas finie, était répétitive. Quelle est la période de cette répétition ?

1. SOUVENIRS D'ARITHMÉTIQUE

L'arithmétique n'est plus guère enseignée et peut-être avez-vous oublié ses merveilles (qui sont utiles dans le texte).

• **Nombre premier** : nombre divisible seulement par 1 et lui-même.

Exemples 2, 3, 5, 7, 11, 13.

Le nombre 9 n'est pas premier, car divisible par 3.

• **Facteurs premiers** : tout nombre entier s'écrit comme produit de facteurs premiers d'une seule façon : sa décomposition en facteurs premiers. Exemples : $100 = 2 \times 2 \times 5 \times 5$, $122 = 2 \times 61$, $99 = 3 \times 3 \times 11$.

• **Un nombre est un carré** si et seulement si sa décomposition en facteurs premiers ne comporte que des exposants pairs.

Exemple : $400 = 20^2 = 2^4 5^2$

• **Arithmétique modulaire** ou arithmétique modulo n . On compte comme avec les entiers, mais on soustrait ou on ajoute n autant de fois que nécessaire pour toujours se ramener à des nombres entre 0 et $n - 1$. Exemple : $12 = 3 \bmod 9$, $100 = 1 \bmod 9$ (car $100 = 11 \times 9 + 1$; donc, en enlevant 9, 11 fois de suite, on trouve 1)

• **Théorème de Bézout**. Si deux nombres a et b n'ont pas de facteurs communs, alors on peut trouver des entiers (positifs ou négatifs) tels que $aa' + bb' = 1$

(et donc tels que $aa' = 1 \bmod b$)



Faisons quelques tests :

$$7/33 = 0,212121212121212121...$$

$$7/13 = 0,538461538461538461...$$

(538461 se répète toujours)

Le phénomène n'est pas propre à la base 10. En base 3 : $1/2 = 0,111111...$, $1/5 = 0,012012012012012...$: toutes les fractions ont un développement en base 10 (ou autres) qui finit par se répéter, et réciproquement, si un nombre est périodique dans une base, c'est un rapport de deux entiers (et il est donc périodique dans toute base).

LES NOMBRES PÉRIODIQUES

Les nombres ayant un développement fini peuvent être vus comme des nombres ayant un développement périodique de période de longueur nulle. Nous adopterons ce point de vue quand nous parlerons de nombres périodiques. Nous adopterons aussi la notation $12,35[47]$ pour représenter le nombre périodique $12,3547474747...$ dont la séquence 47 se répète après le début 12,35.

Quelle est la fraction qui correspond au développement décimal périodique général : $a_1a_2...a_n, b_1b_2...b_m [c_1c_2...c_p]$, n chiffres devant la virgule, puis m chiffres, puis une partie de p chiffres qui se répètent sans cesse ? Le calcul montre que c'est la fraction :

$$\frac{a_1...a_n b_1...b_m / 10^{m+n} + c_1...c_p / 10^m (10^p - 1)}{10^m (10^p - 1)}$$

Par exemple : $12,3547474747... = 12,35[47] = 1235 / 100 + 47 / 9900 = 30578 / 2475$

$$\begin{aligned} 463,124558642642642642... &= \\ 463,124558[642] &= \\ 463124558 / 1000000 + 642 / 999000000 &= \\ = 38555119507 / 83250000 & \end{aligned}$$

Dans le cas d'une base B quelconque, le résultat est bien sûr obtenu en remplaçant 10 par la base B dans la formule ci-dessus.

Le fait est évident : lorsqu'on effectue une division, on finit toujours par retomber sur un reste obtenu précédemment (ce qui signifie que le quotient est périodique). Cela démontre que les fractions s'écrivent avec un développement périodique et que ce sont les seuls nombres ainsi : «être une fraction» est parfaitement équivalent à «avoir des chiffres périodiques».

On en déduit un résultat amusant d'algèbre infinie : si vous faites la somme, la multiplication ou la division de deux nombres périodiques (ce qui en théorie prendrait un temps infini, mais les mathématiciens ne s'arrêtent pas à de tels détails), le résultat est un développement périodique. Par exemple, si vous divisez l'un par l'autre deux nombres dont le développement est périodique, vous calculez le développement d'une fraction de

2. ÉCRITURE EN BASE B D'UN NOMBRE ENTIER

Six est entier vous le divisez par B , le reste vous indique son chiffre des unités en base B ; en recommençant avec le quotient, vous obtenez le chiffre suivant, etc.

Exemple : 123 en base 3

$$\begin{aligned} 123 &= 41 \times 3 + 0 && \text{donc } 0 \\ 41 &= 13 \times 3 + 2 && \text{donc } 2 \\ 13 &= 4 \times 3 + 1 && \text{donc } 1 \\ 4 &= 1 \times 3 + 1 && \text{donc } 1 \\ 1 &= 1 && \text{donc } 1 \end{aligned}$$

donc 123 s'écrit 11120 en base 3.

Si x n'est pas entier. Convertissez d'abord la partie devant la virgule en base B . Pour le reste, voici le procédé : multipliez par B ; ce qui se trouve alors devant la virgule est le premier chiffre après la virgule. Multipliez ce qui reste par B ; ce qui se trouve alors devant la virgule est le second chiffre, etc.

Exemple : $123,541$ en base 3

par conversion en base 3 de ce qui est devant la virgule 11120 ;

il reste 0,541

$$0,541 \text{ multiplié par 3 cela donne } 1,623 \quad \text{donc } 1 ; \text{ il reste } 0,623$$

$$0,623 \text{ multiplié par 3 cela donne } 1,869 \quad \text{donc } 1 ; \text{ il reste } 0,869$$

$$0,869 \text{ multiplié par 3 cela donne } 2,607 \quad \text{donc } 2 ; \text{ il reste } 0,669$$

donc le début est $11120,112$

Si l'on poursuit on obtient :

$11120,11212110111120200112211012222002221101100012120220101021202...$

fractions $(a/b) / (c/d)$ qui est une fraction ad/bc et qui possède donc un développement périodique.

La caractérisation des nombres rationnels (les fractions) comme nombres ayant un développement périodique est indépendante de la base. Cela signifie que l'algorithme de changement de base décrit à la figure 2 préserve la périodicité (et la non-périodicité).

Aussi la périodicité est-elle une propriété qui se conserve bien : elle persiste quand on multiplie, quand on divise, quand on change de base de numération.

RACINES CARRÉES PÉRIODIQUES?

Pour la racine carrée, est-ce aussi simple?

Non. La racine carrée d'un nombre dont le développement est périodique peut ne pas être périodique et ne l'est même qu'exceptionnellement. La racine carrée N/D d'un nombre périodique n/d est périodique si et seulement si son numérateur et son dénominateur sont tous deux des carrés parfaits (comme 4, 9, 16, 25, etc.).

La démonstration de ce résultat tient en quelques mots. Supposons que n/d est simplifié, ainsi que N/D ; $n/d = N^2/D^2$, ce qui équivaut à $n D^2 = d N^2$. Tout facteur premier p de n divise N^2 (car il ne peut pas diviser d puisque n/d a été simplifié), donc il divise N^2 un nombre pair de fois, disons $2i$ fois (car, dans la décomposition en facteur premier d'un carré, chaque exposant est pair). Mais puisque les deux nombres $n D^2$ et $d N^2$ sont égaux,

ils ont la même décomposition en facteurs premiers, et comme p ne peut pas apparaître dans celle de D (car p divise N et N/D a été supposée simplifiée), c'est que p^{2i} est présent dans la décomposition de n . Cela étant vrai pour tout facteur premier de n , n est un carré parfait. De même, d est un carré parfait. Il est donc nécessaire, pour qu'une racine carrée de fraction n/d soit périodique, que n et d soient des carrés parfaits. C'est bien sûr aussi suffisant.

Ni 2 ni 3 n'étant des carrés parfaits, le développement de leur racine carrée n'est pas périodique.

LES IRRATIONNELS ARTIFICIELS ET NATURELS

Si les nombres rationnels sont les nombres dont le développement est périodique, cela signifie deux choses intéressantes et, à nouveau, non triviales.

À chaque fois que l'on écrit un nombre dont les chiffres ne sont pas périodiques, comme $0,121121112111211112...$ (des séquences de 1 de plus en plus longues séparées par des 2), alors ce n'est pas une fraction : ne cherchez pas, aucun quotient de deux nombres entiers n'aura ce développement décimal !

