

Pour la Science



POUR LA

# SCIENCE

Octobre 1997

édition française de

SCIENTIFIC  
AMERICAN

Meurtrières  
coulées de boue

Présents nuptiaux  
d'insectes

L'archéologie à distance

Éclairs entre ciel et terre

ADN, maladies  
et vieillissement

Le quark top

Résistance au SIDA

# Le laser, maître des éclairs

Canada : \$ 8,75

**Bloc-notes** de Didier Nordon

7

**Tribune des lecteurs**

8



**Les inattendus de la science**

10

Qu'est-ce que la vie artificielle?  
par Francisco Varéla

**Point de vue**

Jeune biologiste, quel avenir?

14

par Alain Fochiantz et Henri Korn

ITER...ation

16

par Francis Troyon



**Présence de l'histoire**

20

Les chimistes et l'affaire Dreyfus  
par G. Bram, M.-P. Hamache et N. Pigeard

**Jeu-concours**

23

De l'art de demander

par Pierre Tougne

**Science et finance**

24

De Saint-Petersbourg à Miami

par Christian Walker

**Science et gastronomie**

27

Le froid et le chaud

par Hervé This



**Perspectives scientifiques :**

28

Explosion de poussières  
Mucoviscidose  
Les adhésifs néolithiques

Vers des mers

Qui vivra verra

Poches d'ozone

Sons rugueux, sons tendus

Virus artificiels

Les feuilles de coca

Les langues européennes dans le monde

Chant meurtrier

Défense du territoire

Oscillations du Pacifique



**Visions mathématiques**

96

La quadrature du carré  
par Ian Stewart



**Logique et calcul**

100

L'art du tri

par Jean-Paul Delahaye

**L'Image du mois**

107

Discrimination sexuelle

**Savoir technique**

109

Les détecteurs de fumée

**Analyses de livres**

110

- La revanche des sorcières, de Pierre Thuillier
- La chimie exocharmique, de Paul Depovere
- Chemical Curiosities, de H.W. Roesky et W. Möckel
- Scientific Unit Conversion, de François Cardarelli
- La révolution alimentaire, de Philippe Vasseur

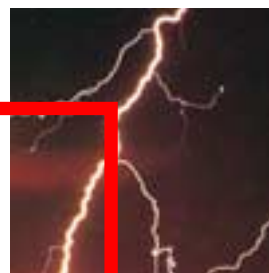
**Des lasers**

**pour déclencher la foudre**

42

par Jean-Claude Diels,  
Ralph Bernstein, Karl Stahl-  
kopf et Xin Miao Zhao

Pour protéger les équipe-  
ments industriels, on cherche  
à dévier les éclairs dangereux  
à l'aide de lasers.

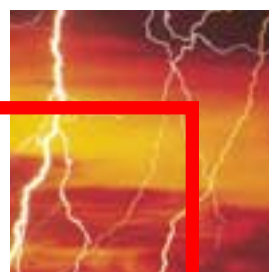


**La foudre au-dessus  
des nuages**

48

par Stephen Mende,  
Davis Sentman  
et Eugene Wescott

Les physiciens observent une  
curieuse activité électrique au-  
dessus des nuages, par temps  
d'orage.



**ADN mitochondrial,  
maladies et vieillissement**

52

par Douglas Wallace

Des anomalies de l'ADN pré-  
sent dans des structures mi-  
tées au cœur des cellules,  
nommées mitochondries, sont  
responsables de diverses mala-  
dies et peut-être des patholo-  
gies de la vieillesse.



**Les coulées de boue**

62

par Philippe Coussot

Les coulées de boue en mon-  
tagne, des laves torrentielles  
dévastatrices charriant blocs  
de rochers, graviers et parti-  
cules argileuses, ont un com-  
portement étrange : elles se  
déversent par vagues et peu-  
vent s'arrêter à mi-pente.

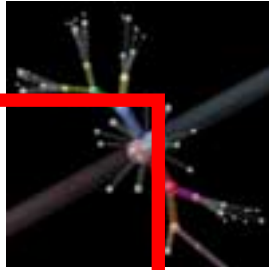


## La découverte du quark top

68

par Tony Liss et Paul Tipton

L'accélérateur de particules le plus puissant du monde, conduit par des milliers de personnes, a identifié le sixième et dernier quark.

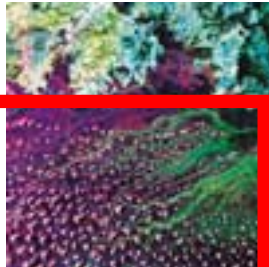


## L'archéologie à distance

76

par Farouk El-Baz

Les techniques de télédétection transforment le travail des archéologues, qui n'ont plus à creuser la terre pour comprendre le passé.

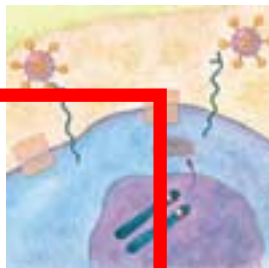


## Pourquoi certaines personnes résistent au SIDA

8

par Stephen O'Brien et Michael Dean

La découverte d'un gène qui protège contre le SIDA ouvre de nouvelles voies de recherche sur le traitement et sur la prévention.



## Les offrandes nuptiales des insectes

90

par Darryl Gwynne

Les sautélles mâles donnent, en même temps que du sperme, des sécrétions nutritives qui sont consommées par les femelles.



# ÉDITORIAL

## Impénétrables voies de Zeus?

Puissance de l'esprit. Dans la touffeur des salles de classe, la distraction apportée par les orages était désirée et appréciée. Les cours s'interrompaient et l'instituteur incitait les élèves à compter les secondes séparant l'éclair du roulement de tonnerre. De cette mesure, ils déduisaient la distance de l'orage. Pourquoi l'éclair était instantané, et le roulement de tonnerre plus long, était d'explication plus délicate. Le professeur s'aventurait à expliquer que l'onde de choc sonore se produisait à différents éloignements le long de la trajectoire de l'éclair, et qu'ainsi, les bruits nous arrivaient décalés, une seconde correspondant à une différence de distance de 300 mètres.

Limites de l'esprit. Le mystère de ce phénomène banal subsiste. Les physiciens ignorent pourquoi la Terre est chargée positivement et les nuages négativement. Les ingénieurs ne savent pas davantage récupérer l'extraordinaire énergie dissipée lors des orages. Tout au plus pensent-ils pouvoir déclencher les orages en créant un canal conducteur entre le sol et les nuages (*Des lasers pour déclencher la foudre*, page 42).

La physique et la chimie de l'atmosphère sont champs d'études difficiles. Des phénomènes fondamentaux sont inexpliqués, comme les rayonnements émis par certains éclairs au-dessus des nuages. Les réactions entre les gaz de l'atmosphère, responsables de l'effet de serre, du trou d'ozone à haute atmosphère, de la trop forte concentration du même gaz près du sol, sont incomplètement élucidées. Les consommateurs d'atmosphère que nous sommes souhaitent qu'une mobilisation des recherches sur le sujet puisse contrecarrer les pollutions, certaines de facture humaine.

Le Perse Artanabis, conseiller de Xerxès, avait noté que la foudre divine tombait sur les gros animaux et les grands édifices, pour les punir de leur arrogance, pensait-il. Allons jusqu'au bout de nos prétentions prométhéennes.

Philippe BOULANGER

Par Didier Nordon

## Jeu de dollars

**P**eut-on penser le monde ? Quand les auteurs d'un livre s'autorisent un titre aussi ronflant, ils ne doivent attendre aucune indulgence de la part du lecteur. Disons donc, sans indulgence, que ce livre répond d'une façon seulement partielle à la question posée par son titre : il démontre d'une manière convaincante que les auteurs du livre, eux, ne peuvent pas penser le monde – et il s'en tient là (M. Benasag, H. Akdag, C. Secroun, *Peut-on penser le monde ?*, Félin, 1997).

On note (pp. 75-76) une remarque qui semble témoigner d'une curieuse compréhension des probabilités : « Les probabilités ont longtemps servi à modéliser des jeux de hasard et pourtant elles ne permettent pas toujours de gagner. Réciproquement on peut se demander si la personne qui a gagné l'année dernière, en France, que que dix millions de dollars au Loto a utilisé des outils probabilistes. L'efficacité de ces outils est donc mise en cause. »

Laissons les probabilités, que je ne connais guère, et concentrons-nous sur le Loto... que je connais encore moins. Je puis donc me tromper, mais quand même : si le Loto français payait les heureux vainqueurs non en millions mais en dollars, je crois que cela traiterait mieux suffisamment pour que j'en entende parler jusqu'en ma tour d'ivoire. Commercialisation de la pensée, via le porte-monnaie.

## La kilopage

**J**e père, sachez-le, une bonne kilo, et j'en père en peser deux, peut-être trois, le jour où je prendrai ma retraite. Le « poids » d'un universitaire, en effet, se mesure en nombre de pages publiées. J'en suis à mille et quelques – ce que j'appelle une kilopage. Abréviation : une kilo.

Cette nouvelle unité est imposée par les nécessités du temps. C'est en effet par milliards que les grandes bibliothèques entassent les pages imprimées ; c'est par millions que, chaque année, en France, naissent les pages supplémentaires. Aucun doute : la page n'est plus une unité de mesure adaptée. De même que les administrations ont pris l'habitude de parler en kilofrancis, mégafrancis, introduisons une nouvelle échelle de mesure pour le papier imprimé : la kilopage, la mégapage, etc.

Les mots ont du pouvoir. L'idée qu'il parait chaque année des milliers de livres qui vont grossir les milliards de pages dans les bibliothèques est accablante. Nous sommes bien petits, face à ce déferlement. En revanche, quelques kilolivres s'ajoutent à quelques gigapages – il n'y a là plus rien d'effrayant.

## Cette obscure clarte

**E**st-il légitime de goûter la science comme on goûte la poésie, en se laissant aller au charme des mots sans

## Les rires sont passés

« **D**u mécanisme plaqué sur du vivant. » Telle est, selon Bergson, la source du rire. Thèse souvent discutée. Mais pourquoi l'exemple que donne Bergson l'est-il si peu ? « Un homme, qui courait dans la rue, trébuche et tombe : les passants rient. »

Jamais j'en ai vu rire quiconque lorsque quelqu'un tombe dans la rue. C'est au contraire un moment stressant. Non seulement l'inquiétude de savoir si la personne s'est fait mal, mais aussi une espèce de crainte sacrée. La moindre des choses, quand on est civilisé, c'est de tenir debout sur ses jambes. Si dans nos rues, un homme échoue à cela, nos efforts sont, le temps de sa chute, réduits à néant. L'homme tombe, les conventions vacillent, le malaise est là.

Pourquoi Bergson riait-il ? Était-il secrètement anarchiste, ravi de voir l'ordre social bafoué ? J'en doute. Le plus probable est que nous ne rions pas des mêmes choses que lui. D'une époque à une autre, un événement donné n'éveille pas les mêmes échos en nous qui ne sont éternels. Ainsi, la chute peut de causes variables, sinon opposées, aujourd'hui et hier. Il y a là un impressionnant mystère. Qui sait ? Peut-être l'ouvrage de Bergson sur le rire sera-t-il un jour considéré comme un grand morceau comique.

Jeu. Essayer d'imaginer, inversement, un type d'incident qui nous fait rire aujourd'hui, mais dont on peut penser qu'il n'aurait fait rire personne à l'époque de Bergson – pas même Bergson.

se soucier de leur sens précis ? A-t-on le droit de préférer la rime à la raison ?

l'étrange beauté des lignes suivantes, le vertige métaphysique que, par leur mystère, elles suscitent, donnent envie de les recopier. Mais que personne ne vienne me demander ce qu'elles signifient au juste ! « Considérons la frontière du futur d'un ensemble  $S$ . Cette frontière ne peut pas être du genre temps. Car dans ce cas un point  $q$  juste à l'extérieur de la frontière serait dans le futur d'un point  $p$  situé juste à l'intérieur. La frontière du futur ne peut pas être non plus du genre espace. Car dans ce cas, toute courbe dirigée vers le passé issue d'un point  $q$  situé juste dans le futur de la frontière, traverserait la frontière et quitterait le futur de  $S$  – en contradiction avec le fait que  $q$  est dans le futur de  $S$ . On conclut que la frontière du futur

est du genre lumière. » Ces lignes sont issues du livre de Stephen Hawking et Roger Penrose consacré à la nature de l'espace et du temps (Gallimard, 1997, pp. 42-43). La dite nature serait donc la lumière. Reste à savoir si ce genre de lumière nous éclaire vraiment beaucoup...

## Un amour capital

« **L**es langurs dorés se réconcilient en se prenant la main, les chimpanzés communs en s'embrassant sur la bouche, les Bonobos en s'accouplant, les macaques de Tankean en s'étreignant et en faisant claquer leurs lèvres. [Le phénomène de réconciliation] semble très répandu dans l'ordre des primates : il existe chez le chimpanzé, le Bonobo, le gorille de montagne, le langur doré, le capucin, le lémur à front roux, le patas, le vervet, les babouins, et toute une série de macaques. » (Frans de Waal, *Le bon singe*, Bayard, 1997, p. 223.) Dommage que le ratonaveur ne soit pas un primate, lui qui doit figurer dans toute énumération digne de ce nom !

Ce qui m'intrigue n'est pas que les primates sachent se réconcilier. Des animaux aussi belliqueux que les hommes s'y parviennent bien – parfois. Alors, pourquoi pas les primates ? Ce qui m'étonne, c'est que, dans l'extrait ci-dessus comme dans l'ensemble du livre de Frans de Waal, le Bonobo est le seul primate qui prenne systématiquement une majuscule. Son nom, certes, a un vague air de nom de peuplade, mais ce n'est pas une raison.

Mystère de la nature...

## Trou ou noyau?

Il existe une célèbre définition du trou : c'est en, avec quelque chose autour. Le trou noir des astrophysiciens (voir *Dossier Hors-série Pour la Science*, juillet 1997) ne correspond pas à cette définition. C'est même l'inverse : beaucoup de choses avec, relativement rien autour. Il s'agit donc de faux trous, que l'on pourrait appeler des Sombres Noyaux. Le mot noyau est très utilisé en économie politique. Il désigne une concentration d'argent et de pouvoir analogue aux objets célestes qui se cachent au cœur des galaxies. Le noyau dur économique attire lui aussi tout ce qui se présente à sa portée : les accrétiens les épargnants – qu'il engloutit sans retour. Rien n'en resurgit, et la lumière elle-même ne peut éclairer plus les comptes.

Jean PAULHAC, Montreaux

## Les prépas évoluent

Je déplore, comme Pierre-Gilles de Gennes (voir *Grandes écoles ou Facultés?*, *Pour la Science*, août 1997), la tendance à l'immobilisme pédagogique qui règne dans le milieu des classes préparatoires. Néanmoins nous avons, cette année, introduit les TIPE (travaux d'intérêt personnel encadrés), et on peut en tirer quelques enseignements. Cette introduction prouve que lorsqu'existe une volonté commune de quelques «sages», de quelques directions d'écoles, de l'inspection générale et d'une fraction suffisamment grande des enseignants de classe préparatoire, un mouvement est produit qui permet un changement de méthode et d'état d'esprit.

Les TIPE ne sont restés fidèles au projet initial que dans la filière biologique (ailleurs, ils sont devenus une simple compilation bibliographique). Cela prouve une particulière ouverture d'esprit des biologistes et des géologues. Cela prouve aussi que les pesanteurs sont difficiles à vaincre et que cela a été plus facile dans une filière qui compte moins de classes que les autres filières scientifiques.

L'enthousiasme spectaculaire dont ont fait preuve nos élèves montre (mais qui en doutait?) qu'ils sont plus portés au changement que les adultes chargés de leur formation.

Les difficultés rencontrées ici et là dans les concours montrent qu'une nouveauté n'est pas acquise lors de sa mise en place : les tenants de l'immobilisme guettent et sont prêts à employer tous les arguments (notamment financiers) pour revenir en arrière.

Contrairement à P.-G. de Gennes, je ne suis pas convaincu du caractère aléatoire des concours des grandes écoles. Ce système a l'avantage d'être très démocratique et de laisser place aux influences individuelles. Par ailleurs, si la malchance existe, les rudiments de calcul de probabilité que je possède et l'observation de mes élèves pendant plusieurs années me font penser que la malchance ne survient que rarement deux années de suite pour un même élève. Cette remarque suffirait, il me semble, à justifier les redoublements. En revanche, c'est vrai, on observe des coups de chance spectaculaires. Mais la vie ne sourit-elle pas notamment à ceux qui savent exploiter un coup de chance?

J'ai souvent observé des élèves qui avaient heureusement réussi à comprendre en classe de «spéciales» et qui n'ayant plus à apprendre l'année de leur redoublement en profitaient pour assimiler, dominer le savoir scientifique acquis. En prenant du recul, ils pouvaient faire les rapprochements utiles entre différents aspects du savoir scientifique, réfléchir à la signification des mécanismes qu'ils avaient été simplement compris l'année d'avant. Plusieurs de mes élèves sont ainsi entrés dans une École normale supérieure et se sont lancés dans la recherche alors qu'ils ne l'auraient pas pu (pas seulement pour des questions de réussite au concours) à la fin de l'année de leur première «spéciales».

P.-G. de Gennes critique le programme d'enseignement des classes préparatoires : «Il y a autre chose à apprendre». C'est probablement souvent vrai. Mais les classes préparatoires ne sont que des prestataires de service qui répondent à un cahier des charges fixé par leurs clients, les écoles. Si le programme n'est pas satisfaisant, pourquoi les écoles ne participent-elles pas plus activement à la rédaction, au lieu de pratiquer trop souvent la politique de la chaise vide, laissant finalement aux professeurs de classes préparatoires le soin de rédiger les programmes et, en grande partie, de constituer les jurys de concours? Les professeurs de classe préparatoire ne demandent pas mieux que d'être utiles aux écoles, encore faut-il que celles-ci définissent leurs besoins. Nous avons souvent l'impression décourageante qu'elles n'attendent rien d'autre qu'une sélection selon des critères qui importent peu, et que certaines remplaceraient volontiers un coûteux concours par la récitation de l'annuaire téléphonique qui permettrait un efficace classement des candidats.

Dominique ROJAT, La Murette

## Cook astronome

À la suite de Denis Savoie (voir *La prévision des éclipses*, *Pour la Science*, juillet 1997), on pourrait faire un parallèle entre Le Gentil, dont la vie fut dominée par deux observations ratées d'éclipses, une de Soleil en 1761 et une conjonction avec Vénus à Pondichéry en 1769 et James Cook le bienheureux (dumoins avant qu'il ne revienne aux îles Hawaii).

D'après le *leaglehole*, ce dernier dut sa future carrière au fait que, alors qu'il cartographiait au St-Laurent, puis à Terre-Neuve et au Labrador, il y observa une éclipse de Soleil en 1766. Le rapport de ces observations fut tellement apprécié de la Société royale et de l'Amirauté, que son nom fut retenu quand il s'agit d'organiser et de conduire une expédition pour observer le passage de la planète Vénus sur l'île paradisiaque d'«Otaheite», que Wallis venait de découvrir. Bien qu'il soit entouré d'une équipe prestigieuse de scientifiques dirigée par le brillant Joseph Banks, Cook fut charmé personnellement, avec l'aide de Charles Green, de l'observatoire de Greenwich, d'effectuer les observations de Vénus. Il choisit comme lieu d'observation ce qu'on nomme depuis la pointe Vénus. Apparemment l'observation, le 3 juin 1769, se déroula sans histoire.

L'intérêt qui porta l'Angleterre à cette conjonction est notable, car elle envoya deux autres équipes de deux observateurs, l'une dans la Baie d'Hudson et l'autre en Laponie. Comparativement, Le Gentil avait l'air plus isolé...

Gaston PICHON, Bondy

Le temps était beau, le 3 juin 1769, à Tahiti mais les instruments apportés par Cook, bien qu'anglais, et donc les meilleurs de l'époque, ne permirent pas de déterminer la distance du Soleil. Voilà qui a dû consoler Le Gentil.

Pierre GANGER, Louveciennes

## Asymétrie climatique

Jean-Claude Duplessy écrit (voir *Les Inattendus en climatologie*, *Pour la Science*, juillet 1997) qu'«il y a 11 000 ans la Terre était plus froide pendant l'hiver et plus chaude pendant l'été». Cette phrase semble décrire la situation de l'hémisphère Nord. Dans l'hémisphère Sud, la situation était exactement inverse.

Les rayonnements solaires reçus par l'hémisphère natal des climatologues détermi-

neraient-ils seule la météorologie de toute la planète ? Il ne doute pas de l'importance du phénomène de précession des équinoxes, mais je m'étonne qu'il consacre autant d'anthropologie à nos *a priori* géopolitiques.

AYERDHAL, Ecully

## Réponse de Jean-Claude Duplessy

Les deux hémisphères sont très dissymétriques. L'hémisphère Sud a un continent englacé en permanence, l'Antarctique, lui-même entouré d'un océan froid. Les variations de volume des glaces sur l'Antarctique sont donc très limitées. Au contraire, l'hémisphère Nord dispose de continents aux hautes latitudes, aujourd'hui libres de glace, mais susceptibles de s'englacer facilement si la température y baisse un peu (de vastes zones du Canada sont juste au-dessus des températures moyennes annuelles négatives et peuvent garder des « neiges éternelles » si les températures s'abaissent de moins de un degré). C'est pourquoi l'hémisphère Nord est particulièrement sensible aux variations de l'insolation aux latitudes de 5°N. En plus, deux phénomènes amplifient cette sensibilité :

- le ralentissement du Gulf Stream qui remonte moins au Nord et provoque une baisse des températures de la mer de Norvège et du Groenland, ce qui contribue à amplifier le refroidissement des hautes latitudes de l'hémisphère Nord ;

- la disposition de la forêt boréale si la température de l'air diminue un peu. Cette forêt disparaît pour se transformer en toundra qui absorbe moins le rayonnement solaire et facilite le développement d'un manteau neigeux qui lui aussi réfléchit le rayonnement solaire. Tout cela amplifie le refroidissement dû à la baisse de l'insolation.

La climatologie ne connaît donc ni anthropocentrisme, ni *a priori* géopolitique, mais répond strictement aux lois de la physique.

## Les vrais ancêtres

La première pièce d'hominidé (un fragment d'humérus), découverte à Kanapoi au Kenya en 1965 par Bryan Patterson, fut publiée dans *Science* en 1967 par ce dernier et son collègue Howell. Moore, Leakey et Alan Walker affirment que l'importance de cette découverte ne sera reconnue qu'une trentaine d'années plus tard (voir *Les premiers hominidés en Afrique*, Pour la Science, août 1997). Il n'en est rien ! Les nouvelles découvertes réalisées sur le site

de Kanapoi confirment des travaux français réalisés à la fin des années 1970. C'est notamment cette pièce réétudiée en 1977, et que j'ai attribuée à *Homo*, en 1979, qui a été à l'origine du débat sur la présence d'un type d'hominidé très humain vers quatre millions d'années en Afrique orientale. Cet hominidé en aurait coexisté avec des australopithèques : avec l'étude du matériel de Hadar, depuis 1978, de nombreux auteurs ont émis un doute sur le fait que les fossiles regroupés sous le nom d'*Australopithecus afarensis* appartenaient à une seule et même espèce. Ils montraient qu'il y avait deux hominidés mélangés dans l'espèce *afarensis*, un australopithèque et un *Homo* ancien.

Dans l'article, il est clairement précisé que les éléments postcrâniens d'*Australopithecus anamensis* sont très humains, et que ses éléments craniodentaires sont identiques à ceux des hominidés de Laetoli. Or, ces derniers, rapportés à *Australopithecus afarensis* en 1978, devraient, en fait, être attribués à *Praeanthropus africanus* (défini à partir d'un maxillaire trouvé à Garusi dans les gisements de Laetoli en 1938), mais lorsque l'espèce *afarensis* fut créée, ses inventeurs pensaient que ce matériel appartenait à un australopithèque. Les découvertes récentes de Kanapoi confirment que le *praeanthropus* a existé, que le matériel de Laetoli n'appartient probablement pas à un australopithèque et que la démarche bipède de type humain est très ancienne.

Les travaux de M. Leakey et A. Walker sous-tendent l'idée que les australopithèques ne sont pas nos ancêtres directs, bien qu'ils n'en aient pas été dans leur phylogénie, fondée sur les caractères dentaires. Si on accepte cette dernière, il faut envisager qu'un mode de locomotion aussi spécialisée que le nôtre soit apparu vers quatre millions d'années, pour disparaître chez les australopithèques, puis réapparaître chez *Homo* vers 2,5 millions d'années.

D'un point de vue évolutif, ceci est discutable. En revanche, si on utilise le mode de locomotion comme base de la reconstitution phylogénique, le schéma se clarifie. Le matériel de Kanapoi confirme que la bipédie humaine serait apparue très tôt et avec elle la lignée humaine. Les caractères primitifs sont en évidence sur les mâchoires et les dents indiqueraient que ces êtres auraient eu un type d'alimentation et de mastication peu différent des premiers australopithèques, car ils avaient accès aux mêmes nourritures. Les *praeanthropes*, premiers représentants de la lignée humaine, auraient côtoyé

les australopithèques, qui ne seraient pas les ancêtres des hommes ultérieurs.

Il faut relever aussi la mauvaise présentation du scénario de l'East Side Story : la séparation entre les grands singes et les hominidés se situe, selon Yves Coppens, vers huit millions d'années (voir *Une histoire de l'origine des hominidés*, Pour la Science, juillet 1994). Dans l'état actuel de nos connaissances, entre huit et quatre millions d'années, plusieurs spécimens et les plus anciens hominidés ont trouvés à l'Est (et exclusivement à l'Est) du Rift au Kenya. La découverte d'*Australopithecus bahrelghazali* au Tchad, d'un *ardipithecus*, ou des pièces de Kanapoi ne met pas en cause l'hypothèse d'Y. Coppens.

Même si l'environnement s'assèche et qu'une savane s'installe, à l'échelle locale, on trouve toujours une forêt-galerie près des fleuves ou en bordure de lac. Il est certain que les forêts ont changé entre huit et quatre millions d'années et que ces dernières se sont adaptées progressivement à des environnements plus ouverts, et il semble bien que nos plus anciens parents aient réagi comme les autres animaux. Les auteurs mélangent deux échelles d'étude : un concept d'assèchement global et la présence de milieu boisé local.

Brigitte SENUT, MNHN, Paris

## L'énergie de SOHO

Le satellite *SOHO* (voir *SOHO révèle les secrets du Soleil*, Pour la Science, août 1997) contient assez de carburant pour dix ans. Les satellites fonctionnent habituellement à l'énergie solaire, alimentés par des panneaux de photovoltaïques : de quel carburant s'agit-il et à quoi sert-il ?

J. GOURIOU, Annemasse

Le satellite *SOHO* fonctionne en effet principalement à l'énergie solaire. Toutefois, il est aussi équipé d'une turbine à gaz, mue par la combustion catalytique d'hydrazine. La mise en route régulière de ce moteur d'appoint corrige les légères déviations du satellite par rapport à sa direction d'axe d'observation.

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



# Qu'est-ce que la vie artificielle?

FRANCISCO VARÉLA

*L'émergence de la vie passe par la compartimentation de la cellule et par une organisation fondée sur la perception-action.*

Il y a une vie «anecdotique» qui a le mérite de frapper les esprits, les Tama-gotchi, ces petits chiens électroniques que l'on nourrit, que l'on soigne ; maltraités, ils meurent, bien nourris, ils se reproduisent. Ils ne sont peut-être pas dignes d'une analyse poussée, mais montrent qu'avant d'envisager la vie artificielle, peut-être faut-il se demander ce qu'est la vie... «naturelle». Le problème de la définition de la vie se pose quand on s'interroge sur ce que pourrait être la vie extraterrestre, la naissance de la vie sur Terre, et la vie minimale. Quelles sont les fonctions qui caractérisent le vivant ?

Dans la méthode scientifique habituelle, on valide les hypothèses par l'exactitude des prévisions fondées sur celles-ci. Avec la vie, le raisonnement méthodologique est légèrement différent : on implémente les qualités hypothétiques de la vie sur un organisme artificiel et quand il se comporte comme un organisme vivant, la définition est validée. L'artificiel permet ainsi de juger les hypothèses sur le fonctionnement de la vie. On définit par exemple ce qu'est une cellule minimale, pour fabriquer un être artificiel qui a les attributs du naturel. On étudie certaines fonctions de système neuronal, on fait des simulations et on les compare aux vrais cerveaux : la simulation confirme notre compréhension du cerveau et la justesse de notre caractérisation.

Cette procédure est d'utilisation délicate. Si l'artificiel est une imitation du naturel, il faut s'interroger : quand l'imitation devient-elle preuve ? Si je construis quelque chose qui n'est pas une imitation, mais qui est qualitativement comparable, voire équivalente, ce n'est plus tout à fait une imitation. Selon notre point de vue, c'est tout de même un moyen pour caractériser le vivant. Le vivant est défini par ses qualités plus que par son mode d'implémentation.

Le volet de l'artificiel, qui appartient à l'ingénieur de la robotique, au biotech-

nologue ou aux gens qui s'intéressent à des applications, est une discipline en soi. Il importe aujourd'hui de séparer le côté technologique et appliqué de l'artificiel, et la base scientifique fondamentale. Nous nous intéresserons ici aux caractéristiques

biologiques de la vie dans ses liens avec les dimensions de l'artificiel relevant de la recherche de base.

## LA COMPARTIMENTATION

La question de la vie minimale rejoint celles sur l'origine de la vie et la vie extraterrestre. Elle impose la détermination d'un critère. Quelles étaient les caractéristiques des premiers organismes vivants ? Quelles questions allons-nous poser à un extraterrestre lointain pour déterminer s'il est un être vivant ?

Deux camps s'affrontent aujourd'hui : ceux qui pensent que l'existence de l'ARN, c'est-à-dire les acides nucléiques, est une condition nécessaire et suffisante, et ceux qui estiment que cette existence n'est que nécessaire et qu'il faut quelque chose de plus. Les ARN sont des molécules qui ont une double fonction : elles sont des briques utilisées pour la construction de structures complexes et ont aussi une capacité catalytique, fonctionnant comme des enzymes. Cette double capacité, que n'a pas l'ADN, a convaincu certains que l'ARN caractérisait le vivant minimal.

Sans ARN, pas de vie. C'est certain. Mais s'il y a l'ARN, y a-t-il vie ? Ma réponse est : pas nécessairement. Il faut qu'il y ait une frontière qui sépare une entité du reste de la soupe moléculaire où elle se trouve.

Tous les biologistes sont convaincus que la vie n'est pas séparable de la notion de cellule, mais les tenants de l'ARN pensent que la cellule n'est qu'une conséquence des possibilités enzymatiques de l'ARN. Le camp de la vie fait partie juge indispensable la constitution d'une membrane frontière, d'un compartiment qui dégage l'ARN des réactions biochimiques externes, et qui n'est pas inscrite dans l'ARN.