Aussi, il existe des nombres qui ne sont pas des fractions (ce qui n'est pas si évident que cela). Ces nombres, qui ne sont pas quotients de deux entiers, s'appellent les irrationnels ; lorsque les Grecs découvrirent leur existence (à propos de racine de 2), ils en furent très éton-

3. PETITS CALCULS

$$1/3 = 0,333333... = 0,.[3]$$

$$2/3 = 0,666666... = 0,.[6]$$

$$1/6 = 0,166666... = 0,.[6]$$

$$2/6 = 0,333333... = 0,.[3]$$

$$3/6 = 0,5$$

$$4/6 = 0,666666... = 0,.[6]$$

$$5/6 = 0,833333... = 0,.[8]$$

$$1/7 = 0,142857142857... = 0,.[142857]$$

$$2/7 = 0,285714285714... = 0,.[285714]$$

$$3/7 = 0,428571428571... = 0,.[428571]$$

$$4/7 = 0,571428571428... = 0,.[571428]$$

$$5/7 = 0,714285714285... = 0,.[714285]$$

$$6/7 = 0,857142857142... = 0,.[857142]$$

$$1/9 = 0,111... = 0,.[1]$$

$$2/9 = 0,222... = 0,.[2]$$

$$3/9 = 0,333... = 0,.[3]$$

$$4/9 = 0,444... = 0,.[4]$$

$$5/9 = 0,555... = 0,.[5]$$

$$6/9 = 0,666... = 0,.[6]$$

$$7/9 = 0,777... = 0,.[7]$$

$$8/9 = 0,888... = 0,.[8]$$

$$1/11 = 0,090909... = 0,.[09]$$

$$2/11 = 0,181818... = 0,.[18]$$

$$3/11 = 0,272727... = 0,.[27]$$

$$4/11 = 0,363636... = 0,.[36]$$

$$5/11 = 0,454545... = 0,.[45]$$

$$6/11 = 0,545454... = 0,.[54]$$

$$7/11 = 0,636363... = 0,.[63]$$

$$8/11 = 0,727272... = 0,.[72]$$

$$9/11 = 0,818181... = 0,.[81]$$

$$10/11 = 0,909090... = 0,.[90]$$

$$1/12 = 0,083333... = 0,.[083]$$

$$2/12 = 0,166666... = 0,.[16]$$

$$3/12 = 0,25$$

$$4/12 = 0,333333... = 0,.[3]$$

$$5/12 = 0,416666... = 0,.[416]$$

$$6/12 = 0,5$$

$$7/12 = 0,583333... = 0,.[583]$$

$$8/12 = 0,666666... = 0,.[6]$$

$$9/12 = 0,75$$

$$10/12 = 0,833333... = 0,.[83]$$

$$11/12 = 0,916666... = 0,.[916]$$

$$1/13 = 0,.[076923]$$

$$2/13 = 0,.[153846]$$

$$3/13 = 0,.[230769]$$

$$4/13 = 0,.[307692]$$

$$5/13 = 0,.[384615]$$

$$6/13 = 0,.[461538]$$

$$7/13 = 0,.[538461]$$

$$8/13 = 0,.[615384]$$

$$9/13 = 0,.[692307]$$

$$10/13 = 0,.[769230]$$

$$11/13 = 0,.[846153]$$

$$12/13 = 0,.[923076]$$

En base 2

$$1/9 = 0,000111000111... = 0,.[000111]$$

$$3/9 = 0,01010101... = 0,.[010]$$

nés. Tous les nombres suivants sont donc des irrationnels :

0,055000555000005555550000000... (un 0, deux 5, trois 0, quatre 5, etc.)
 0,48848884888888884... (un 4, deux 8, un 4, quatre 8, un 4, huit 8, etc.)
 0,1234567891011121314... (nombre de Champernowne, constitué par la chaîne des entiers)
 0,235791113... (les nombres premiers les uns derrière les autres).

Le second résultat un peu étonnant qui résulte de la caractérisation des rationnels est que, si l'on découvre qu'un nombre n'est pas rationnel, alors on sait aussitôt, sans rien avoir à calculer, que ses chiffres en base 10 (ou autre) ne sont pas périodiques. Puisque racine de deux n'est pas rationnel (2 n'est pas un quotient de deux carrés parfaits), ses décimales ne sont pas périodiques, de même que ses chiffres en binaire. Même si vous ne savez pas les calculer, même si vous n'en avez jamais calculé aucun, vous savez que, quelle que soit la base de numération utilisée, les chiffres de racine de deux ne sont pas périodiques. Le mathématicien est un magicien qui fait connaître l'infini.

PÉRIODES ÉGALES ET INÉGALES

Étudions maintenant les choses plus systématiquement. Le tableau de la figure 3 indique ce que donnent les divisions des nombres entre 0 et 1, avec un dénominateur inférieur ou égal à 13. Nous avons éliminé les dénominateurs 2, 4, 5, 8 et 10, car nous savons que toutes les fractions avec ces dénominateurs ont des développements finis en base 10.

Surprise : il semble que, pour un dénominateur donné, toutes les fractions qui ne se simplifient pas ont la même longueur de période. Pourrait-on le démontrer ? Oui, et cela va nous entraîner dans des raisonnements un peu plus compliqués que précédemment, mais tel est le prix à payer pour passer d'une constatation empirique à une certitude mathématique.

Pour une fraction n/d non simplifiable et de développement infini, nous supposons n plus petit que d , ce qui revient à ne garder que la partie non entière des fractions. Pensons, pour notre démonstration, à l'opération de division comme nous la posons à l'école

– le premier reste est le reste de la division de $10n$ par d (car on a ajouté un zéro à n pour que d y soit au moins une fois),
 – le second est celui de la division de $100n$ par d , etc.

Les restes ne peuvent pas être tous différents, car ils sont inférieurs à d , donc à un certain moment, on retombera sur un reste déjà obtenu à une étape antérieure i . Soit i et $i+j$ les plus petits

des numéros d'étapes où se produit l'égalité de deux restes. Les nombres i et j sont ceux qui donnent l'endroit où commence la période et sa longueur. Dans le langage de l'arithmétique modulaire, n/d est périodique de période j à partir du chiffre i , si et seulement si i et j sont les plus petits entiers tels que : $n10^i \equiv n10^{i+j} \pmod{d}$ (rappelons que «mod n » signifie qu'on ne garde d'un nombre que son reste après la division par n , ou, exprimé autrement, qu'on revient à zéro quand on arrive à n : $0 \equiv 0 \pmod{3}$; $1 \equiv 1 \pmod{3}$; $2 \equiv 2 \pmod{3}$; $3 \equiv 0 \pmod{3}$; $4 \equiv 1 \pmod{3}$; $5 \equiv 2 \pmod{3}$; $6 \equiv 0 \pmod{3}$; etc.)

Exemple. Prenons $1/84$. Si on pose la division, on trouve $1/84 = 0,01[190476]$, on constate que $i = 2$ et $j = 6$.

Vérifions cela par un calcul en arithmétique modulaire :

$$10^0 = 1 \pmod{84}$$

$$10^1 = 10 \pmod{84}$$

$$10^2 = 100 = 16 \pmod{84}$$

$$10^3 = 160 = 76 \pmod{84}$$

$$10^4 = 760 = 4 \pmod{84}$$

$$10^5 = 40 \pmod{84}$$

$$10^6 = 400 = 64 \pmod{84}$$

$$10^7 = 640 = 52 \pmod{84}$$

$$10^8 = 520 = 16 \pmod{84}$$

On retombe sur 16 pour $i = 2$ (le début de la période) après $j = 6$ multiplications supplémentaires par 10.

Lorsque n et d n'ont pas de facteurs communs, l'égalité modulaire ci-dessus ne dépend pas de n , car il existe un nombre n' tel que $nn' \equiv 1 \pmod{d}$ (voir sur la figure 1 le théorème de Bézout), et on multiplie chaque côté de l'égalité modulaire par ce n' , ce qui la simplifie en : $10^i \equiv 10^{i+j} \pmod{d}$.

Cela est remarquable : toutes les fractions simplifiées ayant le même dénominateur ont un développement ayant la même période et cette période commence au même endroit après la virgule. Toutes les fractions ayant 12 comme dénominateur (voir la figure 3) et ne se simplifiant pas ont un développement dont la période est de longueur 1 qui commence au troisième chiffre après la virgule. De même, la période commune aux fractions de dénominateur 7 est constante (c'est 6).

Si on suppose maintenant que d n'est divisible ni par 2 ni par 5, alors on peut simplifier par 10^i (car cela signifie que d et 10 sont premiers entre eux et donc, grâce au théorème de Bézout, qu'il existe un nombre k tel que $10k \equiv 1 \pmod{d}$). De $10^i \equiv 10^{i+j} \pmod{d}$, on passe donc à $1 \equiv 10^j \pmod{d}$, qui signifie que la période commence juste après la virgule et que la longueur de la période est le plus petit entier j tel que : $1 \equiv 10^j \pmod{d}$ (c'est-à-dire tel que $10^j - 1$, soit un multiple de d).

A nouveau, cela explique pourquoi à la figure 4, pour 6, 12, 14, on n'a pas de

développement périodique dès le départ, alors que, pour chaque dénominateur 3, 7, 9, 11 ou 13, non seulement la longueur de la période est constante, mais la période commence dès la virgule.

Effectuons une petite vérification sur

$$7/13 = 0, [538461]$$

$$10^0 = 1 \bmod 13$$

$$10^1 = 10 \bmod 13$$

$$10^2 = 9 \bmod 13$$

$$10^3 = 12 \bmod 13$$

$$10^4 = 3 \bmod 13$$

$$10^5 = 4 \bmod 13$$

$$10^6 = 1 \bmod 13$$

Dans le cas de dénominateurs qui sont des nombres premiers autres que 2 et 5 (ce qui assure qu'ils n'ont de facteur commun ni avec leur numérateur ni avec 10), les choses sont particulièrement simples et nettes : si p est un nombre premier autre que 2 et 5, alors toutes les fractions non nulles simplifiées de dénominateur p ont un développement décimal qui est périodique dès la virgule, et dont la longueur de la période est le plus petit nombre j tel que $10^j - 1$ est divisible par p .

LES LONGUES PÉRIODES

Le raisonnement sur les restes successifs, quand on pose l'opération de division, montre que, pour un dénominateur d , la période est au plus $d - 1$ (les restes qui peuvent intervenir sont tous les nombres non nuls inférieurs à d). Si un nombre n'est pas premier, la période est inférieure à $d - 1$. En effet, deux cas sont possibles :
(i) un des restes successifs est un diviseur de d , on est ramené à une fraction simplifiée avec un dénominateur plus petit que d , et donc sa période est inférieure à d ;
(ii) aucun des restes successifs n'est un diviseur de d , alors il y en a moins que $d - 1$, et donc la période est inférieure à $d - 1$.

Pour les dénominateurs premiers, on constate avec 7, 17 ou 19 que la période peut-être $p - 1$ (voir la figure 4). D'autres considérations d'arithmétique montrent que, lorsque p est un nombre premier, la longueur des cycles est toujours un diviseur de $p - 1$. On le vérifie en regardant le tableau de la figure 5.

Reste un mystère. Pourquoi la période est-elle maximale, et égale à $(p - 1)$, pour certains nombres premiers appelés *nombres premiers longs* en base 10, et pas pour les autres ? Notons bien que la notion de *nombre premier long* dépend de la base de numération : un nombre peut être un premier long en base 10 et pas en base 2. C'est le cas, par exemple, pour 7 :

$$1/7 = 0,142857142857142857... \text{ en base 10 période maximale } 6$$

$$1/7 = 0,001001001001001... \text{ en base 2 période } 3$$

On montre que, pour tout nombre premier, il existe une base B inférieure à p dans laquelle p est un nombre premier long.

Y a-t-il beaucoup de nombres premiers longs en base 10 (ou autres) ? La question est réellement difficile, et les mathématiciens n'ont pas même réussi à établir qu'il existe une infinité de nombres premiers longs en base 10. Or, ceux-ci ne sont pas très rares, puisqu'on en trouve

116 sur les 303 nombres premiers inférieurs à 2 000, ce qui fait une proportion de 38,28 pour cent.

On conjecture d'ailleurs que leur proportion est 37 pour cent. La conjecture a été formulée par le mathématicien allemand Emil Artin (1898-1962) et suggère que la proportion de nombres premiers longs soit C , la constante de Artin (voir la figure 7).

4. CYCLES DES FRACTIONS

Tableau des cycles pour les nombres premiers inférieurs à 50

3 :	[3] [6]
7 :	[142857]
11 :	[09] [18] [26] [37] [45]
13 :	[076923] [153846]
17 :	[0588235294117647]
19 :	[052631578947368421]
23 :	[0434782608695652173913]
29 :	[0344827586206896551724137931]
31 :	[032258064516129] [09677493548387]
37 :	[027] [054] [081] [135] [162] [189] [243] [297] [378] [459] [486] [567]
41 :	[02439] [04878] [07317] [09756] [12195] [14634] [26829] [36585]
43 :	[023255813953488372093] [046511627906976744186]
47 :	[0425531914893617021276595744680851063829787234]

Tableau des longueurs des périodes pour les nombres premiers

Nombre premier (sauf 2 et 5) : n . Nombre de cycles : c . Longueur des cycles : l .

n	3	7	11	13	17	19	23	29	31	37	41	43	47	53	59	61	67	71	73	79	83	89	97	101	103	107	109	113	127	131	137
c	2	1	5	2	1	1	1	1	2	12	8	2	1	4	1	1	2	2	9	6	2	2	1	25	3	2	1	1	3	1	17
l	1	6	2	6	16	18	22	28	15	3	5	21	46	13	58	60	33	35	8	13	41	44	96	4	34	53	108	112	42	130	8

5. TROIS CURIOSITÉS NUMÉRIQUES

1) Lorsque p est un nombre premier et que la période de $1/p$ est paire, alors, en additionnant les deux moitiés de la période, on ne trouve que des 9. Ainsi pour 13, on a les périodes 076923 et 153846, et l'on vérifie que :
 $076 + 923 = 999$ $153 + 846 = 999$. Pour 19 on a une unique période :
052631578947368421, et l'on constate que :
 $052631579 + 947368421 = 999999999$

2) À partir de tout nombre premier long p , en prenant sa période, vous créez un entier qui, lorsque vous le multipliez par 2, 3, ..., $p - 1$, se redonne lui-même, à une permutation près de ses chiffres (un tel nombre est parfois appelé *entier cyclique*). Le cycle 142857 du nombre premier long 7 est le plus petit de ces entiers :

$$142857 \times 1 = 142857 \quad 142857 \times 2 = 285714$$

$$142857 \times 3 = 428571 \quad 142857 \times 4 = 571428$$

$$142857 \times 5 = 714285 \quad 142857 \times 6 = 857142$$

De plus, en le multipliant par 7, on obtient 999999

Pour 17, vous trouverez l'entier cyclique 0588235294117647.

3) En prenant un nombre premier p dont la période est de longueur $(p - 1)/2$ (par exemple $p = 13$), vous obtenez une paire de nombres associés : en multipliant l'un ou l'autre par 1, 2, ..., $p - 1$, vous trouvez l'un ou l'autre à une permutation de chiffres près. Les deux cycles donnés par 13 fournissent les nombres associés 076923 et 153846

$$076923 \times 2 = 153846 \quad 153846 \times 2 = 307692$$

$$076923 \times 3 = 230769 \quad 153846 \times 3 = 461538$$

$$076923 \times 4 = 307692 \quad 153846 \times 4 = 615384$$

$$076923 \times 5 = 384615 \quad 153846 \times 5 = 769230, \text{ etc...}$$

Certains travaux du mathématicien Holey dans les années 1960, liant la conjecture de Artin à une autre conjecture célèbre (la conjecture généralisée de Riemann), rendent très probable qu'il y a une infinité de nombres premiers longs dans toute base fixée.

En base 2, la proportion d'entiers premiers longs semble être exactement la même qu'en base 10. En revanche, pour d'autres bases, les choses sont plus compliquées, et d'autres conjectures ont été formulées. Par exemple, en base 8, on pense que la proportion de nombres

premiers longs est $3C/5$ (où C est la constante de Artin).

LES GÉNÉRATEURS EN 1/N

Les propriétés des suites de chiffres qu'on trouve dans le développement de l'inverse d'un nombre premier long sont assez bien connues. Ces suites présentent des qualités de bon mélange et d'uniformité qui ont conduit à les utiliser comme suites de nombres pseudo-aléatoires. Regardez les chiffres du développement de $1/383$ (383 est un nombre premier long en base 10). Ne semblent-il pas quelconques ? $1/383=0, [002610966057441253263707571801566579634464751958224543080939947780678851174934725848563968668407310704960835091383812010443864229765013054830287206266318537859007832898172323759791122715404699738903394255874673629242819843342036553524804177545691906005221932114882506527415143603133159268929503916449086161879895561357702349869451697127937336814621409921671018276762402088772845953]$.