Cette séparation biologique doit être engendrée par l'élément constitutif de la vie minimale. D'où la notion que j'ai élaborée il y a quelques années : l'au-



Premiers dessins de cellules par le physiologiste Theodor Schwann (1839).

topoïèse, c'est-à-dire l'autoproduction. La vie est élevée si et seulement si la cellule, au sens étymologique du terme, produit des briques pour construire la frontière qui l'enceint. J'énonçais cette idée il y a une vingtaine d'années pour des raisons qu'on pourrait discuter, mais elle a depuis été reprise par nombre de biologistes.

Pour la remarquable biologiste Lynn Margulis, une telle compartimentation autoproduite est le critère déterminant l'origine de la vie, le moment où les macromolécules complexes s'enchaînent pour constituer les bords du compartiment interne. Sur Mars, si nous voulons prouver l'existence de la vie, il faudra trouver des «cellules» autoproduites soit par ARN, soit par d'autres molécules.

On pourrait penser que les biologistes manquent d'imagination dans la mesure où ils ne peuvent imaginer une vie sans ARN. L'équipe de L. Eiserich, à l'Institut polytechnique de Zurich, a essayé de constituer des cellules uniquement des lipides membranaires et a partiellement réussi au prix d'une ingéniosité expérimentale absolument admirable. Aussi la question reste ouverte : il y a peut-être deux ou trois autres possibilités autres que l'ARN, mais le choix est certes limité.

## ROBOT EXPERT OU ROBOT BÉBÉ ?

La robotique est un autre versant de la question. Tout le monde a vu *2001, l'odyssée de l'espace* où HAL, une énorme machine, incarne la notion du robot des années 1960-1970, un appareil cognitif extrêmement logique, performant, avec une mémoire formidable, des capacités déductives, etc. Qu'est-ce qui manque à HAL ? Le corps ! HAL n'est pas incarné dans une souplesse de perception et action qui lui donne une autonomie par rapport à son monde.

Ce qui manque aux robots n'est pas la mémoire ou la logique, c'est la simple capacité de voir, de faire des mouvements en fonction de la perception de l'environnement. L'expert d'échecs n'est pas le héros à imiter, l'expert, c'est le bébé. Les bébés dépourvus de connaissance abstraite se débrouillent très bien dans leur environnement. La partie la plus longue de l'évolution a été l'établissement de la capacité d'exister comme une entité autonome, qui bouge et qui perçoit. Les arthropodes, nos plus vieux compères dans l'histoire de la planète, ne sont essentiellement pas autre chose. Que manque-t-il à HAL ? La faculté de bouger pour se débrouiller avec l'inattendu du monde. La simulation n'est ainsi pas un bon test du naturel, car c'est un monde construit sans inattendu.

L'inattendu est que la vie est associée à un monde physique et chimique où la variabilité est littéralement infinie. Il n'est pas épuisable, et certaines lois se dégagent, mais il y a une richesse qui empêche la simulation et qui milite en faveur de la construction.

Pourquoi ce que je vois dans mon ordinateur n'est pas du vivant ? Parce que son objet est la simulation, l'absence d'existence séparée de celui qui simule. Cette figure dans les années 1980-1990, on pensait que l'on pouvait, en simulant, explorer toutes les possibilités. Impasse. Le monde est trop riche pour que le vivant possède une représentation préalable complète ou même utile.

## LA REPRODUCTION EST UNE CONSÉQUENCE

Je n'ai pas inclus la reproduction dans ma définition de la vie, car je crois que ce serait une erreur épistémologique. Les traces paléontologiques de l'histoire de la vie remontent à 3,8 milliards d'années, âge des premières fossiles que l'on a trouvées dans certains sédiments. Là les premières traces repérables de vie sont des archéobactéries qui ressemblent beaucoup à certaines bactéries actuelles. Or la reproduction d'une archéobactérie n'est pas celle des mammifères. Chez les protozoaires, la reproduction c'est tout simplement une fission. Vous soumettez un système autonome autopoïétique à une turbulence avec des lames de faible relativement puissantes, ce qui est le cas dans tous les systèmes aquatiques terrestres, et vous avez très facilement des fissions.

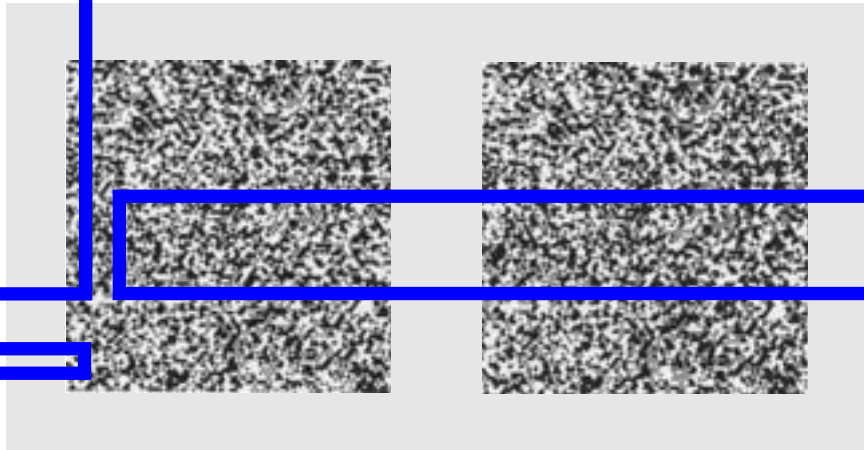
Le fait inattendu est que la reproduction est une conséquence banale de l'existence individuelle. Le difficile est de créer un individu qui s'autoproduit avec sa frontière. Le coupez en deux c'est facile.

Bien entendu, dès qu'existe un minimum de capacité de fission et de division, la logique évolutive introduit des variations introduisant une certaine diversité et des pressions de sélection favorisant quelques millions d'années, les cellules ont acquis certaines molécules qui facilitent la fission ou qui favorisent des fissions avec d'autres organismes. La reproduction est nécessaire à l'évolution, pas à l'origine de la vie.

## LA CONSTITUTION DE L'IDENTITÉ

Faut-il parler de la vie comme si c'était une seule chose ? La vie minimale cellulaire, c'est-à-dire la détection d'un seuil de passage du vivant au non-vivant, est un aspect essentiel de la vie, ce n'est pas le seul. Il y a d'autres niveaux de vie organique plus graduels où se manifestent à divers stades les capacités d'adaptation, d'évolution, voire d'acquisition des connaissances.

Dans les organismes multicellulaires, les unités cellulaires sont imbriquées à des niveaux de complexité presque invraisemblables. L'ensemble des cellules d'un organisme n'est pas une collection arbitraire, mais organisé par des communications moléculaires – hormones et surtout médiateurs immunitaires. Une identité macromoléculaire se constitue pour donner un corps. Une frontière sépare le soi du non-soi, elle entraîne par exemple le rejet des greffons et les réactions de fièvre lors d'une infection. Cette identité somatique diffère de l'identité cognitive qui est orchestrée par le système nerveux fondé sur l'organisation de base de perception-action, c'est-à-dire la boucle organes sensoriels et muscle à travers le cerveau, mais aussi la mémoire, l'apprentissage.



L'émergence d'une image cérébrale à partir de stéréogrammes illustre l'apparition d'une image globale à partir des informations stockées dans le cerveau. Ici vous voyez apparaître, après quelques secondes, un triangle flottant sur le fond (l'image est placée à environ dix centimètres des yeux).

Si vous avez le malheur d'avoir un accident cérébral, l'identité cognitive peut être atteinte sans que votre identité somatique le soit. Ça n'est pas le cas pour tous les individus qui ont une activité interne intense, mentale et spirituelle, dans un corps réduit à rien. Ce sont deux modes d'identité distincts qui constituent un organisme. Les deux entités sont si bien séparées que je préfère le découpage en organismes plutôt qu'en organes, intermédiaires du vivant trop considérés dans le passé.

Dans le cas contraire, les systèmes somatiques ; pour les plantes, il y a le système somatique et d'autres modes identitaires, mais qui ne sont pas cognitifs, parce que les plantes ne bougent pas. Le cerveau est essentiellement lié à la mobilité, dès que vous bougez, vous développez un cerveau.

### LE JOUEUR D'ÉCHECS N'EST RIEN

La surprise a été de trouver que le secret de la capacité cognitive et adaptative n'est pas dans les logiques, n'est pas dans l'abstrait, n'est pas dans la simple manipulation : c'est la capacité de se débrouiller dans le monde, de chercher, de s'orienter, d'éviter. La connaissance n'est pas un ensemble de processus mentaux abstraits, dont les joueurs d'échecs seraient le plus pur accomplissement.

Le joueur d'échecs me paraît, au contraire, élémentaire. Les règles sont fixes dans un monde qui ne bouge pas, et à l'intérieur des règles, il suffit de calculer. Or la vie n'est pas ainsi réglementée. On s'en est rendu compte dans les années 1960 : à l'Institut de technologie du Massachusetts un grand programme devait être inséré dans une machine censée résoudre tout problème qu'on pouvait se poser. L'inattendu est que les questions à résoudre ne sont pas énumérables par une liste finie. On ne peut écrire des modules de raisonnement et d'action pour les différentes fonctions du corps.

En 1969, un chercheur du même institut, Rodney Brooks, a écrit un article qui s'appelait *L'intelligence sans représentation*. Il prônait de construire une bestiole qui n'avait aucun savoir sur ce qu'est le monde, mais qui savait se débrouiller au coup par coup. Ce petit insecte pouvait pourtant nous connaître des règles de la physique ni des règles d'inférence, il était dépourvu de système schématique ou symbolique, et pourtant il pouvait être efficace parce que construit sur la base des boucles perception-action. Initialement il n'avait même pas de faculté d'apprentissage. On songe, bien évidemment au petit robot-insecte envoyé sur la surface de Mars.

La bataille actuelle oppose les cognitivistes qui travaillent toujours sur un paradigme de représentation de traitement de l'information et les situationnistes qui pensent que la connaissance est une adaptation concrète, au coup par coup et par situation. Pour eux, le héros n'est pas le joueur d'échecs, mais l'insecte ou le bébé.

Le mathématicien Turing avait concocté une définition de l'intelligence pour un mathématicien : la machine statiquement intelligente lorsqu'on ne pouvait distinguer ses réponses verbales de celles d'être humain. Selon ce critère l'ordinateur *Deep Blue* est intelligent. Cette définition est peu satisfaisante pour le biologiste : l'intelligence n'est pas un ensemble de règles, mais la débrouillardise dans un environnement changeant.

Les objets vivants ont un système perceptif qui commande un système de mouvement, lequel affecte la perception ; l'animal a potentiellement la capacité sensori-motrice de se débrouiller, et les solutions de débrouillardise sont étonnamment variées. Regardez le monde animal où 1 000 solutions différentes remplissent la même fonction. Le langage, l'imaginaire, sont des prolongements ultérieurs, des solutions de débrouillardise.

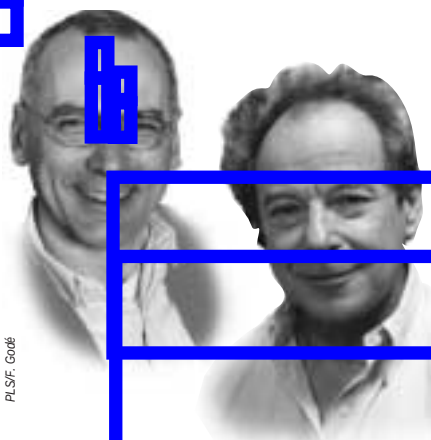
La grande invention de la vie animale est la boucle capteur-neurone-muscle. À partir de là, il y a une complexité croissante de l'auto-organisation cérébrale. Des interactions suffisamment complexes, c'est-à-dire non linéaires, font émerger un état global du cerveau qui sont à la base des performances «supérieures» : l'imagination, la communication. La recherche tente de définir les règles d'émergence de la représentation globale. Comment les activités locales de tous les neurones s'organisent en un tout compréhensible ? C'est la première fois dans l'histoire de la neurologie que les biologistes traient des pistes pour comprendre comment cet énorme système peut fonctionner de façon harmonieuse et en même temps avoir la capacité de fluidité pour avec souplesse et beauté.

**François VARÉLA est directeur de recherche au CNRS, au Laboratoire des Neurosciences Cognitives (LENA) à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière.**

**F. Varéla, *Invitation aux Sciences Cognitives*, Seuil, Points Sciences, 1996.**

**F. Varéla, *L'arbre de la connaissance*, Addison-Wesley France, Paris, 1994.**

**Ce texte est une transcription par la revue du débat enregistré, avec Émile Noël, au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture, le 8 octobre 1997, à 9h05.**

Emmanuel Robert  
PLSF, Gode

# Jeune biologiste, quel avenir?

ALAIN PROCHIANZ • HENRI KORN

*La législation doit d'urgence reconnaître l'existence des postdoctorants*

**D**es indicateurs, tels l'impact international des publications ou le nombre des chercheurs membres des comités de lecture de revues de haut niveau, indiquent que, malgré des succès, la biologie française a du mal à se maintenir dans le groupe de tête des pays industrialisés.

Si les causes de cette situation sont multiples, les difficultés budgétaires ne sont pas prépondérantes. De surcroît, la mise en avant systématique de la pénurie comme seule responsable de nos faiblesses occulte le débat sur les nécessaires réformes de nos structures de production des connaissances.

Dans un champ d'activité qui devrait être marqué par l'innovation et la liberté, un carcan administratif enserrant progressivement tous les aspects de la vie scientifique. Dénonçons, par exemple, le modèle unique d'administration et d'organisation des laboratoires, quelle que soit leur taille ; la rigidité des critères de recrutement et de gestion des carrières ; la confusion, lors des évaluations, entre la qualité scientifique, la défense syndicale des personnels et des considérations d'aménagement du territoire ; l'opacité et l'incohérence des critères, des sources et des modes de financement.

Chacun de ces points pourrait être débattu, mais une des questions les plus préoccupantes aujourd'hui est le devenir des quelque 2 000 jeunes docteurs qui désirent faire carrière dans la recherche. Leur situation pour la période qui s'étend entre la soutenance de leur thèse et leur éventuel engagement comme chercheur ou enseignant-chercheur. Soulignons que nous considérons qu'un tel engagement doit correspondre à une sélection non seulement d'un individu, mais également d'un projet scientifique dont cet individu porte la responsabilité.

La période de transition «postdoctorale» est nécessaire pour les sciences biologiques, et son rôle est souvent mal compris par ceux qui imaginent que toutes

les disciplines fonctionnent comme les mathématiques et la physique, où l'émancipation des talents est précoce. La formation des biologistes est plus longue, parce que le sujet biologique, complexe, impose une maîtrise d'un grand nombre de pratiques expérimentales. Il est donc impossible de préjuger, après seulement trois années de thèse, de la capacité d'un postulant à remplir les tâches de responsable de projet que l'on est en droit d'attendre des chercheurs statutaires.

**U**n tel statut ne peut être octroyé sans que le candidat ait prouvé sa capacité à produire des résultats notables dans plusieurs laboratoires, ce qui implique une mobilité après la thèse. Aujourd'hui, le chercheur qui a soutenu sa thèse soit est entretenu par des expédients dans son laboratoire d'origine jusqu'à l'obtention d'un poste stable, soit part à l'étranger. Cette expérience internationale enrichit la formation des chercheurs, et il faut l'encourager très fortement, mais elle doit s'accompagner de certaines possibilités de retour. Est-il admissible que de jeunes chercheurs ne puissent revenir travailler en France, où ils ont été formés ? Ne doit-on pas leur donner la possibilité d'effectuer au moins un postdoctorat dans un laboratoire français avant de concourir, entre 30 et 35 ans, pour un poste stable dans les organismes de recherche, les universités ou l'industrie ?