Ces suites peuvent être utilisées en simulation, où l'on a besoin de suites pseudo-aléatoires. En revanche, les propriétés de ces suites étudiées par les mathématiciens L. Blum, M. Blum et M. Shub montrent que de telles suites sont *repérables* et ne doivent pas être utilisées en cryptographie : l'arithmétique ici nous donne à moindre coup du *hasard faible*, mais pas du *hasard moyen* (dont a besoin la cryptographie), ni bien sûr le véritable *hasard fort*, que seuls des mécanismes physiques peuvent engendrer.

N'est-il pas étonnant et merveilleux que, dans les fractions de l'école primaire, se cache un monde complexe et organisé où l'on découvre des séquences répétées, le théorème de Bézout, les nombres premiers longs, puis les suites pseudo-aléatoires et enfin des conjectures mystérieuses.

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

e-mail : delahaye @lil.fr

J. H. CONWAY et R. GUY, *The Book of Numbers*, Copernicus, Springer, 1996.

E. KRANAKIS, *Primality and Cryptography*, John Wiley and Sons, 1986.

M. E. LINES, *A Number for Your Thoughts : Facts and Speculations about Numbers From Euclid to The Latest Computers*, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1986, 1993.

Eric W. WEISSTEIN, *Decimal Expansion Maximal Period*, Treasure Troves 1997 <http://www.astro.virginia.edu/~eww6n/math>

6. FACTORISATION DES $10^p - 1$

$10^1 - 1 = 9 = 3^2$
 $10^2 - 1 = 99 = 3^2 \cdot 11$
 $10^3 - 1 = 999 = 3^3 \cdot 37$
 $10^4 - 1 = 9999 = 3^2 \cdot 11 \cdot 101$
 $10^5 - 1 = 99999 = 3^2 \cdot 41 \cdot 271$
 $10^6 - 1 = 999999 = 3^3 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 37$
 $10^7 - 1 = 9999999 = 3^2 \cdot 239 \cdot 4649$
 $10^8 - 1 = 99999999 = 3^2 \cdot 11 \cdot 73 \cdot 101 \cdot 137$
 $10^9 - 1 = 999999999 = 3^4 \cdot 37 \cdot 333667$
 $10^{10} - 1 = 9999999999 = 3^2 \cdot 11 \cdot 41 \cdot 271 \cdot 9091$
 $10^{11} - 1 = 99999999999 = 3^2 \cdot 513239 \cdot 21649$
 $10^{12} - 1 = 999999999999 = 3^3 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 37 \cdot 101 \cdot 9901$
 $10^{13} - 1 = 9999999999999 = 3^2 \cdot 53 \cdot 79 \cdot 265371653$
 $10^{14} - 1 = 99999999999999 = 3^2 \cdot 11 \cdot 239 \cdot 4649 \cdot 909091$
 $10^{15} - 1 = 999999999999999 = 3^3 \cdot 31 \cdot 37 \cdot 41 \cdot 271 \cdot 2906161$
 $10^{16} - 1 = 9999999999999999 = 3^2 \cdot 11 \cdot 17 \cdot 73 \cdot 101 \cdot 137 \cdot 5882353$
 $10^{17} - 1 = 99999999999999999 = 3^2 \cdot 5363222357 \cdot 2071723$
 $10^{18} - 1 = 999999999999999999 = 3^4 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 19 \cdot 37 \cdot 333667 \cdot 52579$
 $10^{19} - 1 = 9999999999999999999 = 3^2 \cdot 1111111111111111$
 $10^{20} - 1 = 99999999999999999999 = 3^2 \cdot 11 \cdot 41 \cdot 101 \cdot 271 \cdot 27961 \cdot 9091 \cdot 3541$

Lorsque p est un nombre premier, la longueur de la période de $1/p$ est donnée par la ligne où il apparaît la première fois dans ce tableau. La longueur de la période de $1/11$ est 2, car 11 apparaît dès la deuxième ligne. La longueur de la période de $1/13$ est 6, car 13 n'apparaît qu'à la ligne 6.

7. NOMBRES PREMIERS LONGS ET CONSTANTE DE ARTIN

Les nombres premiers longs sont, par définition, les nombres premiers p tels que l'écriture de $1/p$ est de période maximale possible $p - 1$.

Le nombre 7 est le plus petit nombre premier long.

Parmi les 303 nombres premiers inférieurs à 2 000, il y en a 116 qui sont des nombres premiers longs en base 10. Ce sont :

7, 17, 19, 23, 29, 47, 59, 61, 97, 109, 113, 131, 149, 167, 179, 181, 193, 223, 229, 233, 257, 263, 269, 313, 337, 367, 379, 383, 389, 419, 433, 461, 487, 491, 499, 503, 509, 541, 571, 577, 593, 619, 647, 659, 701, 709, 727, 743, 811, 821, 823, 857, 863, 887, 937, 941, 953, 971, 977, 983, 1019, 1021, 1033, 1051, 1063, 1069, 1087, 1091, 1097, 1103, 1109, 1153, 1171, 1181, 1193, 1217, 1223, 1229, 1259, 1291, 1297, 1301, 1303, 1327, 1367, 1381, 1429, 1433, 1447, 1487, 1531, 1543, 1549, 1553, 1567, 1571, 1579, 1583, 1607, 1619, 1621, 1663, 1697, 1709, 1741, 1777, 1783, 1789, 1811, 1823, 1847, 1861, 1873, 1913, 1949, 1979

La constante de Artin est le rapport limite de la proportion de nombres premiers longs sur le nombre de nombres premiers. On la note C , et elle vaut pour 303 nombres premiers : $116/303 = 0,38283828$

Une conjecture de Artin stipule que :

$C = (1/2) (5/6) (19/20) (41/42) (109/110) \dots = 0,3739558136\dots$

(on prend le produit infini de toutes les fractions $(p^2 - p - 1)/(p^2 - p)$ pour p nombre premier 2, 3, 5, 7, 11, 13, etc.)

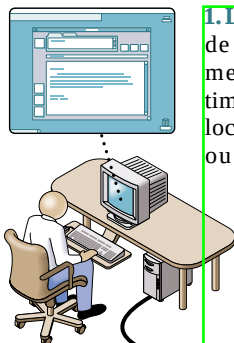
En fait, aujourd'hui on ne sait même pas démontrer qu'il y a une infinité de nombres premiers longs !

Le courrier électronique sur l'Internet

Des milliards de courriers électroniques (courriel ou mël, selon l'Académie) transitent sur le réseau Internet chaque année. L'envoi de lettres électroniques, soit d'un bureau à un bureau voisin ou d'un endroit du Globe à l'autre, est devenu si fréquent que ces envois remplacent le courrier postal ou le téléphone. Ce moyen de transmission universel n'est plus restreint aux seuls échanges de fichiers de texte, mais transporte de plus en plus souvent la voix, des télécopies, des images, des sons ou de la vidéo.

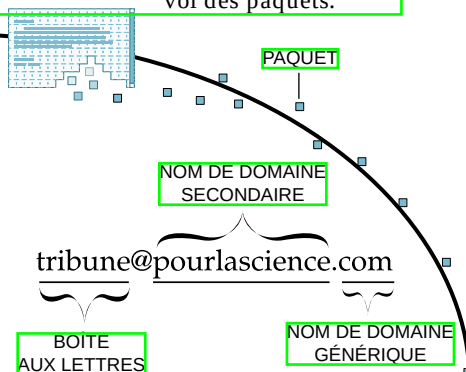
Un message arrive chez son destinataire quelques secondes après son envoi. Pour cette raison, le courrier électronique sur l'Internet a transformé notre façon de communiquer.

Paul HOFFMAN
Consortium du mail sur l'Internet.



1. LA PERSONNE QUI ENVOIE LE MESSAGE utilise un programme de courrier électronique baptisé *client*, pour construire un document qui peut inclure des annexes, comme des documents multimédias. Le programme *client* s'adresse à un serveur de messagerie local, un ordinateur qui est sur le réseau interne d'une société ou chez un fournisseur d'accès à l'Internet, lequel gère l'envoi. Sur cet ordinateur, un programme utilise un protocole de transmission (le plus souvent TCP, l'acronyme de *Transmission Control Protocol*, soit «protocole de contrôle de transmission») pour séparer le message en paquets et adjoindre à chaque paquet l'information qui concerne son envoi, par exemple, l'ordre d'envoi des paquets.

2. LES ADRESSES INTERNET attachées à chaque message sont de la forme «boîte_aux_lettres@nom_de_domaine», par exemple «tribune@pouurlascience.com». Le nom de domaine comprend un nom de domaine générique («.com») qui suit le nom de domaine secondaire («pouurlascience»). Un message est distribué à un groupe ou à un individu grâce à une boîte aux lettres («tribune»).



3. LE SERVEUR DE MESSAGERIE LOCAL convertit le nom de domaine du récipiendaire du message («pouurlascience.com») en une adresse numérique du protocole Internet (IP). Pour cela, il interroge les serveurs de nom de domaine (DNS) répartis sur le réseau. Par exemple, le serveur de messagerie peut demander d'abord à un serveur où se trouvent les serveurs qui contiennent des informations sur les noms de domaine «.com» (a). Ensuite, il interroge l'un de ses serveurs sur la localisation du serveur «pouurlascience.com» (b). Une requête finale au serveur de nom «pouurlascience.com» fournit l'adresse IP de l'ordinateur qui reçoit le courrier de pouurlascience.com, adresse qui est alors jointe à chaque paquet (c). Le serveur de messagerie envoie ensuite les paquets à des routeurs répartis sur l'Internet.

a OÙ EST LE SERVEUR .COM?

b OÙ EST LE SERVEUR DE NOM POURLASCIENCE.COM?

c OÙ EST LE SERVEUR DE MESSAGERIE POURLASCIENCE.COM?

c OÙ EST LE SERVEUR DE MESSAGERIE POURLASCIENCE.COM?



5. LE SERVEUR DE MESSAGERIE FINAL replace les paquets reçus dans leur ordre initial, grâce aux instructions contenues dans chaque paquet, et stocke le message dans la boîte aux lettres du récipiendaire. Le programme de courrier électronique peut alors afficher le message.

ROUTEUR

SERVEUR DE MESSAGERIE POURLASCIENCE.COM

SERVEUR DE MESSAGERIE LOCAL

Michel Schreierman, Lesprit

4. LES ROUTEURS lisent l'adresse IP de chaque paquet et les relayent jusqu'à destination, par le chemin le plus efficace. En raison de l'encombrement des lignes de données, il n'est pas toujours plus rapide d'envoyer le paquet directement à son destinataire. Les différents paquets peuvent transiter par des chemins différents, relayés par une dizaine de routeurs, avant d'arriver à destination.

Les expressions chimériques

On repère plus vite un visage en colère ou effrayé dans un ensemble de visages gais, qu'un visage joyeux au sein de visages exprimant la peur. Cette identification du «visage dans la foule» est d'autant plus rapide et sûre que les expressions qui constituent le fond (la foule) et la figure (la cible) caractérisent des émotions primaires : joie, peur, colère, tristesse et dégoût. Le fait que les expressions faciales de colère et de peur sautent plus vite aux yeux que les émotions positives apporte de l'eau au moulin de la thèse darwinienne : la détection précoce de stimulus incitant à la fuite ou au retrait constitue un avantage sérieux pour le sujet, comme pour l'espèce.

De nombreuses mesures indiquent que la détection de la signification affective d'un stimulus s'effectue souvent de façon automatique sans nécessiter un traitement complexe par le cerveau. Cela ne signifie pas, pour autant, qu'il en soit toujours ainsi. Dans la plupart des recherches, le type de visages est emprunté à l'ensemble standardisé de photographies prototypiques exprimant les émotions de base. La «pureté» de ces expressions est fondée sur des critères anatomiques de la musculature faciale.

Or, dans bon nombre de situations de la vie courante, le sujet est confronté à des signaux émotionnels qui ne sont pas aussi «purs». Les expressions émotionnelles naturelles sont souvent mixtes, équivoques, voire conflictuelles. Elles comportent alors des éléments positifs (joie) et négatifs (peur).

Pour étudier les réactions à de telles expressions faciales complexes, des experts peuvent évidemment sélectionner de telles expressions dans des banques de données photographiques. Mais on obtient alors des combinaisons hétérogènes et les comparaisons sont rendues difficiles par les caractéristiques de la physiologie de chaque individu. Les technologies de l'image numérique permettent aujourd'hui de fabriquer, à partir d'un visage réel, des expressions artificielles où l'on peut combiner de façon rigoureuse et systématique les signaux émotionnels correspondant à des émotions distinctes. On crée ainsi des expressions émotionnelles «chimériques». Il est ainsi possible, à partir de deux photographies d'un même individu, l'une expri-

mant la joie, l'autre la peur, de composer un visage chimérique dont le haut exprime la joie, et le bas la peur et *vice versa* (voir les figures). Le principe général consiste à fusionner de façon continue une expression dans l'autre en prenant le nez comme zone frontière.

Comment ces combinaisons de peur et de joie sont-elles perçues et évaluées par des observateurs? On pourrait penser que les évaluations fournies résultent d'une algèbre simple, les éléments négatifs étant retranchés aux positifs pour aboutir à une expression neutre, les chimères seraient alors jugées par des observateurs comme n'exprimant ni la joie ni la peur. Cette hypothèse est fort peu plausible dans le cas des visages, car les différentes unités faciales contribuent avec des poids différents à la formation d'une impression chez l'observateur. Il y a de bonnes raisons de penser au contraire que le traitement de visages chimériques repose sur une combinatoire plus compliquée.

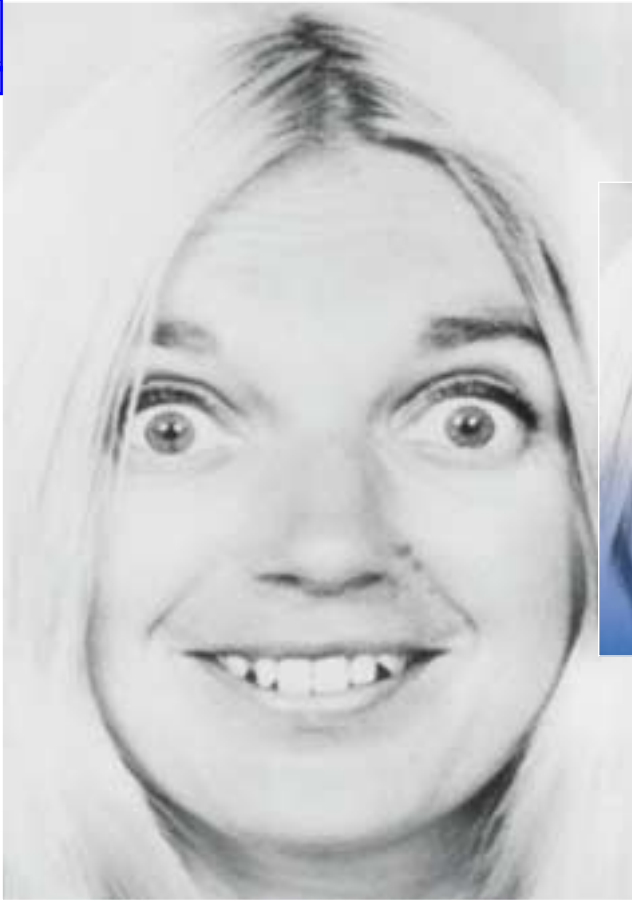
C'est du moins la conclusion qui ressort des résultats que nous avons obtenus en faisant comparer par des sujets, à l'aide de méthodes d'évaluation appropriées, les expressions pures de joie et de peur à celles des expressions chimériques. Ainsi, par exemple, les chimères du type «peur-joie» (*figure 1*) sont estimées plus expressives que les prototypes de joie ou de peur. Loin d'induire une réaction nulle (ni positive ni négative), les mélanges de peur-joie sont jugés positifs et ceux de joie-peur (*figure 2*), négatifs. Enfin, en dépit du fait que les expressions chimériques ne correspondent pas à des configurations d'unités musculaires «biologiquement correctes», elles apparaissent à l'observateur qui n'est généralement pas conscient de la supercherie, comme dotées d'une signification psychologique cohérente, les unes sont plus proches de l'expression de joie, les autres de l'expression de peur.

La simulation numérique d'expressions composites permettra d'explorer les mécanismes réglant les réactions du sujet humain face aux stimulations affectives complexes de son environnement.

Monique de BONIS (CNRS UMR 7593)
et Monique NAHAS (Université Paris VIII)

Ces deux visages chimériques ont été extraits du *Facial Action Coding System* d'Ekman et Friesen et reproduits avec leur permission. Les images ont été réalisées par M. Almiron (Éditions du Centre de Psychologie Appliquée).