On envisage de changer une législation qui ne permet pas à un jeune chercheur non fonctionnaire de travailler en France dans des conditions décentes. Cette législation crée une paralysie scientifique sans équivalent chez nos contemporains étrangers, qu'elle ne cesse d'étonner, puisqu'elle prive notre appareil de recherche d'une force de travail déterminante. Sans des réformes urgentes, on ne mettra pas un terme à la fuite de plus en plus inquiétante des bons jeunes biologistes, tentés de rester à l'étranger sur des postes donnant d'emblée l'indépendance scientifique.

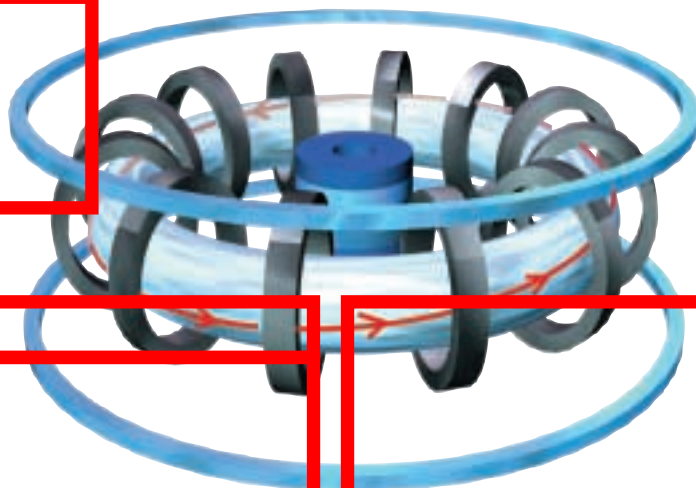
Un système de stages postdoctoraux nécessite un financement d'origine publique — par exemple sous la forme de contrats à durée déterminée — ou privé, provenant des organisations caritatives et associations. Dans ce dernier cas, on veillera à ce que le chercheur bénéficie d'un contrat de travail décent afin de mettre un terme à une situation fréquente : des jeunes riches d'une dizaine d'années de formation après le baccalauréat et de six à dix années d'expérience de recherche travaillant pour 8 000 francs par mois, sans couverture sociale. Parallèlement, on pourra envisager que les subventions octroyées à un laboratoire par les industriels et organismes privés s'accompagnent systématiquement de tels contrats, qui prévoiraient l'embauche, pour au moins deux ans, d'un postdoctorant travaillant sur le projet financé.

**C**ette réforme profiterait non seulement aux jeunes chercheurs, mais aussi aux laboratoires, dont les postdoctorants constituent, dans le monde entier, un élément essentiel du dynamisme. Elle contribuerait à modifier notre conception du groupe de recherche, qui ne serait plus défini arbitrairement par un nombre minimal de chercheurs statutaires. Elle restituerait au directeur sa vraie fonction de responsable scientifique d'une petite équipe, mettant fin à une dérive marquée vers des fonctions de gestion bureaucratique d'ensembles de plus en plus gros. Enfin, elle ferait correspondre le statut de chercheur statuaire à celui de responsable de projet, permettant l'indépendance intellectuelle beaucoup plus tôt dans la carrière scientifique, le plus souvent à l'âge de 30 ans.

**Alain PROCHIANZ est directeur d'Unité CNRS à l'École Normale Supérieure. Henri KORN est directeur d'Unité INSERM à l'Institut Pasteur.**

# ITER... ations

FRANCIS TROYON



*Les attaques récurrentes contre ITER, la prochaine génération de tokamak qui constitue un pas essentiel vers la fusion contrôlée, mélangent arguments politiques et scientifiques.*

La recherche sur la fusion contrôlée est périodiquement attaquée : l'espoir de produire de l'énergie économiquement par ce moyen serait chimérique, pensent certains. Elle méprise d'ailleurs une partie de la communauté scientifique se transforme en hostilité dès que des financements sont en jeu. Les spécialistes de la fusion magnétique, sur la sellette, craignent que le premier réacteur expérimental, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) de type tokamak ne soit pas construit.

Il convient de dépassionner le débat en rappelant ce qu'est ITER, et ce qu'il n'est pas, et de mieux séparer les arguments qui relèvent de considérations scientifiques et techniques, de ceux qui sont du ressort de la politique...

Le Programme Fusion Européen a pour objectif ultime le développement d'un réacteur à fusion. Au cours de ses 35 années d'existence, le programme a construit et exploité un ensemble d'installations de tailles croissantes avec leurs systèmes de mesure, développé des systèmes capables de chauffer un plasma aux températures requises de 100 millions de degrés et plus, mis au point un ensemble de technologies, supraconduction à haut champ et haut courant, matériaux résistants aux bombardements énergétiques, robots, etc. Le plus grand tokamak du monde, JET, fonctionne depuis 1983 et il opère aujourd'hui avec des plasmas de deutérium et tritium. Il a non seulement fourni des données fondamentales permettant d'extrapoler le comportement du plasma aux tailles et conditions physiques de ITER, mais aussi permis de tester des éléments techniques essentiels pour ITER.

L'intégration de tous ces développements dans une nouvelle installation est prévue depuis les années 1980. Une équipe de physiciens et d'ingénieurs a

étudié les paramètres d'une telle installation, qui est devenue ITER.

L'objectif de ITER est d'associer un cœur de réacteur en fusion, formé d'un plasma où se produisent les réactions de fusion en régime quasi stationnaire, et les technologies, matériaux, bobines supraconductrices, appareils de chauffage et de mesure déjà disponibles ou proches de l'être. Il a pour but de démontrer le domaine de fonctionnement accessible, de valider les technologies développées spécifiquement à cet usage et d'identifier les paramètres de fonctionnement d'un réacteur produisant de l'énergie. Trois milliards de francs ont déjà été investis dans la recherche et le développement par les partenaires d'ITER dans cette phase de préparation.

ITER n'est pas un réacteur de démonstration, il n'a pas de couverture régénératrice et n'utilise pas les matériaux structuraux à faible radioactivité en développement pour le réacteur.

Les premières attaques contre ITER sont d'ordre financier (projet trop coûteux?). Les secondes portent sur la validité scientifique et technique de l'entreprise (projet trop risqué?).

L'argument du coût est politique et peut être discuté. Les politiciens sont amenés à faire des choix douloureux fondés sur leurs propres priorités. Mais dans le cas d'un refus de construction de ITER à cause de son coût, les politiques doivent donner une argumentation claire, assumer leur décision et ne pas demander, comme actuellement aux États Unis, à des opposants scientifiques de fournir une argumentation adéquate, de type alibi. Le programme pourra alors ajuster sa stratégie, qui sera différente si la raison du refus est conjoncturelle, donc temporaire, ou définitive. Auquel cas, les politiques devront clairement annoncer

que cette manière de production d'énergie est abandonnée avec toutes les conséquences sur l'avenir énergétique du monde, qui peut prédire quelle sera la situation de la production d'énergie dans 50 ans? Une décision concernant ITER doit être prise avant juillet 1998.

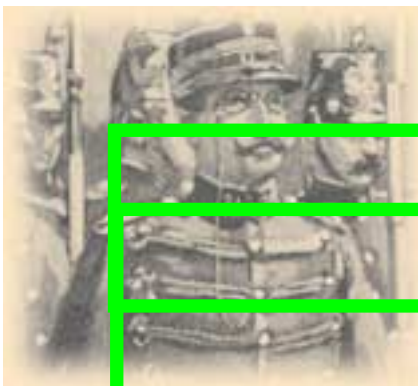
Certaines attaques contre ITER sont le fait de spécialistes de la fusion nucléaire qui luttent pour la survie de leur laboratoire. C'est regrettable, mais compréhensible. D'autres scientifiques de renom pensent que plus de recherches en physique des plasmas, dans de petites installations, sans les contraintes opérationnelles imposées par l'environnement d'un réacteur, se traduira par un coût moindre pour ITER.

Cet argument me semble erroné. Les paramètres de ITER résultent d'un compromis entre une multitude de contraintes physiques et techniques. Mais, chacun dans son coin optimiser sa physique ou sa technique, c'est aller finalement beaucoup plus loin les interfaces si importants entre tous ces aspects continueront à être ignorés. Il faut tester ce qui peut l'être aujourd'hui et se préparer comme toujours à des surprises, bonnes et mauvaises : ce n'est toujours ainsi, il n'en sera pas autrement pour ITER...

Enfin, puisque politique il y a, ne faut-il pas évaluer les enjeux? L'humanité a-t-elle le droit d'abandonner une filière énergétique aussi difficile que celle du tokamak pour sept milliards d'euros répartis sur une durée de construction de sept ans. L'ensemble du monde industrialisé ne peut-il supporter cet investissement?

**Francis TROYON est directeur de l'Institut de Physique des plasmas de l'École polytechnique fédérale de Lausanne et président du Conseil de JET.**





# Les chimistes et l'affaire Dreyfus

G. BRAM • M.-P. HAMACHE • N. FIGEARD

*Auguste Scheurer-Kestner, chimiste et sénateur, déclenche la révision du procès Dreyfus.*

L'«Affaire Dreyfus», scandale politico-militaire, a divisé la France. À la fin de l'année 1894 et au début de l'année 1898, divers rebondissements aboutissent à la révision du procès d'Alfred Dreyfus, puis à sa réhabilitation. Le chimiste Auguste Scheurer-Kestner est l'un de ceux qui se battent pour obtenir la révision du procès. Quel est son rôle dans cette bataille où d'autres chimistes se montrent également motivés et efficaces ?

Le 9 décembre 1894, le capitaine Alfred Dreyfus, officier d'état-major, juif, alsacien, est condamné par le conseil de guerre à la détention perpétuelle pour trahison. Dans le dossier de l'accusation, une seule pièce à conviction, non datée, non signée, le «bordereau», annonce l'envoi à l'attaché militaire allemand de documents relevant de la défense nationale. C'est sur la base de ce bordereau et d'un «dossier secret» communiqué uniquement aux membres du conseil de guerre pendant leurs délibérations que, malgré ses dénégations, Dreyfus est condamné.

Quatre ans plus tard, la demande en révision est admise. Jugé par un second conseil de guerre à Rennes, le 3 septembre 1899, Dreyfus est à nouveau déclaré coupable, mais bénéficie de circonstances atténuantes. Condamné à dix ans de détention, il est gracié par le président de la République Émile Loubet dix jours après sa condamnation. Il est réhabilité par la Cour de Cassation le 1<sup>er</sup> juillet 1906.

Par des batailles rhétoriques véhémentes, par l'intermédiaire de journaux qui les soutiennent, par les attaques diffamatoires que lancent d'autres quotidiens, les pro- et les anti-dreyfusards se déchaînent. Scheurer-Kestner prend une part active au débat.

Né en 1833 à Mulhouse, où son père possède une usine d'impression sur étoffes, Scheurer-

Kestner s'intéresse à la chimie, à Paris, dès 1852, et travaille dans le laboratoire d'un autre alsacien, Charles-Adolphe Wurtz, l'«abbé» de l'école atomiste en France (deux écoles s'affrontaient alors : ceux qui derrière le chimiste Marcellin Berthelot, sont hostiles à la notion d'atomes, et les partisans de la théorie atomique).

À la mort de son beau-père, en 1870, Scheurer-Kestner prend la direction technique des usines de fabrication de produits chimiques situées à Thann, que dirigeait le grand-père. Il renforce l'activité de ces établissements qui, en 1884, deviennent les Fabriques de produits chimiques de Thann et de Mulhouse, qui existent encore aujourd'hui. Il y développe la chimie appliquée, sans négliger les aspects fondamentaux des problèmes techniques qu'il rencontre.

Il s'intéresse au pouvoir calorifique des combustibles solides, liquides et gazeux,

étude théorique qui servira à l'optimisation de divers procédés industriels ; il tente d'optimiser la fabrication industrielle de l'acide sulfurique. Depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle, la «soude artificielle» est l'un des produits de base de l'industrie chimique ; on l'obtient en faisant réagir du soufre, de l'acide sulfurique et de la craie. Scheurer-Kestner établit le mécanisme de la réaction et l'optimise son rendement. Il s'intéresse également à l'industrie de l'aniline et des matières colorantes qui en sont dérivées. En 1894, il devient président de la Société chimique de France, sur les instances de Charles Friedel, un autre chimiste d'origine alsacienne.

Scheurer-Kestner a très tôt une activité politique. Né dans un milieu farouchement républicain, il prend part d'emblée à l'opposition au second Empire, aux côtés de Clemenceau et de Gambetta. En 1862, il est condamné à quatre

mois de prison et à 2 000 francs d'amende pour «excitation à la haine et au mépris du gouvernement». Après l'annexion de l'Alsace et de la Lorraine par l'Allemagne, il «opte» pour la France. En 1871, il est élu député de Paris. En 1875, il est nommé sénateur inamovible représentant de l'Alsace.

En janvier 1895, juste après la condamnation de Dreyfus, il est élu premier vice-président du Sénat. «Républicain modéré, mais pas modérément républicain», il jouit d'une réputation de droiture et de désintéressement ; il refuse la Légion d'honneur, incompatible, selon lui, avec les valeurs républicaines, et les postes ministériels qui lui sont proposés. Introduit dans le monde industriel et politique, Scheurer-Kestner est une figure emblématique de l'Alsace exilée à Paris, après la guerre de 1870.

Pour toutes ces raisons, Mathieu Dreyfus, industriel alsacien et frère du capitaine, lui rend



1. Les caricaturistes se déchaînent contre Scheurer-Kestner, lorsqu'il tente d'obtenir la révision du procès Dreyfus. Le 18 décembre 1897, *Le Rire* publie un dessin intitulé «Scheurer-Kestner, ou un crâne sous une tempête».

Georges Bram

visite le 7 février 1895. Il sollicite son appui pour prouver l'innocence du condamné. Scheurer-Kestner raconte dans ses *Mémoires d'un sénateur dreyfusard*, publiées en 1898, qu'il accueille Mathieu Dreyfus assez froidement et refuse de s'engager sans avoir recueilli des renseignements supplémentaires. Convaincu de la culpabilité de Dreyfus «condamné à l'unanimité par des officiers français», Scheurer-Kestner est pourtant troublé par certains aspects sombres de l'accusation. Pendant plus d'un an, il poursuit ses investigations, mais ne parvient pas à une conclusion définitive. Le 13 juillet 1897, il apprend de source autorisée, mais sous le sceau du secret, le nom du véritable coupable : le commandant Esterhazy. Dès le lendemain, il affirme à ses collègues du Sénat qu'il est convaincu de l'innocence de Dreyfus.

Persuadé de l'honnêteté politique de ses amis au pouvoir, il est persuadé que le gouvernement réparera rapidement cette erreur judiciaire dramatique. Très vite, il déçoit. Il découvre une réalité politique qu'il ne soupçonnait pas : un gouvernement résolu à défendre à tout prix le «respect de la chose jugée» et «l'honneur de l'armée». Parmi ses amis de longue date, le président de la République Félix Faure le reçoit le 29 octobre 1897, mais préfère «ne rien savoir et ne rien entendre». Le lendemain, il rend au général Billot, ministre de la Guerre, une visite dont le seul résultat sera d'empêcher la campagne d'opinion déchaînée contre lui.

Dans la presse ou dans les lettres qu'il reçoit, on le traite de «vieux singe, vieille crapule, sale huguenot, sale juif, fripouille». Un correspondant écrit qu'il lui envoie «ses crachats microbiens». On l'accuse d'être à la solde des Allemands.