1. Chimère peur-joie



2. Chimère joie-peur



Astronomie

Les planètes géantes

Thérèse Encrenaz. Éditions Belin.

Le livre de Thérèse Encrenaz nous emmène, à plus de 800 millions de kilomètres du Soleil, explorer ces astres lointains du Système solaire que sont les quatre planètes géantes : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Dans un style vif et très clair, l'auteur relate les grandes étapes de leur exploration, de la lunette de Galilée à la sonde spatiale *Galileo*, en orbite autour de Jupiter.

Ce livre a notamment le mérite de nous faire vivre l'astrophysique telle qu'elle se fait aujourd'hui dans les laboratoires et auprès des télescopes. L'auteur souligne à juste titre la synergie entre l'exploration spatiale et l'observation à partir de la Terre. Les instruments qui équipent les grands télescopes ont considérablement progressé, et ils se perfectionnent encore. Les détecteurs de plus en plus sensibles, associés à des spectromètres refroidis, très performants, ont permis l'essor de spectroscopies dans le domaine infrarouge et dans le domaine millimétrique. Ce sont ces techniques que les planétologues utilisent pour détecter des molécules rares dans les atmosphères des planètes géantes et de leurs satellites.

D'autre part, l'avènement de l'optique adaptative, qui compense en temps réel la turbulence de l'atmosphère terrestre, montre des détails de plus en plus fins des corps lointains. Songeons que l'on peut ainsi «voir» en infrarouge des régions d'environ 700 kilomètres à la surface de Titan, ce satellite de Saturne distant de plus de un milliard de kilomètres ! Toutefois, ces instruments complexes et performants sont lourds et fragiles ; ils ne peuvent être embarqués sur des sondes spatiales. Celles-ci emmènent plutôt des équipements légers, fiables, qui consomment peu d'énergie et sont souvent en retard sur la technique du moment.

L'exploration spatiale est indispensable pour aller voir de plus près ces planètes et leur cortège de satellites. L'étude *in situ* des planètes, par des modules de rentrée atmosphérique, a commencé il y a une vingtaine d'années par Vénus et par Mars. Une nouvelle étape vient d'être franchie avec le largage d'une sonde dans l'atmosphère de Jupiter, le 7 décembre 1995, et le

lancement, le 15 octobre 1997, de la mission *Cassini/Huygens*, qui emporte un module de rentrée dans l'atmosphère de Titan. Cet ouvrage utilise largement l'iconographie des sondes *Voyager*, qui visitèrent les quatre planètes géantes entre 1979 et 1989. Les délais de parution n'ont hélas pas permis d'inclure les superbes images de Jupiter et de ses satellites (notamment Io et Europe) enregistrées tout récemment par la sonde *Galileo*.

T. Encrenaz présente de façon très accessible ce qu'on sait aujourd'hui des planètes géantes, de leur formation à partir de la nébuleuse primitive, il y a 4,5 milliards d'années, et de leur évolution ultérieure. Quoique proches par leur origine, les planètes géantes ne sont pas toutes semblables, et les différences subtiles de leur composition chimique, de leur météorologie ou de leur magnétosphère ne sont pas toutes bien comprises. La diversité la plus remarquable réside dans leurs systèmes d'anneaux et de satellites. Comment comparer Io et ses volcans spectaculaires, Europe, couverte de glace d'eau mais cachant peut-être un océan, et Titan, entouré d'une atmosphère épaisse, siège d'une chimie organique complexe ?

L'auteur nous fait également revivre la collision de la comète Shoemaker-Levy 9 (SL9) avec Jupiter, qui eut lieu en juillet 1994. Cet événement suscita une mobilisation exceptionnelle des astronomes, qui utilisèrent la plupart des moyens d'observation à leur disposition : télescopes au sol, télescope spatial *Hubble* et, aussi, la sonde *Galileo*, qui était alors en route pour Jupiter. Seule la combinaison de ces diverses observations, de l'ultraviolet aux ondes radio, a permis de retracer la séquence des événements liés aux impacts des fragments cométaires et d'en mesurer les effets sur la planète. Ce phénomène nous rappelle que, si les collisions «catastrophiques» ont modelé notre Système solaire dans sa jeunesse, elles continuent de le faire aujourd'hui. Il est presque acquis que la Lune est née de l'impact d'un corps géant sur la Terre. Il est également possible que la chute d'un astéroïde ait provoqué, sur la Terre, l'extinction massive d'espèces vivantes, à la frontière du Crétacé et du Tertiaire.

La collision de SL9 et de Jupiter a bien montré les modifications que peuvent causer de tels impacts. Ainsi, certains des composés fabriqués à ces occasions (le monoxyde de carbone CO, le cyanure d'hydrogène HCN ou le sulfure de carbone CS) sont encore observables dans la haute atmosphère,

plus de deux ans après la collision : toujours aussi abondants, ils se sont simplement dilués horizontalement.

De même, le satellite *ISO*, en orbite autour de la Terre, vient de détecter la présence de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone dans la haute atmosphère des planètes géantes. Ces gaz proviennent très vraisemblablement d'une pluie ininterrompue de petits grains de poussières glacées, qui peuplent l'espace interplanétaire. Quelques kilogrammes d'eau, tout au plus, tombant chaque seconde sur la planète, suffisent à expliquer les quantités détectées. Ces microcollisions continues ont donc des effets tout à fait mesurables sur la chimie de l'atmosphère supérieure des planètes géantes.

Ce sont ces mondes fascinants que T. Encrenaz nous invite à découvrir et à mieux comprendre. Servi par une belle iconographie, l'ouvrage *Les planètes géantes* est un document de qualité, vivant, et qui devrait faire rêver les initiés comme les profanes.

Bruno BÉZARD

Botanique

Les forêts d'Europe

Paul Arnould, Micheline Hotyat et Laurent Simon. Éditions Nathan Université, 1997.

La forêt, «au cœur de l'imaginaire européen», «l'un des derniers lieux de naturalité», ultime refuge des formes vivantes ou usine à bois ? Dans l'esprit de chacun, selon les époques et les lieux, ces diverses conceptions se stratifient ou se combattent en fonction des idées acquises au cours de la formation scolaire, universitaire ou professionnelle, au cours des contacts avec les spécialistes du milieu forestier ou de la protection de la nature, au cours des rencontres personnelles...

Cet ouvrage apporte, à ce propos, d'innombrables thèmes de réflexion. Œuvre de géographes réunis au sein du Laboratoire de biogéographie de l'École normale supérieure de Fontenay-Saint-Cloud, il prend en compte l'ensemble des facteurs écologiques («naturalistes»), historiques, économiques, sociologiques, politiques..., variables dans le temps et dans l'espace, qui déterminent les caractères, la diversité, les modes d'utilisation et le probable deve-

nir de la forêt européenne, «la grande oubliée», jusqu'à une date récente, dans la construction de l'Europe.

Sont finement étudiées, au-delà des incertitudes statistiques (ainsi, les données sur les surfaces forestières peuvent varier de 30 à 40 pour cent!), la notion de «richesse» (économique, biologique, sociale...) des forêts, leur histoire (depuis l'Holocène) et celle de leur gestion (depuis l'Antiquité), la diversité des situations nationales (quoi de commun entre la taïga finlandaise et la subéraie méditerranéenne?), les difficultés écologiques et sociologiques propres à notre époque, la difficile gestation d'une Europe des forêts... La richesse des informations réunies ici rend impossible un compte rendu exhaustif ; aussi, je ne retiendrai de ce travail exemplaire que quelques-unes des remarques, suscitées par sa lecture, relatives à la préservation des milieux semi-naturels de notre pays.

La difficulté des sujets traités conduit à divers recoupements entre les divisions de l'ouvrage, signées chacune par un des auteurs. Par exemple, les effets et les causes des perturbations massives des systèmes forestiers (incendies, dépérissement...), largement évoqués au chapitre 2, sont analysés de façon approfondie dans le chapitre 5. Redites ? Non : plutôt un moyen de faire découvrir les multiples facettes de chaque problème. Ainsi la pratique des feux de forêts ou de landes peut-elle conduire au désastre ou constituer un moyen de gestion ; de même, l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone, danger mondial par effet de serre, augmente la productivité des forêts européennes, mais les fragilise...

Des liens apparaissent souvent entre les données statistiques, malgré leur relative incertitude, et la protection de la nature. Ainsi la forêt privée occupe «plus du quart de la superficie forestière de la Communauté européenne ; en outre, 40 pour cent de sa surface sont représentés par de petits domaines de moins de dix hectares». Cette situation a des conséquences à la fois sur la gestion (éventuelle, car «trois pour cent seulement des propriétaires forestiers sont des sylviculteurs»), sur le décalage entre les ressources exploitables et les ressources exploitées, sur la conservation de la richesse biologique, celle des paysages, et pourrait expliquer les résistances rencontrées, notamment en France, à l'application de la directive européenne Habitats (*Natura 2000*).

Autre exemple : le taux de boisement peut donner l'impression trompeuse que le Portugal, avec 36 pour cent de cou-

verture forestière, est plus riche en forêts que l'Allemagne (29 pour cent) ; même si les pessières de Bavière ne sont pas un idéal pour la biodiversité, elles n'ont rien à voir avec les plantations portugaises massives d'eucalyptus (225 000 hectares), à rotation de trois à quinze ans (plutôt champs de ligneux que forêts), parmi les plus rentables d'Europe, mais aux effets désastreux sur la flore comme sur l'hydrologie.

Plusieurs cartes montrent de telles incertitudes : celle de la page 56, fondée sur la combinaison de plusieurs paramètres difficiles à quantifier, place le Valois, région de vastes et splendides forêts, dans une zone de «potentialités

bioclimatiques faibles», tandis que la zone voisine, à l'Est, aux potentialités moyennes, englobe la Champagne crayeuse ! Les auteurs sont conscients du problème : ils montrent, à l'aide d'exemples, la complexité de l'échelle stationnelle.

Faut-il alors renoncer, faute de pertinence économique, à définir les potentialités des stations forestières en fonction de leur écologie ? Sans doute pas : dans le Nord de l'Europe, plus au Sud dans certains massifs forestiers, les stations relativement homogènes sont suffisamment étendues, ou les variations écologiques suffisamment régulières, pour que les traitements forestiers puissent



Marc Boumard

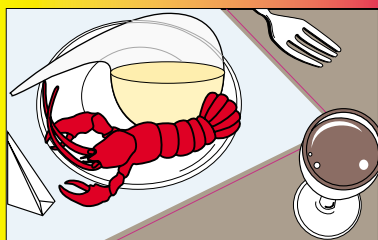
Hêtreraie à jacinthe des bois, sur limon, dans la forêt de Retz (Aisne).

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 27 avril 1998.



être adaptés aux conditions stationnelles. On peut voir là un critère de distinction entre forêts à objectif principal de production (aux unités écologiques de grande étendue) et forêts-patchwork, mosaïques de petites stations variées, à forte biodiversité. La gestion écologique préconisée par Didier Carbinier dans *Les arbres qui cachent la forêt* trouverait là son meilleur champ d'application. De telles forêts, par leurs contrastes stationnels et paysagers, constituent des lieux privilégiés pour le «tourisme vert» ou pour l'initiation à la vie forestière et à l'écologie.

L'opposition, selon la latitude, entre les ressources et les modes de gestion de la forêt européenne est minutieusement analysée dans la dernière partie de l'ouvrage : fort potentiel économique de l'Europe du Nord («une menace pour l'économie forestière?»), vocations multiples de l'Europe du milieu, aux grandes traditions sylvoicoles, extrême fragilité des forêts relictuelles de l'Europe méditerranéenne. Elle ne doit surtout pas conduire à distinguer, comme le voudraient les pays producteurs de bois, «l'Europe des productions, celle des protections, celle de la biodiversité», proposition qui pourrait avoir des conséquences catastrophiques sur l'activité des zones rurales et les secteurs boisés de faible rentabilité. Il convient de «dépasser les approches sectorielles pour considérer la forêt européenne comme un milieu de culture autant qu'un lieu de nature», nous dit Laurent Simon, dont il faudrait citer la conclusion tout entière, magistrale synthèse.

Marcel BOURNÉRIAS

Biologie

Histoire des sciences de la vie

Pascal Duris et Gabriel Gohau.
Éditions Nathan, 1997.

La transmission de connaissances scientifiques à des non-spécialistes est un exercice difficile et hasardeux : la science peut devenir incompréhensible, voire angoissante pour l'élève, l'étudiant, le citoyen qui manque d'une culture scientifique suffisante ou d'une réflexion épistémologique. Et c'est un fait que la présentation médiatique des dernières réussites spectaculaires de quelques disciplines

moléculaires déroutent, tant ces résultats sont éloignés des savoirs élémentaires.

La biologie n'a pas commencé avec la thérapie génique, les organismes génétiquement modifiés, les hantavirus et les prions ! Pour réduire la distance entre les chercheurs et le public, et pour entamer un processus d'acculturation indispensable, on doit penser autrement la communication scientifique. La maîtrise de quelques concepts de biologie, par exemple, permettra à toute personne de comprendre le fonctionnement de son corps, les enjeux liés à l'environnement ou l'évolution des êtres vivants ; elle aura ainsi la vision d'une science en train de se faire, et non d'un produit fini, universel et intemporel.

Ce programme de bon sens est celui que proposent Pascal Duris et Gabriel Gohau dans leur *Histoire des sciences de la vie*. Finies les hagiographies de savants illustres, dont les intuitions géniales ont assuré la célébrité et engendré les paradigmes dominants ! En s'appuyant sur une relecture objective, documentée et argumentée de l'histoire des sciences, les auteurs n'escamotent pas les fausses pistes, erreurs, crises, expériences mal interprétées. Ils nous montrent la vraie vie des laboratoires, où le lot commun est la longue traque, et où l'exception est la découverte. Ce livre ne revendique pas l'exhaustivité, mais des choix pertinents et, parmi les thèmes abordés, le concept clé de l'espèce alimente encore nombre de débats et de publications.

Au XVIII^e siècle, l'encombrement des cabinets d'histoire naturelle, résultant de la remarquable diversité du vivant, a imposé un classement du bric-à-brac des collections. Carl von Linné (1707-1778), observateur et descripteur hors pair de la nature, a séparé la détermination des caractéristiques des espèces animales ou végétales, la diagnose, de la nomenclature ; sa classification binominale (genre et espèce) reste utilisée aujourd'hui. Son système de la nature est l'œuvre d'un dieu créateur, responsable de la place de toutes les «choses naturelles». Même si la classification de Linné est imparfaite, elle ouvre la voie à de nombreux autres savants, tels Bernard et Antoine-Laurent de Jussieu, qui proposent une méthode naturelle pour ordonner les végétaux, bientôt étendue aux animaux. Cette nouvelle systématique tient compte de caractères plus nombreux et des «affinités» (ressemblances anatomiques, milieux occupés, etc.) des êtres vivants.

Cependant l'idée d'espèce n'a pas le même sens pour tous : certains consi-



Carl von Linné, au retour d'une exploration naturaliste.

dèrent l'espèce comme naturelle, d'autres comme artificielle, biologique ou typologique, immuable (c'est le fixisme de Georges Cuvier) ou mutable (c'est le transformisme de Jean-Baptiste Lamarck, pour lequel «les espèces varient selon les circonstances et le temps»). Puis, avec l'évolutionnisme de Charles Darwin (1809-1882), le moteur devient la sélection naturelle. À partir du moment où l'évolution est admise, le problème de l'origine des espèces se pose : génération spontanée ou ascendance commune ? Le changement est-il progressif ou brusque, dû à une adaptation à l'environnement ou à la seule sélection naturelle ? On en discute encore, parfois âprement.

Ce livre, d'une grande lisibilité, traite également de la reproduction et de l'hérédité, ainsi que des grandes manifestations de la vie. Il est doté d'encadrés qui font le lien avec la science actuelle, de sources documentaires sérieuses, d'une chronologie utile, d'un glossaire et d'un index des noms de personnes. Mes réserves ?

Je déplore l'absence d'un chapitre sur l'écologie, et je crois que les auteurs auraient dû faire une place plus importante à la découverte de la structure moléculaire de l'ADN, par James Watson et Francis Crick : leur célèbre publication dans la revue *Nature*, le 25 avril 1953, est

présentée, mais les tâtonnements et les modèles successifs pour arriver à la double hélice sont rapidement évacués. Pourtant le travail a tant marqué la biologie contemporaine qu'il méritait plus que quelques lignes.