## LA BATAILLE POUR LA RÉVISION

Au début de novembre 1897, indépendamment de Scheurer-Kestner, Mathieu Dreyfus identifie Esterhazy comme l'auteur du «bordereau» attribué à son frère. Ses conclusions sont alors confirmées par Scheurer-Kestner, qui connaît la vérité depuis six mois. Il décide de publier la vérité. Le 15 novembre 1897, *Le Temps* publie une lettre où Scheurer-Kestner affirme l'innocence de Dreyfus, indique qu'il connaît le vrai coupable et qu'il a soumis en vain au gouvernement des preuves démontrant l'innocence de l'ex-capitaine.

Le 7 décembre au Sénat, il interpelle le gouvernement et obtient une nouvelle expertise du bordereau. Celle-ci se tient dans le cadre de la comparaison d'Esterhazy devant le conseil de guerre de Paris ; elle a lieu les 10 et 11 jan-

vier 1898 à la suite de la plainte officielle déposée par Mathieu Dreyfus. La nouvelle expertise innocente à nouveau Esterhazy.

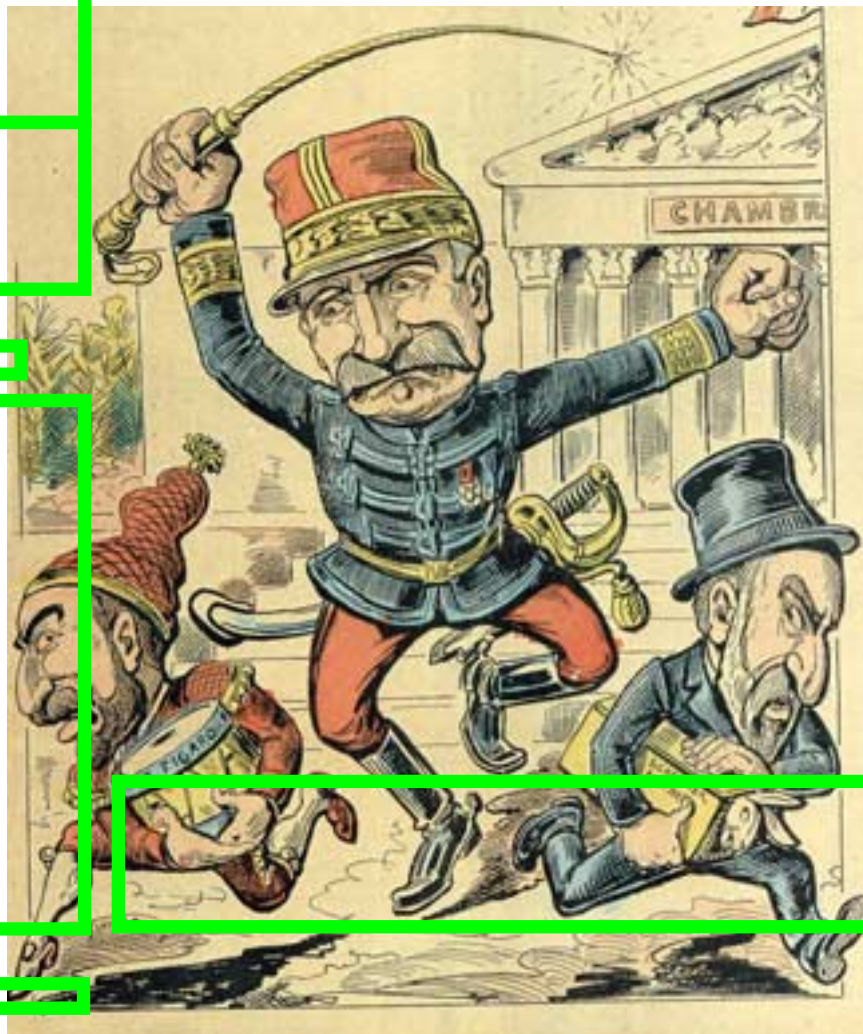
Le 13 janvier 1898 lors du renouvellement du bureau du Sénat, Scheurer-Kestner n'est pas réélu à la vice-présidence. Le même jour *L'aurore* publie la lettre «J'accuse» d'Émile Zola au président de la République. Il prend violemment à parti les ministres et anciens ministres de la Guerre et les cadres supérieurs de l'état-major, tous nommément désignés.

Ainsi, parmi les dreyfusards, il y a deux tendances : ceux qui pensent convaincre les hommes d'État de l'innocence de Dreyfus afin qu'ils demandent la révision du procès et sauvent l'honneur de la République, et ceux qui, convaincus de la complicité du gouvernement, pensent que cette révision doit être obtenue par la pression populaire. D'un côté, Scheurer-Kest-

ner, farouche républicain, pétri de légalisme, de l'autre Zola.

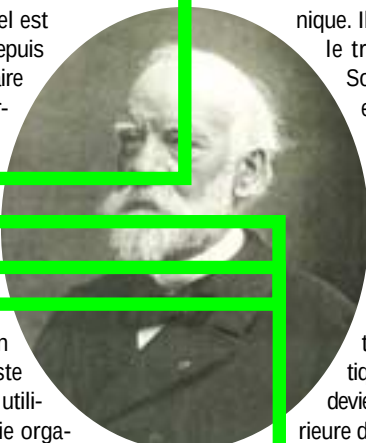
Fatigué, désabusé par l'attitude de la plupart de ceux qu'il considérait comme ses amis politiques, atteint d'un cancer de la gorge, Scheurer-Kestner se retire de la lutte active en 1898 après avoir soutenu Zola lors du procès qui lui est intenté à la suite de la parution de «J'accuse». Scheurer-Kestner meurt le 19 septembre 1899, le jour même où Émile Loubet, président de la République, signe la grâce de Dreyfus.

En janvier 1900, à la suite de l'acquiescement d'Esterhazy, paraissent des pétitions d'écrivains, de scientifiques, d'artistes, d'«intellectuels» demandant soit la révision du procès de Dreyfus, soit le maintien des garanties légales des citoyens contre tout arbitraire. Parmi les jeunes signataires Paul Langevin, Jean Perrin, Émile Borel ou Jacques Hadamard. L'originalité de cette mobilisation intellectuelle



2. Scheurer-Kestner, qui a acquis la conviction de l'innocence de Dreyfus, mais ne peut révéler ses sources, est représenté dans divers journaux, ici *Le Pili*, comme un médiocre prestidigitateur faisant sortir un lapin d'une boîte. Le général Billot, ministre de la Guerre, pourchasse le sénateur et *Le Figaro*, qui vient de publier un article compromettant pour Esterhazy. Scheurer-Kestner ne sera pas réélu à la vice-présidence du Sénat à cause de sa position dreyfusarde.

En 1898, Charles Friedel est membre de l'Institut. Depuis 1884, il est titulaire de la chaire de chimie organique à la Sorbonne. Il y a succédé à son maître Adolphe Wurtz. Créateur de la chimie organique du système, il est surtout, avec son collègue américain Crafts, le découvreur de la réaction qui porte leur nom, la réaction de Friedel-Crafts, qui reste encore une méthode très utilisée de synthèse en chimie organique.



Il a été à plusieurs reprises le très actif président de la Société chimique de France et celui du premier congrès international de chimie réuni à Genève en 1890. Il s'attacha à créer et à développer un enseignement supérieur technique de la chimie en France. Il fonda à Paris le Laboratoire d'enseignement pratique de chimie appliquée, qui deviendra l'École nationale supérieure de chimie de Paris.

En 1898, Charles Lauth est directeur de l'École de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris, dont il a été le principal promoteur en 1882. Il a aussi travaillé dans le laboratoire de Wurtz. Il a fait sa carrière industrielle dans le domaine des colorants (Bayer), puis dans les Sèvres, dont il a été le directeur de 1879 à 1888. Charles Lauth qui, comme Friedel et Grimaux, a présidé la Société chimique de France, a préconisé dès 1878 la création, à Paris, d'une École nationale de chimie pour former les cadres supérieurs dont l'industrie chimique française manquait.



Édouard Grimaux est aussi un ancien élève de Wurtz. En 1898, il est professeur de chimie, spécialiste des alcaloïdes ; il enseigne à l'École polytechnique et à l'Institut agronomique, et il est membre de l'Institut. Président de la Société chimique de France, il fut l'auteur d'ouvrages qui ont fait date dans l'histoire de la chimie, notamment sur Lavoisier.

entraîne de vives réactions dans les milieux nationalistes, mais très peu de scientifiques rejoindront la «Ligue de la patrie française» anti-dreyfusarde, créée à la fin de l'année 1898 pour répondre à la «Ligue des droits de l'homme» : les seuls noms notables sont ceux des mathématiciens Camille Jordan et Georges Humbert et du physicien Pierre Duhem.

Selon Otto Walschbinder, Scheurer-Kestner a convaincu trois autres chimistes, Charles Friedel, Édouard Grimaux et Charles Lauth de signer la pétition. Ce ne sont pas les seuls chimistes à s'être ainsi engagés, mais Friedel, Lauth et Grimaux appartiennent tous trois à un réseau de relations constitué bien avant l'Affaire et dont fait également partie Scheurer-Kestner.

Ils sont élèves du chimiste alsacien Charles Adolphe Wurtz ; par l'intermédiaire du bulletin de la Société chimique de Paris, ils diffusent leur vision scientifique, alors dominante de l'enseignement ; ils créent l'École alsacienne, pour que leurs enfants bénéficient du type d'éducation dispensée au gymnase protestant de Strasbourg ; grâce à des subventions que Scheurer-Kestner avait récoltées auprès des industriels alsaciens à la demande de Wurtz, ils fondent l'Association française pour l'avancement des sciences (AFAS).

## UNE COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE DIVISÉE

Charles Friedel est très lié à Scheurer-Kestner ; celui-ci le visita lors de son incarcération en 1862, et la correspondance qu'ils entretiennent ne cesse d'avoir leur mort, la même année, en 1899. Non seulement il signe la pétition du 15 janvier 1898, mais il est aussi membre du comité directeur de la Ligue des droits de l'homme, fondée en avril 1898, pour animer l'action dreyfusarde.

Charles Lauth signe la pétition en faveur de la révision du procès de Dreyfus, et manifeste publiquement ses sentiments dreyfusards à l'occasion des obsèques de Scheurer-Kestner et de celles d'Édouard Grimaux.

Dès novembre 1897, le troisième chimiste, Grimaux, envoie des lettres de soutien à Scheurer-Kestner. Il n'est pas alors certain de l'innocence de Dreyfus, mais il n'accepte pas que la recherche de la vérité coûte à son ami les insultes proférées par la presse. Après le procès d'Esterhazy, sa conviction est faite, et il signe la pétition du 15 janvier 1898 ; il devient le vice-président de la Ligue des droits de l'homme. Il témoigne au procès de Zola : il est mis

à la retraite d'office et on lui retire le laboratoire qu'il dirigeait à l'École polytechnique. Ensuite, il est la cible de violentes manifestations anti-dreyfusardes réclamant son départ de la présidence du congrès annuel de l'Association française pour l'avancement des sciences.

Dans sa déposition au procès Zola, Grimaux explique que c'est grâce à son esprit d'analyse scientifique qu'il s'est convaincu de l'innocence de Dreyfus. L'esprit d'analyse scientifique ne semble pas avoir alors été partagée par tous les chimistes. Marcelin Berthelot, avant «officiel» et homme politique (il est ministre des Affaires étrangères en 1893 et en 1896) saura résister à toutes les démarches faites pour l'intéresser au sort de Dreyfus. Il manifeste une fois encore «un caractère qui élève l'abstention à la hauteur d'une règle de bonne conduite», comme l'a écrit son biographe, le chimiste Jean Jacques.

**Georges BRAW est professeur de chimie à l'Université Paris-Sud. Magy-Paul HAMACHE prépare une thèse sur l'histoire des Juifs de France à l'Université Paris IV-Sorbonne. Nathalie PIGEARD est chargée d'études en histoire des sciences à la Bibliothèque nationale de France.**

# JEU-CONCOURS N° 40

PIERRE TOUGHER

## DE L'ART DE DEMANDER SON CHEMIN

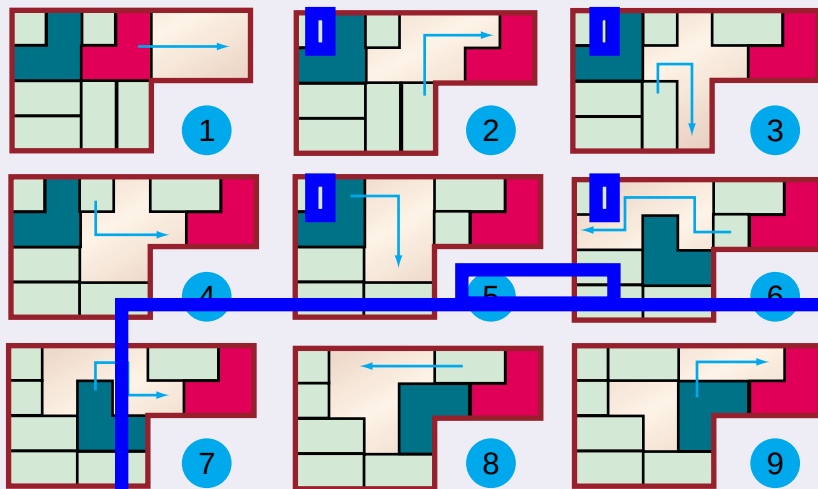
Un classique du casse-tête logique est le suivant ; un voyageur arrive à l'embranchement de deux routes menant soit à Rome, soit à Paris, mais dont les poteaux indicateurs ont été effacés. À l'intersection se trouvent deux autochtones se connaissant parfaitement dont l'un dit toujours la vérité et l'autre est un menteur invétéré. Comment le voyageur peut-il connaître la route de Paris en ne posant qu'une seule question ? Il suffit de poser à n'importe lequel des deux autochtones la question suivante : « Si je demande à votre collègue la route de Paris, quelle sera sa réponse ? » La route de Paris sera toujours le contraire de celle indiquée par son

le jeu-concours de ce mois-ci, compliquons légèrement le casse-tête en ajoutant un troisième autochtone fantasque qui selon son humeur ment ou dit la vérité. Quel est le nombre minimum de questions que devra poser le voyageur aux autochtones et quelles sont ces questions pour connaître avec certitude la route de Paris.

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férrou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'octobre 1997, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

## RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°38

Un nombre important de lecteurs ont su répondre au «Petit puzzle pour les vacances». Qu'ils soient remerciés de leurs bons neuf mouvements et qu'ils veuillent nous pardonner d'avoir interverti les couleurs des structures rouge et bleue.



## ERRATUM

De nombreux lecteurs m'ont fait remarquer, à juste titre, que la solution «à la physique» du jeu-concours n° 38 était fautive. En effet, si l'on suspend un triangle (ou toute autre figure plane) par un fil en un point, la direction du fil passera bien par le centre de gravité du triangle, mais les deux surfaces ainsi délimitées ne seront pas égales, car l'équilibre est obtenu quand les moments des deux poids de chaque partie du triangle par rapport au point d'attache sont égaux. On a l'égalité des masses (aires) que si les distances des centres de gravité de chaque partie à la direction du fil sont égales, ce qui, en général, n'est pas le cas.



# De Saint-Petersbourg à Miami

CHRISTIAN WALTER

*Comment assurer des catastrophes infiniment coûteuses et infiniment rares ?*

Le jeu de Saint-Petersbourg est un jeu de pile ou face particulier : le lanceur, jette une pièce jusqu'à ce que « face » sorte. Quand face apparaît pour la première fois au cinquième lancé, la somme versée par le payeur au lanceur est  $2^5$ , soit 32 francs. Si face n'arrive qu'au dixième lancé, le gain du lanceur est  $2^{10}$ , soit 1 024 francs.

Quel doit d'entrée le lanceur doit-il verser avant chaque partie pour que le jeu soit équitable ? Le lanceur a une chance extrêmement faible ( $2^{-1}$ ) de gagner une somme extrêmement forte ( $2^n$ ). Cette somme est d'autant plus grande – et plus rare – que face apparaît tard. Le gain probable du jeu n'en est pas moins... infini. Si le payeur est un casino, il devrait alors demander un droit d'entrée infini au joueur lanceur... qui ne gagnera le plus souvent que très peu ! C'est le « Paradoxe de Saint-Petersbourg », inventé en 1713 par Nicolas Bernoulli.

Le jeu de Saint-Petersbourg est transposable aux assurances : combien l'assuré doit-il payer pour se prémunir d'accidents très rares, mais très coûteux ? Ces grands sinistres sont des catastrophes naturelles ou des accidents industriels majeurs : tremblements de terre, cyclones, naufrages de pétroliers géants, explosions des centrales nucléaires. Les différents coûts de ces sinistres pour les compagnies d'assurance correspondent à une suite de gains du jeu de Saint-Petersbourg, où les assurés sont les lanceurs.

Comment calculer la prime ? L'assuré ne joue qu'une seule partie, mais il y a différents assurés, chacun jouant ses parties à tour de rôle, en reprenant l'analogie du jeu, établir une perte moyenne pour différentes parties. Dans les jeux où l'espérance mathématique est finie, plus il y a d'assurés et plus il y a de parties, plus la moyenne des sommes à verser dues à l'occurrence d'accidents est proche de l'espérance mathé-

matique finie. C'est la prime. Dans les cas de type Saint-Petersbourg, où l'espérance mathématique est infinie, plus le nombre des assurés augmente, et plus ils s'assurent, en temps, plus la moyenne des sommes à verser est importante. La prime est alors le coût maximal de l'assureur divisé par le nombre d'assurés.

La compagnie d'assurance doit alors, à partir des capitaux dont elle dispose, calculer le risque maximal payable, et donc le nombre maximal d'assurés possibles. Si l'assurance est obligatoire, la seule solution est d'augmenter la cotisation de la compagnie d'assurance, et donc de fusionner avec une autre compagnie : c'est la logique de concentration économique des assureurs, entrevue par Paul Lévy en 1925 dans le contexte du paradoxe de Saint-Petersbourg.

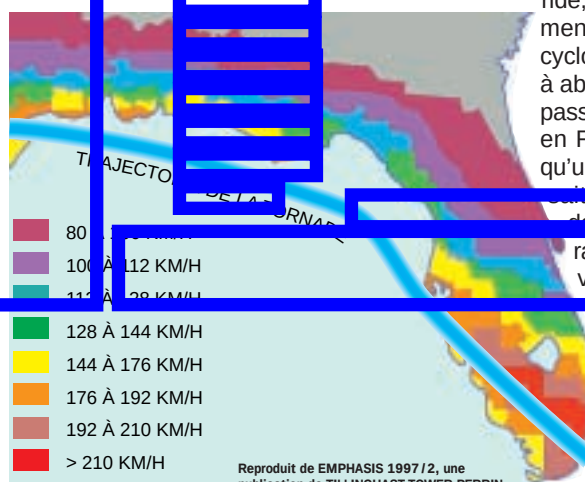
## TRANSFERTS DE COÛTS

Les études récentes font apparaître une augmentation du coût des sinistres en assurance : le dommage, due à l'accroissement du nombre des « catastrophes naturelles », mais aussi au manque de prudence des citoyens, de la loi, de l'écono-

mique. Ainsi on observe de trop fortes concentrations urbaines dans des régions à cyclones et des constructions de mauvaise qualité dans des zones à risques sismiques. Un des rôles des compagnies d'assurance serait de facturer au juste prix le coût de la protection, afin de dissuader les constructeurs de réaliser des bâtiments insuffisamment protégés ou dans des zones à forts risques.

Des primes d'assurance qui sous-évaluent le coût réel des pertes probables reportent sur les individus avisés, les responsables de ceux qui n'adoptent pas un comportement adapté aux risques encourus. Dans le cas d'un sinistre, les coûts sont financés par une subvention de l'État, qui se traduira par une augmentation des impôts (transfert du coût sur les autres citoyens), ou un financement par accroissement de la dette publique (transfert du coût sur les générations futures). Autrement dit, une sous-évaluation des prix encourage des comportements trop risqués. Au contraire, l'intégration du coût réel des sinistres dans les primes d'assurance fait payer à chacun le juste prix de sa conduite. Si les retraités américains tiennent à habiter le plus près possible des côtes de la Floride, les coûts de la construction des bâtiments devraient inclure les risques de cyclones. Les habitants de la Floride ont eu à aborder toutes ces questions après le passage du cyclone « Hurricane Andrew » en Floride. Une des conclusions était qu'une assurance trop bon marché induit des constructions mal protégées dans des zones à risques, et transférerait le coût de l'imprudence sur les individus prudentes. Est-ce une bonne politique pour la collectivité ?

Miami est une luxueuse station balnéaire. Que se passerait-il en cas de déplacement de la route d'un cyclone de type « Andrew » de quelques kilomètres au Nord, sur Miami ? Réponse sur la figure ci-contre. Les neiges de Saint-Petersbourg sont prêtes à tomber sur les plages ensoleillées de Miami.



Vitesses des vents lors du passage d'un cyclone de type Andrew sur les côtes de Floride. Le coût des dégâts assurés résultant de la tornade serait de 100 milliards de dollars.

# Le froid et le chaud

NERVE TISS

Quelques mesures de température en cuisine.

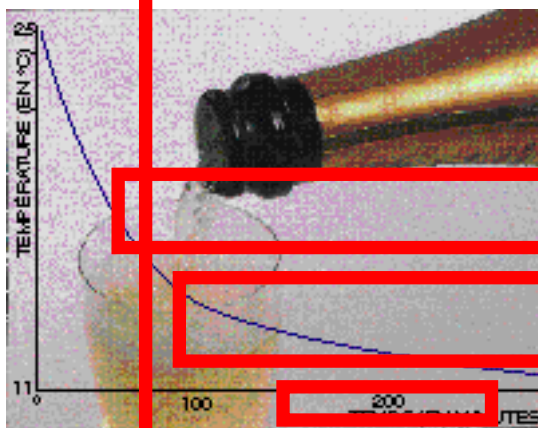
**O**n veut refroidir du champagne : combien de temps la bouteille doit-elle séjourner dans le réfrigérateur ? Les parents gourmandent les enfants qui laissent la porte du réfrigérateur ouverte ; ont-ils raison de craindre un réchauffement rapide des denrées qui y sont conservées ? On monte le vin de la cave pour le chambrer, avant un repas ; combien de temps à l'avance faut-il s'y prendre ? L'emploi d'un thermocouple, appareil qui mesure précisément les températures, donne des ordres de grandeur utiles aux gourmets.

Commençons par ce champagne, qu'on veut frappé. Pour déterminer combien de temps il faut le rafraîchir, on a placé la sonde du thermocouple dans une bouteille qui a été installée dans la porte d'un réfrigérateur à l'équilibre thermique : des bouteilles qui se trouvaient depuis plus de deux jours à côté de l'emplacement où l'on a déposé la bouteille de champagne étaient à une température de 11° C. À partir d'une température initiale du champagne égale à 25° C, les mesures effectuées toutes les dix minutes ont montré un lent refroidissement : après 30 minutes, la température est encore supérieure à 20° C, et c'est seulement après trois heures que l'on obtient une température de 15° C ; la température de 12° C n'a été atteinte qu'après six heures ! Cette mesure confirme, expérimentalement, que le verre conduit mal la chaleur (cette dernière s'y propage par conduction, tandis que, dans l'eau, la chaleur se répartit également par convection).

Voulez-vous être froids, vous avez tenu compte de cette forte inertie thermique des bouteilles, mais un enfant arrive et ouvre la porte du réfrigérateur. Le champagne que vous peinez à rafraîchir risque-t-il de se réchauffer ? Cette fois, on a mesuré la température dans le réfrigérateur à un endroit où elle était initialement égale à 5° C. À l'extérieur, la température était égale à 20° C.

Quand on ouvre la porte pendant sept secondes seulement, la température de l'air monte à 11° C ; puis elle redescend à 8° C en quelques minutes ; quand on ouvre la porte pendant 20 secondes, la température monte à 18° C, avec

une recrudescence de la température rapide d'abord, lente ensuite. Le réchauffement de l'air d'un réfrigérateur est donc assez rapide, parce que l'air froid et dense du réfrigérateur s'écoule par le bas, remplacé par de l'air ambiant... mais ce réchauffement ne concerne que l'air, et non les bouteilles, dont la capacité calorifique – et l'inertie thermique – est notable : pour ces dernières, la température ne varie quasiment pas lors de l'ouverture momentanée de la porte, et



**Pensons à rafraîchir le champagne à l'avance : il faut plusieurs heures avant d'atteindre 12° C, à partir d'une température ambiante de 25° C.**

le refroidissement reprend rapidement, après les quelques minutes de refroidissement rapide de l'air.

## ET LE CHAUD

Après ces mesures rafraîchissantes, examinons le problème inverse, celui du réchauffement. Une question délaissée est celle du chambrage des vins. En vue d'un bon dîner, on veut monter un vin fin de la cave pour le faire déguster à des amateurs éclairés. Ceux-ci croient savoir que le vin doit être bu à la température de 18° C, mais la cave, elle, n'est qu'à une température de 12° C. Combien de temps à l'avance le vin doit-il être monté pour que la température réglementaire soit atteinte ?

On pourrait naturellement utiliser les lois de la physique pour calculer ce temps, mais faisons une expérience simple : mesurons la température au cours du temps. Dans une pièce à 24° C, où était placée une bouteille de vin à la température initiale de 9° C, on mesure

qu'il faut environ une demi-heure pour atteindre la température de 12° C, trois quarts d'heure pour atteindre la température de 14° C, une heure et quart pour atteindre 16° C, une heure et trois quarts pour atteindre 18° C et plus de trois heures pour atteindre 20° C !

La longue durée du chambrage résulte encore de la faible conductivité thermique des bouteilles ; surtout quand la différence de températures entre la pièce et la bouteille est faible, le chambrage est une opération longue, qui ne se décide pas à la dernière minute.

De ces premières mesures, pouvons-nous déduire les temps de chambrage si nous sommes en été, à une température qui atteint 27° C ? Hélas non : il faut d'autres mesures... ou des calculs classiques de la théorie de la chaleur. Retenons seulement quelques ordres de grandeur : quand la température de la pièce est égale à 27° C, il faut environ 80 minutes à partir de 12° C ; inversement, quand la température de la pièce est égale à 19° C seulement, il faut cette fois plus de deux heures et demie à partir de 12° C. Lors des mesures, on observe, en outre, que la partie supérieure d'une bouteille (verticale) se réchauffe plus vite que la partie inférieure : la différence peut atteindre quatre degrés, ce qui engendre des différences de goût importantes entre les premières et les dernières gorgées de vin : les arômes s'évaporent plus vite quand la température est élevée).

Enfin, les convives sont à table : versons le vin dans les verres. Une fois que le vin, chambré à 16° C, est versé dans le verre, à quelle vitesse se réchauffe-t-il quand la température ambiante est égale à 23° C ? Cette fois, la température dans un verre classique augmente en moyenne de 0,2° C par minute. Voilà de quoi nous inciter à ne verser dans le verre que lorsque les convives sont prêts à boire.

**Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 23 octobre 1997, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.**

## Explosion de poussières

### Phénomène meurtrier et difficilement modélisable

Le 20 août 1997, l'explosion de silos à grains à Blaye, sur l'estuaire de la Gironde, fait 11 morts. Plus de 20 ans après l'explosion de la malterie de Metz, ce dramatique accident repose les problèmes de sécurité liés à la manipulation de produits solides pulvéulents.

La manipulation des grains engendre d'importantes quantités de poussières (0,1 pour cent du poids manipulé) qui, mises en suspension, forment une atmosphère explosive. Lorsque cette atmosphère est mise au contact d'une source d'inflammation, l'explosion se déclenche.

Que s'est-il passé à Blaye ? Les conclusions définitives de l'enquête ne seront pas connues avant plusieurs mois, mais des poussières en suspension ont dû être mises au contact d'une étincelle (provenant d'un frottement mécanique ou de l'électricité statique) ou d'une source résultant d'un auto-échauffement (réactions d'oxydo-réduction, fermentation). Les parois des silos de béton n'ont pas résisté à l'explosion.

Peut-on empêcher de tels accidents ou en réduire la gravité ? Les professionnels sont plus conscients qu'auparavant de l'existence de ce risque, ainsi qu'en témoigne la forte participation à un séminaire tenu récemment en France sur les

explosions de poussières. Des mesures réglementaires sont à l'évidence indispensables. Cependant, en raison des enjeux économiques, leur mise en œuvre ne saurait pas toujours une adhésion spontanée. Par ailleurs, la mise en place de dispositifs de protection efficaces se heurte à l'insuffisance des connaissances scientifiques des phénomènes en cause.

Diverses méthodes sont utilisées dans le monde pour classer les poussières en fonction de leur dangerosité (risque d'explosion). Aucune ne fait l'unanimité, car les résultats des tests de classement dépendent d'un grand nombre de facteurs qui varient beaucoup d'un test à l'autre : taille et forme de l'enceinte d'expérience, procédé de mise en suspension, dispositif d'allumage...

Plus la vitesse de combustion d'un mélange est grande, plus l'explosion du mélange est violente. Par exemple, une explosion d'hydrogène est plus violente qu'une explosion de méthane. Ce paramètre caractéristique est beaucoup plus difficile à déterminer dans les mélanges de poussières que dans les gaz : la structure des flammes de poussières et les mécanismes de propagation sont mal connus. Par exemple, les transferts par rayonnement, le plus souvent négligeables dans le cas des gaz, jouent un rôle prépondérant dans certaines flammes de poussières.

L'un des moyens classiques de protection consiste à installer des événements qui cèdent en cas de brusque surpression. Cette technique ne s'applique cependant que dans des conditions précises :

enceintes de forme simple, pas trop allongées, sans variation de section, ni obstacles à l'intérieur. Ces conditions correspondent uniquement aux enceintes de stockage. Dans ces enceintes, la pression résultant de l'inflammation d'une suspension de poussières ne croîtra pas trop vite et les effets de cette croissance pourront être limités par l'action des événements.

Malheureusement, les inflammations accidentelles se produisent rarement dans ce type d'enceintes, mais dans les conduites de transport, les élévateurs, les filtres ou d'autres éléments de manipulation. Ces éléments favorisent les vitesses de propagation élevées, de sorte que des ondes de choc peuvent se former. L'utilisation d'événets est alors inopérante et peut même se révéler néfaste en favorisant la propagation de l'explosion entre des enceintes séparées. Hélas, là encore on connaît mal la propagation de flammes dans des écoulements instationnaires et dans des géométries complexes. Aucune méthode prédictive n'existe aujourd'hui.

Comment caractériser les régimes de combustion, entre déflagration (subsonique) ou détonation (supersonique) ? Cette caractérisation est importante, car la vitesse de propagation d'une détonation est 10 à 20 fois plus élevée que celle d'une flamme laminaire (la flamme d'un brûleur de chauffage par exemple). Aujourd'hui, peu de résultats sont disponibles, car la taille des expériences « de laboratoire » nécessaire pour obtenir des résultats pertinents est d'au moins 10 fois, voire 100 fois, la taille des montages expérimentaux utilisés dans le cas des mélanges gazeux !