Michèle FEBVRE

Astrophysique

On a perdu la moitié de l'Univers

Jean-Pierre Petit. Éditions Albin Michel, 1997

Le titre de l'ouvrage est accrocheur, et le thème passionnant : Jean-Pierre Petit ne propose rien de moins qu'une théorie cosmologique pour faire concurrence à celle du Big Bang et résoudre les nombreux problèmes en suspens présentés en première partie de l'ouvrage, telle la dynamique des galaxies, qui résiste depuis longtemps aux efforts des théoriciens. La théorie en question postule l'existence d'un univers parallèle de matière «ombre» ou «fantôme»

qui n'interagirait avec le nôtre que par la gravitation... sous une forme répulsive. Cet univers serait-il la moitié perdue que mentionne le titre ? Mais alors pourquoi l'assimiler à tort à l'antimatière (où chaque particule est remplacée par une particule de charge électrique opposée) de notre Univers (autre moitié disparue), pour se contredire plus loin en expliquant que l'univers-ombre, «symétrique» en tout point du nôtre, doit en fait posséder sa propre antimatière-ombre ? Matière et antimatière, matière-ombre et antimatière-ombre sont ici quatre entités distinctes, bien que symétriques deux à deux. Environnés presque exclusivement de matière normale, aurions-nous donc perdu les trois quarts de l'Univers ? Ce genre de confusion, qui nuit à la clarté de l'exposé, n'est malheureusement pas un cas isolé.

À côté d'images et d'explications brillantes (la marmite-Céphéides, l'émulsion gravitationnelle des deux univers, les «cheveux» de champ magnétique «peignés» par le plasma, etc. — le souffle d'Anselme Lanturlu n'est pas loin), le livre de J.-P. Petit contient nombre d'imprécisions, de coquilles et même d'erreurs graves, qui donnent l'impression d'une écriture hâtive. Par exemple, la discussion des trous noirs, qui n'apporte d'ailleurs rien au débat cosmologique, est fondée sur un concept erroné : l'auteur écrit qu'ils sont une solution des équations de la relativité générale correspondant à un espace dépourvu d'énergie et de matière, mais c'est inexact, puisque cette solution (de K. Schwarzschild) a été dérivée pour une distribution de matière-énergie à symétrie sphérique (voir, par exemple, *Les trous noirs*, de J.-P. Luminet, Éditions du Seuil, 1992).

Le choix des questions abordées, aussi, est discutable : si la dynamique des galaxies, les structures à grande échelle et les mirages gravitationnels (pour lesquels la matière-ombre fournit des pistes intéressantes) sont évidemment au cœur de la problématique examinée dans l'ouvrage, les sursauts gamma ou la physique des premiers instants, au demeurant médiocrement traités, y ont nettement moins leur place. À l'inverse, on regrettera que soient passées sous silence des questions très actuelles et pertinentes, comme la violation de la symétrie CP (piste possible vers l'asymétrie matière-antimatière ; voir, par exemple, *L'antimatière*, de G. Chardin, Éditions Flammarion, 1996) ou les simulations de l'apparition des grandes structures fondées sur les «grumeaux» observés par le satellite COBE dans le rayonnement cosmologique à la température de trois kelvins.

S'agit-il de lacunes et d'oublis ? Rien n'est moins sûr, vu le style très polé-

POUR LA 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 adjointe), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot (Rédacteurs). Secrétaire de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte, assisté de Anne Gusdorf. Service du personnel : Sylvie Gacem. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Paloma Cabeza-Orcel, Bettina Debû, Philippe Delaveau, Marc Lachière-Rey, Marie-Thérèse Landousy, Agnès Lherm, Valérie Martin-Rolland, Anne Masé, Claude Olivier, Guy Paulus, Éric Rielt, Roseline Talbot, Pierre Tougne.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : Robert Biewen, Frances Newburg, John Moeling, Anthony Degutis.

PUBLICITE France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28.
Télex : LIBELIN 202978F.
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon : 01 55 42 84 04.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH-1027 Lonay

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 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 d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

mique de l'ouvrage. La première partie dresse en effet un tableau accablant de la science «officielle», dépeinte en situation d'échec et d'impasse face aux grandes questions de l'astrophysique, comme l'illustrent les difficultés des théories qui s'appuient sur la matière «sombre» à rendre compte des structures galactiques. L'auteur semble avoir du mal à faire passer ses idées novatrices dans les revues scientifiques traditionnelles. On peut comprendre sa volonté de fustiger leur conservatisme, mais est-il besoin de présenter le scientifique contemporain comme un incapable borné ou malhonnête, et l'original novateur comme une victime? Einstein lui-même n'échappe pas à ce mitraillage tous azimuts, qui va jusqu'à la calomnie (voir, par exemple, la note sur Einstein-Schwarzschild), ce qui est moins compréhensible. Ce réquisitoire contre le dogmatisme scientifique pourrait servir de base à de saines discussions (voir *L'autorité de la science*, de F. Lurçat, Éditions du Cerf, 1995), mais il ne paraît être là que pour pallier les lacunes de l'exposé.

La confrontation, dans la deuxième partie de l'ouvrage, de la théorie de l'univers-ombre et de celle de la matière sombre («matière noire» ou «masse cachée»), plus classique, est extrêmement partielle. Cette dernière est «évacuée» en deux pages et suivie d'un dithyrambe détaillé de la théorie nouvelle, à grand renfort de titres et de citations de ses initiateurs : d'un côté, «les astrophysiciens» ; de l'autre, «Green, professeur au Queen Mary College de Londres, Schwarz, professeur au département de physique de l'Institut de technologie de Californie, et le prix Nobel Abdus Salam», sans parler de «l'académicien russe Andreï Sakharov» (récupéré pour son univers-jumeau, où l'antimatière remplacerait la matière). Comment mettre en doute les idées de telles sommités? La substitution de cet argument d'autorité à une discussion claire et argumentée est irrecevable et non scientifique, mais malheureusement fréquente. En allait-il autrement quand l'auteur relatait ses contacts avec les «Ummites» sous l'étiquette ostensible de «Directeur de recherche au CNRS»? Enfin, l'abondance d'anglicismes inutiles dans le livre de J.-P. Petit a-t-elle une raison d'être autre que «faire sérieux»?

De tels artifices – si on les remarque – desservent l'auteur en fragilisant son argumentaire scientifique. Mais à qui s'adresse l'ouvrage? Apparemment au grand public, puisqu'une «Annexe scientifique» y est réservée au spécialiste (vraiment très spécialiste, en l'occurrence, vu le survol rapide de concepts difficiles). Malheureusement, à de très (trop!) nombreuses reprises, l'auteur met au vestiaire son «talent de vulgarisateur», pourtant vanté

dans la préface, et renonce tout simplement à expliquer les concepts jugés «trop compliqués» et hors de portée du vulgum pecus... à qui il ne reste donc qu'à croire le jargon qu'on lui propose. C'est d'autant plus décevant que J.-P. Petit a largement prouvé son aptitude à vulgariser.

Ce livre a-t-il pour but de mettre des idées nouvelles à la portée du public ou est-il pour l'auteur une occasion de publier en réaction à l'inertie de l'«establishment» scientifique? Le contenu et le style de l'ouvrage me font opter pour la seconde solution, mais la démarche est problématique : un tel livre ne subit pas le test du «jugement par les pairs», pratiqué par les revues spécialisées. Là, chaque article, pour accéder à la publication, doit être positivement jugé par un à trois scientifiques choisis pour leur compétence. Cette contrainte constitue une garantie minimale de qualité et laisse du temps pour que les idées mûrissent avant d'être diffusées.

L'ouvrage ici évoqué brûle les étapes : par exemple, l'argument majeur que l'auteur utilise pour réfuter la théorie du Big Bang standard est l'âge de huit à dix milliards d'années déduit pour l'Univers à partir de l'observation récente de quelques Céphéides extragalactiques par le télescope spatial *Hubble* (1994-1995). Cet âge pose problème, car celui des plus vieilles étoiles a été indépendamment estimé à 15 milliards d'années... mais les premières analyses étaient peut-être trop hâtives et entachées d'erreurs, car un article récent (par Theureau et al., *Astron. Astrophys.*, 1997) déduit un âge de 12 à 15 milliards d'années de l'analyse statistique d'observations similaires plus nombreuses. Il n'est donc peut-être pas nécessaire de tout démolir, et la reconstruction est prématurée.

«En science, on juge l'arbre aux fruits», écrit l'auteur. Si on lui applique cette pertinente maxime, il apparaît qu'ici les fruits sont pour le moins verts. Pour être une idée intéressante et à suivre, la théorie de l'univers-ombre n'est ni assez développée ni assez «économe» en hypothèses ; le «rasoir d'Occam» nous engage donc à préférer pour l'instant les théories en vigueur.

On ne peut en conséquence conseiller la lecture du livre de J.-P. Petit qu'au travers d'un regard très critique, ce qui le réserve au lecteur averti.

Philippe ZARKA

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>