De manière générale, l'étude de la combustion dans des suspensions de poussières est beaucoup plus ardue que celle des mélanges gazeux en raison de l'hétérogénéité du milieu, et parce que la réalisation d'expériences reproductibles dans des conditions bien contrôlées se heurte à d'importantes difficultés techniques. L'effort en matière de recherche (tant fondamentale qu'appliquée) par la France en ce domaine reste bien inférieur à celui de la plupart des grands pays industrialisés. Si de tels retards devaient perdurer, la mise au point de dispositifs techniques et de méthodes de protection efficaces serait compromise.

B. VEYSSIÈRE, CNRS, Laboratoire de combustion et de détonique, Poitiers



Près de Bordeaux, une explosion de poussières a détruit une dizaine de silos à grains.

## Mucoviscidose

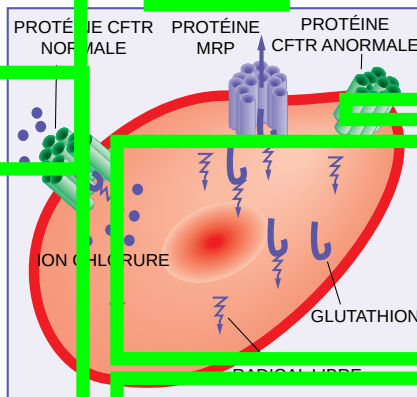
**Un traitement anticancéreux améliore les patients atteints de cette maladie génétique.**

La mucoviscidose est une maladie génétique, la plus fréquente des maladies héréditaires mortelles. Quarante pour cent environ des Européens et des Américains du Nord sont porteurs d'un gène muté et, en France, 6 000 personnes seraient atteintes de la maladie. Jusqu'à présent les traitements réservés au système pulmonaire, les tentatives de thérapie génique n'ayant pas donné les résultats escomptés. Les équipes de Jean-Yves Lallemand et de Sylvain Blauquet, à l'École Polytechnique, et celle de Gérard Lenoir, à l'Hôpital Necker-Enfants malades, viennent de proposer un nouveau traitement de la maladie fondé sur une meilleure compréhension des mécanismes qui la déclenchent.

La mucoviscidose se révèle par des manifestations digestives et pulmonaires variées : un amaigrissement persistant ; un déficit de la fonction pancréatique ; des bronchites fréquentes. Une concentration élevée en chlorure de sodium dans la sueur confirme le diagnostic. Au début de la maladie, les petites voies aériennes sont obstruées par un mucus visqueux. Normalement ce mucus élimine les débris cellulaires, les micro-organismes ou les particules inspirées ; les cellules ciliées pulmonaires le font avancer et gagner le haut de la trachée, d'où il est expectoré. Quand le mucus est trop visqueux, il s'accumule et obstrue les bronchioles, où des mécanismes inflammatoires et infectieux se déclenchent.

Un seul gène est en cause. L'enfant atteint hérite de ses parents de deux copies anormales de ce gène. Le gène dont les mutations sont responsables de la maladie code la protéine CFTR, un canal chlore, c'est-à-dire une protéine transmembranaire qui contrôle l'entrée des ions chlorures dans les cellules et leur sortie. La mutation la plus fréquente (dans 70 pour cent des cas) est nommée mutation  $\Delta F508$ , mais d'autres parties codantes du gène peuvent être le siège de mutations. La protéine CFTR est notamment exprimée dans le pancréas, le poumon, le foie, l'intestin et le rein. Toutefois, s'il a bien été prouvé que la protéine CFTR contrôle la concentration cellulaire en ions chlorures, sa fonction ne semblait pas totalement élucidée.

Progressivement, en associant diverses pièces d'un puzzle biochimique,



**Dans une cellule normale, le glutathion «pêche» les radicaux libres délétères et les élimine par un canal CFTR. Quand la protéine CFTR est anormale, elle n'autorise pas cette évacuation. La protéine MRP, activée par un médicament anticancéreux, semble soulager les patients atteints de mucoviscidose : elle assure l'évacuation des cellules, compensant la protéine CFTR inefficace.**

les trois équipes ont été conduites à proposer que la protéine CFTR a une seconde fonction. Elle servirait aussi de canal à une autre molécule, le glutathion, ce peptide (un fragment de protéine) servirait de piège pour diverses molécules toxiques qui risquent d'endommager les cellules, par exemple les métaux lourds ou les radicaux libres très oxydants. Lorsqu'une molécule de glutathion charbonné une de ces cibles, elle est expulsée activement par le canal CFTR. Lorsque la protéine CFTR est déficiente, elle ne remplit plus son rôle, de sorte que les éléments toxiques, notamment les radicaux libres, s'accumulent, finissant par détruire la cellule.

Comme les chimistes et les biologistes ont eu l'idée que la molécule CFTR est non seulement un canal passif pour les ions chlorures, mais aussi un canal actif pour le glutathion ? En observant un patient atteint d'une mucoviscidose, mais aussi d'un cancer. Traité par des agents anticancéreux, il fut rapidement soulagé de sa mucoviscidose. On sait que les substances anticancéreuses déclenchent souvent la production d'une protéine endogène de résistance aux agents anticancéreux : cette protéine de défense rend le traitement inefficace, car elle inactivate les molécules thérapeutiques agressives pour les cellules tumorales, mais aussi pour les cellules normales.

Enfin, l'administration de substances anticancéreuses aurait déclenché, chez le patient atteint de mucoviscidose, la production des protéines de résistance aux anticancéreux, MRP et MDR. Or la protéine MRP ressemble tellement à la protéine CFTR qu'elle l'aurait remplacée : elle aurait assuré le rôle de canal actif, évacuant, par l'intermédiaire du glutathion, les radicaux libres toxiques.

## BRÈVES

### En pleine de la graine

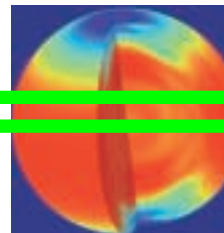
Quel est le descendant le plus direct du pomier ? La question a été posée par la théorie de la génétique. Les chercheurs, Madan Thangavelu, de Wye College en Angleterre, examine les empreintes génétiques de différents pomiers du jardin de Newton. L'un d'eux semble un meilleur candidat. Les gestionnaires souhaitent planter ses graines dans tous les Instituts de physique des zones tempérées du Globe.

### Du plomb aux caries

Les caries sont plus fréquentes chez les personnes exposées au plomb par l'eau de boisson, les peintures, les batteries ou encore les déchets industriels. Une équipe américaine a montré qu'une exposition pré- ou périnatale de souris au plomb entraîne aussi une augmentation notable des caries : le plomb se concentre dans les glandes salivaires et, donc, dans le lait de la mère.

### Jets polaires

Des astrophysiciens de l'Université Stanford ont découvert, grâce aux mesures du satellite SOHO, des courants de gaz chaud circulant à plus de 20 000 kilomètres par seconde au-dessus du Soleil. Ces courants sont analogues aux alizés terrestres, ceinturent l'hémisphère Sud et Nord de notre étoile. Les chercheurs ont également mis en évidence des jets polaires qui assurent la circulation de gaz entre l'équateur et les pôles.



### Classes de niveau

La répartition des collégiens dans des classes de niveau homogène améliore-t-elle leurs résultats ? Selon Marie Duru-Bellat et Alain Mingat, de l'Institut de recherche sur l'éducation de l'INRA de Dijon, l'avantage des classes de niveau est bien inférieur à leurs inconvénients. La progression des meilleurs élèves dépend peu du niveau moyen de la classe où ils se trouvent. En revanche, les collégiens les plus faibles progressent plus au cours d'une année s'ils sont dans une classe de niveau moyen supérieur au leur...

Suite page 30

### La couleur des dinosaures

En comparant les structures qui donnent leurs couleurs aux poissons actuels avec celles relevées sur les os des fossiles, le biophysicien pense reconstituer ainsi la couleur des dinosaures.



Le biophysicien pense reconstituer ainsi la couleur des dinosaures.

### Épée de Damoclès bactérienne

Les bactéries résistant aux antibiotiques se multiplient. Trois équipes de l'Institut Pasteur ont isolé une nouvelle souche de la bactérie *Staphylococcus aureus*, une des espèces les plus pathogènes pour l'homme ; elle contient de nombreux gènes de résistance qui lui permettent d'échapper à l'action pharmacologique des antibiotiques recommandés par l'Organisation mondiale de la santé. On peut craindre qu'elle ne transfère ces gènes à d'autres bactéries pathogènes pour l'homme.

### Des molécules antigel

Certaines protéines inhibent la formation des cristaux de glace dans le sang, à des températures inférieures à celle du point de congélation de l'eau. Certains poissons, certains poissonnards, sécrètent de tels antigels. Une équipe canadienne vient de découvrir que des insectes en produisent aussi. De telles protéines « humanisées » pourraient-elles améliorer la conservation des organes que l'on désire transplanter et que l'on doit conserver à très basse température pour éviter leur dégradation ?

### La thalidomide réutilisée ?

La thalidomide, de triste mémoire, serait efficace pour lutter contre la lèpre. Cette substance prescrite aux femmes enceintes pour lutter contre les nausées de grossesse, a causé de graves malformations fœtales. L'administration américaine de la santé propose aujourd'hui de l'utiliser pour lutter contre la lèpre, la tuberculose, l'amaigrissement des personnes atteintes du SIDA. La substance ne serait administrée aux femmes que si elles acceptent d'utiliser simultanément deux moyens contraceptifs.

Le rôle de canal actif du glutathion (on dit aussi de transporteur du glutathion) a déjà été observé sur des levures sensibles au cadmium : en présence de cadmium, ces levures meurent. Quand on introduit dans leur génome le gène codant la protéine MRP, les levures deviennent résistantes au cadmium. La protéine canal évacue les complexes glutathion-cadmium, et les levures résistent au métal.

Ainsi la protéine MRP, codée par le génome humain normal, serait une protéine de détoxification de secours. Normalement, elle ne semble pas être exprimée (ou très peu), car la protéine CFTR suffit à éliminer les radicaux libres et les métaux lourds grâce au glutathion. En revanche, lorsque la protéine CFTR est déficiente, et que l'on déclenche l'expression de la protéine MRP par des substances anticancéreuses, on compense l'anomalie et l'on soulage les patients atteints de mucoviscidose. Une fois déclenchée par un traitement anticancéreux, l'expression de la protéine MRP se poursuit, même après l'arrêt du traitement.

Toutes ces nombreuses questions restent ouvertes : pour le moment un seul patient a été soulagé de sa mucoviscidose par un traitement anticancéreux ; bien que le faisceau des « preuves » soit dense, ce mécanisme s'appliquera-t-il à tous les patients atteints de mucoviscidose ? Pourra-t-on administrer à des enfants un traitement anticancéreux visant à déclencher l'expression de la protéine de résistance, au risque de rendre inefficace le traitement d'un éventuel cancer ? Pendant combien de temps l'expression de la protéine MRP se poursuit-elle après l'arrêt de la chimiothérapie ? L'accumulation de radicaux libres est mise en cause dans diverses maladies, par exemple la polyarthrite rhumatoïde ou certaines formes d'asthme. Le déclenchement de l'expression de la protéine MRP serait-il un moyen de freiner l'évolution de ces maladies, voire de les prévenir ? Quoi qu'il en soit, l'identification des mécanismes de secours et leur activation par une substance chimique semblent être une nouvelle voie de recherche pour les biologistes.

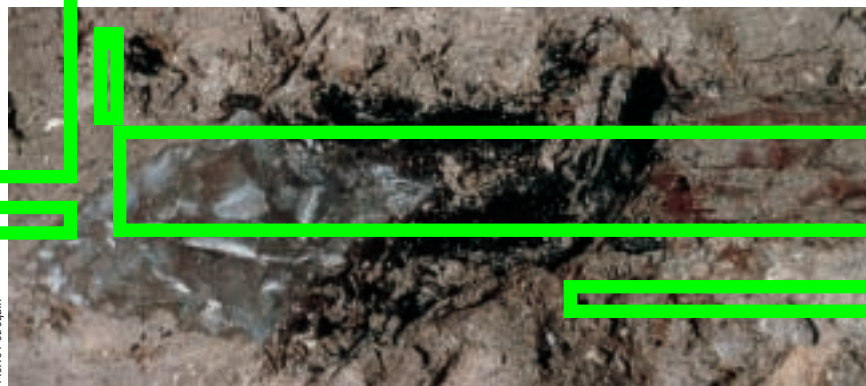
## Les adhésifs néolithiques

### Les pointes de fleches etaient collées sur la hampe par divers matériaux.

Comment fixer un outil de pierre sur un manche en bois ? À la fin du IV<sup>e</sup> millénaire avant notre ère, les habitants des rives du lac de Chalain, dans le Jura, collaient leurs pointes de flèches sur les hampes de bois à l'aide d'adhésifs organiques. La diversité de ceux-ci, révélée par l'ana-

lyse chimique, témoigne de la créativité technique des anciens Jurassiens.

Quelles sont les matières premières utilisées dans la fabrication des adhésifs au Néolithique ? Comment étaient-elles obtenues et transformées ? Nous avons analysé, en chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse, une trentaine d'adhésifs ayant servi à emmancher des pointes de flèches provenant des sites de Chalain. La majorité de ces produits sont des goudrons végétaux, ou brais, obtenus par chauffage d'écorce ou de bois. La nature des végétaux employés est indiquée par la présence de molécules caractéristiques : la lupénone, le lupéol et la bétuline pour le



Cette pointe de flèche de la fin du IV<sup>e</sup> millénaire, découverte sur le site de Chalain, dans le Jura, est encore en position sur sa hampe en bois (à droite). Elle y était fixée par une ligature et par un adhésif dont quelques vestiges subsistent (en noir). L'analyse chimique de ces adhésifs révèle une grande diversité de compositions et de préparations.

brai d'écorce de bouleau, très adhérent, l' $\alpha$ -, la  $\beta$ -anhrine ou le  $\beta$ -sitostérol pour d'autres goudrons végétaux issus de feuillus, tels l'aunle, le chêne ou le hêtre.

Deux échantillons étaient constitués d'hydrocarbures associés à des acides gras et à du cholestérol : vraisemblablement un mélange de bitume et d'une matière grasse animale qui jouait le rôle de plastifiant et améliorait l'adhésion. L'utilisation du bitume est connue au Proche-Orient depuis 40 000 ans, mais c'est la première fois qu'elle est mise en évidence au Néolithique en Europe sur la base d'analyses chimiques.

Les préhistoriens pensaient jusqu'à présent qu'en Europe tempérée, les adhésifs néolithiques étaient surtout fabriqués à base de brai de bouleau. La diversité des matériaux est donc surprenante, d'autant plus qu'ils sont tous utilisés pour la même fonction, l'emmanchement de flèches. Comme la production de céramiques, la fabrication de

ces adhésifs relève probablement d'activités domestiques, fortement dépendantes des traditions familiales au sein des différentes communautés : les matières premières et les températures auxquelles elles ont été transformées sont spécifiques à chacune. Cette diversité aurait été renforcée par le mélange des adhésifs récupérés et réutilisés après l'abandon des pointes en silex.

Les adhésifs à base de bitume, dont il n'existe aucun gisement naturel à proximité du site, proviennent probablement d'échanges, dans le cadre de contacts qui ont été démontrés par ailleurs, entre les habitants de Chalain et ceux des villages néolithiques situés dans l'Ouest de la Suisse. Mais il est trop tôt pour déterminer la nature exacte et le niveau des échanges : l'objet de l'échange était-il le bitume seul, ou la flèche déjà emmanchée dans la hampe ?

En outre, la diversité des adhésifs témoigne de l'évolution des techniques

au cours du temps : certains d'entre eux ont été utilisés à toutes les époques, tandis que d'autres sont caractéristiques de périodes chrono-culturelles déterminées. Quelques-uns des goudrons végétaux ainsi que les adhésifs à base de bitume ont en effet seulement été retrouvés dans des niveaux datés de la période Horger (3100 à 3100 avant notre ère), alors que d'autres sont absents pendant cette période, mais représentés pendant la seule période Chalain (3300 à 2800 avant notre ère). Pendant cette dernière période, les types d'adhésifs utilisés étaient en outre moins nombreux : comme celle des autres matériaux et objets plus classiquement étudiés en archéologie préhistorique, la fabrication des adhésifs obéit à diverses traditions techniques qui ont évolué au cours du temps.

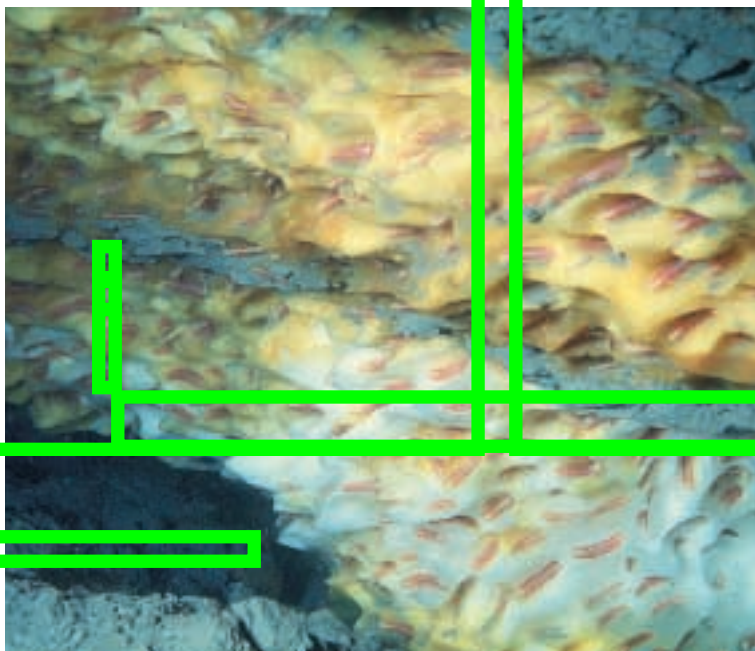
M. REGERT, UMR 171, LRMF et ENS,  
P. PÉTREQUIN, UMR 6565 CNRS  
et Université de Franche-Comté

## Vers des mers

Le fond des mers serait peuplé de plus de dix millions d'espèces animales, dont un millier à peine a été répertorié. Aussi, la découverte d'une nouvelle espèce ne semble guère importante... sauf si elle occupe un habitat peu hospitalier. Dans le golfe du Mexique, à l'aide d'un sous-marin téléguidé, Carl Fisher, de l'Université de Pennsylvanie, et son équipe, ont découvert une colonie de vers bivalves sur de la glace de méthane.

Dans les sédiments, l'activité bactérienne produit du méthane qui est ensuite transporté par des courants qui y circulent. Lorsque cette eau chargée en méthane est comprimée et refroidie (à quelques degrés), des glaces de méthane se forment. Elles sont plus souvent enfouies à plus de 500 mètres dans les sédiments marins. En Méditerranée et dans le golfe du Mexique la glace de méthane peut affleurer sous la forme de monticules de quelques mètres de large.

Près des sources de fluides froids, chargés en hydrocarbures et en éléments réduits (sans oxygène), en sel ou en hydrogène sulfuré, les biologistes connaissent des commu-



Dans le golfe du Mexique, à plus de 600 mètres de profondeur, une dense colonie de vers vit sur un affleurement de méthane solidifié.

nautés de vers bivalves qui vivent en symbiose avec des bactéries. Ces bactéries utilisent l'énergie chimique des éléments contenus dans les fluides comme source d'énergie pour synthétiser de la matière organique nécessaire à la survie des vers. Sur les glaces de méthane, où la concentration en hydrocarbures est extrême, on pensait que des organismes similaires ne pouvaient survivre.

En profondeur, le seul moyen d'étude efficace est le sous-marin. En juin dernier, à 250 kilomètres au Sud de la Nouvelle-Orléans, le sous-marin de poche télécom-

mandé de l'équipe de biologistes plonge à plus de 600 mètres de profondeur. Il photographie, sur la glace de méthane, des milliers de vers de quelques centimètres de long. Quelles sont les relations entre ces vers et les sources gazeuses ? Les biologistes supposent que ces vers se nourrissent de bactéries présentes sur les monticules ou vivent

Plusieurs vers ont été extraits de leur habitat et rapportés au laboratoire pour y être étudiés. Une question se pose : jouent-ils un rôle dans la manière dont ces dépôts se forment et se dissolvent ?

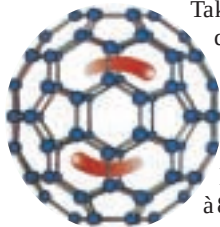
### Filets préhistoriques

Nos ancêtres chassaient-ils au filet il y a 25 000 ans ? Une équipe américaine affirme que des empreintes conservées dans de l'argile du site de Dolní Věstonice, République tchèque, ont été laissées par des fibres textiles. Les traces de nœuds qu'ils ont identifiées seraient caractéristiques de l'assemblage de mailles. Cette découverte coïncide avec les nombreux restes de petits mammifères découverts sur les mêmes sites, et que les populations préhistoriques auraient piégés au filet.

### Danse d'atomes

La molécule à 60 atomes de carbone, le fullerène suscite études et surprises.

Takashi Akasaka et ses collègues de l'Université de Kyoto ont découvert que deux fullerènes, de formule  $C_{60}$  et  $C_{70}$ , à la température ambiante, les deux atomes de l'anthracène piégés dans la cage à 60 atomes de carbone tournent comme des écureuils en cage sur un cercle déterminé par la position des atomes de carbone liés en pentagones.



### La couleur des oiseaux

Dans de nombreuses espèces d'oiseaux, les « belles » femelles ont des plumes qui gagnent le prix de la couleur. Selon A. Bennett, de l'Université de Bristol, nous ne pouvons comprendre le détail de ces préférences avec nos yeux : chez les étourneaux, la réflectance du plumage des mâles aux longueurs d'onde de l'ultraviolet, que les oiseaux perçoivent mais pas les humains, est l'un des critères qui déterminent le choix des femelles.

### Oscillation superfluide

Voici plus de 30 ans, B. Josephson et R. Feynman avaient prévu l'oscillation quantique des superfluides. Des physiciens américains l'ont observée : ils ont séparé deux compartiments d'hélium superfluide à une pression légèrement différente par une membrane comprenant des milliers de trous de dix micromètres de diamètre. Dans ce système, la membrane, ils ont placé un microphone et ont enregistré le son résultant des allers et venues de l'hélium, plusieurs milliers de fois par seconde. Lorsque ce son est amplifié des milliards de fois, l'oscillation produit un sifflement audible dont la fréquence varie avec la différence de pression, conformément aux prévisions des deux prix Nobel.

## Qui vivra verra

### La syntaxe des proverbes communs à l'italien et au français.

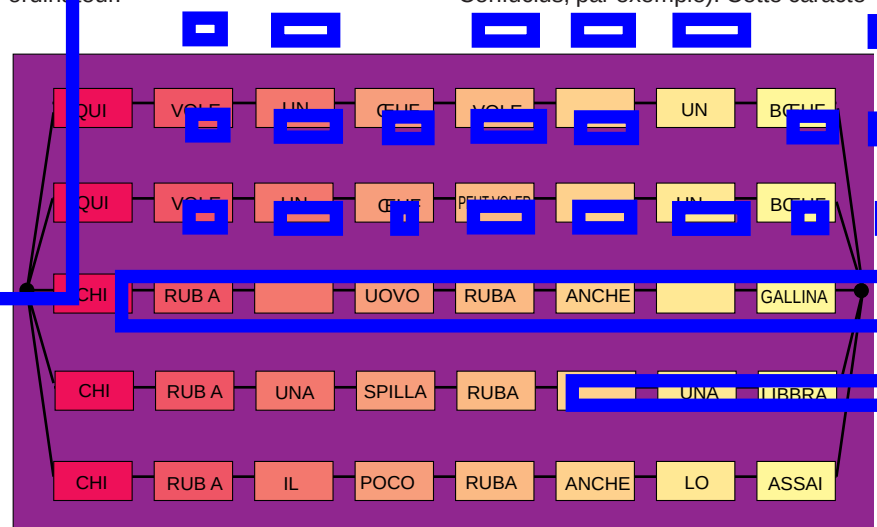
Les expressions idiomatiques gênent les traducteurs humains ou automatiques, car leur traduction automatique impose la reconnaissance de leur nature. Un programme qui rencontrerait dans un texte en italien la phrase *Chi va con lo zoppo impara a zoppiare* et qui n'y verrait pas un proverbe fournirait la traduction littérale *Qui va avec un boiteux apprend à boiter*, et il serait fautif, car la langue française possède des proverbes équivalents : *Qui hante chien, puce se remporte* ou *Qui est avec les loups doit hurler*. Pis encore, les expressions idiomatiques ne sont pas des exceptions : on pourrait traiter cas par cas : Maurice Gross, de l'Université Paris VII, en a recensé près de 25 000 pour le français ! À l'Université de Bari, Mirella Conenna a défriché le problème pour la classe des proverbes français et italiens qui commencent par *Qui* ou *Chi* : *Qui dort dine*, *Qui casse paye*, *Qui a bu boira*, *Chi va piano va sano*...

Comment identifier automatiquement les proverbes dans un texte ? En changeant le temps, on distingue une expression figée d'un proverbe. On peut ainsi changer le temps de la phrase figée *Je suis certain qu'il faut prendre le taureau par les cornes*, car la phrase *J'étais certain qu'il fallait prendre le taureau par les cornes* reste cohérente, tandis que *Qui dormait dinait* donne un sentiment de fautes : le proverbe ne se conjugue pas. Toutefois, ce genre de manipulation n'est pas facilement effectué par un ordinateur.

M. Conenna a recueilli dans les divers recueils 2 200 proverbes italiens et 2 500 proverbes français commençant respectivement par *Chi* ou *Qui*. Pourquoi les proverbes de ce type particulier sont-ils plus nombreux en italien qu'en français ? Sans doute parce que les phrases qui commencent par *Qui* sont archaïques en français, alors que la construction avec *Chi* reste habituelle en italien : nul n'est prophète en son pays.

Un des objectifs de l'étude étant l'amélioration des systèmes automatiques de traduction, M. Conenna a analysé la structure syntaxique des proverbes recensés, afin d'engendrer des moteurs de recherche capables de les reconnaître. Elle a ainsi montré que tous les proverbes qui commencent par *Qui* sont décrits par la structure  $(Q)(C)(VW)_0VW$ , où *V* représente un verbe et *W* une séquence de compléments éventuels. Par exemple, *Qui dort dine* est une structure du type  $QV_1V_2$ , tandis que *Qui veut noyer son chien l'accuse de la rage* est de type  $QV_1N_1N_2V_2N_3$ . Avec ces données, elle a construit un dictionnaire électronique, c'est-à-dire un fichier d'ordinateur où sont enregistrés les proverbes commençant par *Qui*. Ce dictionnaire a été ajouté au programme INTEX, qui contient déjà les dictionnaires électroniques mis au point dans le laboratoire de M. Gross pour les formes simples, flechies, les mots composés, les noms propres, les toponymes, etc.

Le programme INTEX identifie toutes les occurrences des formes, ainsi que des catégories grammaticales. Appliqué à l'année 1993 complète du journal *Le Monde*, ce programme a d'abord cherché à reconnaître le mot «proverbe» dans 59 des 79 cas identifiés, le proverbe venait toujours d'ailleurs (les auteurs du *Monde* ou les journalistes dont les propos sont rapportés par le journal citent volontiers Confucius, par exemple). Cette caracté-



Les proverbes français et italiens qui commencent par *Qui* ou *Chi* peuvent être décrits par une même structure syntaxique. Dans cette structure, certains mots peuvent être omis.

ristique. Mais pas d'aujourd'hui. M. Conenna avait montré que, sous le règne de Louis XIV, les proverbes étaient surtout espagnols et italiens.

Puis, à la recherche des *Qui dort dîne* ou autres *qui vivra verra*, le programme a cherché toutes les phrases commençant par *Qui* sur les 1 176 occurrences trouvées, 107 étaient des phrases interrogatives, et *qui (!)* n'a laissé qu'un cor-

pus de 69 phrases. L'analyse ultérieure, sur les années 1992 et 1994, a donné respectivement 406 et 256 autres candidats. Le corpus des proverbes était inférieur à l'ensemble des phrases trouvées : par exemple, *Qui dit folklore dit musiques du monde*, *Qui dit intégration dit nation*, *Qui dit prototypes pense expérience* ne sont pas des proverbes, mais des phrases qui sont en dérivées.

À quoi bon de telles descriptions ? Tout d'abord, les ordinateurs recherchent facilement des structures dans des bases de données. L'existence des structures formelles de proverbes contribuera à leur reconnaissance dans les textes à traduire. En outre, l'étude des singularités à décrire les proverbes : en les classant par types syntaxiques, on trouve rapidement les ressemblances profondes.

## Poches d'ozone

### Des poches d'ozone découvertes par des avions de ligne.

L'ozone stratosphérique protège la biosphère des radiations ultraviolettes solaires, nocives pour la santé. Inversement, à basse altitude et à haute concentration, l'ozone peut avoir des effets délétères. Aussi cherche-t-on à mesurer la quantité d'ozone dans l'atmosphère et à comprendre ses déplacements.

Quatre vingt-dix pour cent de l'ozone sont situés dans la stratosphère (entre 10 et 30 kilomètres d'altitude), les dix pour cent restants sont dans la troposphère (entre dix kilomètres d'altitude et le sol). Ces deux régions sont séparées par une frontière, la tropopause, caractérisée par une inversion du gradient de température qui limite les échanges d'air (la température diminue dans la troposphère et croît dans la stratosphère). À l'aide d'instruments de mesure placés à bord de cinq avions de lignes *Airbus 340* (des compagnies *Air France*, *Austrian Airlines*, *Lufthansa* et *Sabena*), dans le cadre du programme de la Commission européenne MOZAIC, nous avons découvert des poches riches en ozone dans la troposphère équatoriale.

Pour mesurer l'ozone, le programme MOZAIC utilise des avions commerciaux, dont la fréquence de vol et la couverture géographique sont inégalables : les cinq avions équipés ont effectué à ce jour plus de 5 000 vols au-dessus de l'Amérique du Nord et du Sud, de l'Afrique et de l'Asie. Les mesures sont réalisées lors des décollages et des atterrissages, ainsi que pendant les périodes de croisière. Comme l'altitude de la tropopause augmente de 7 kilomètres aux pôles, à 17 kilomètres, à l'équateur, ces avions subsoniques volent dans la troposphère et dans la stratosphère (les avions volent entre 10 et 12 kilomètres).

Dans la haute troposphère des régions tropicales, les avions ont rencontré des poches d'air très riche en ozone : plus

de dix fois la concentration moyenne. D'une largeur typique de 5 à 80 kilomètres, ces poches sont souvent localisées près des grands nuages tropicaux. Dans ces poches, les instruments ont également enregistré une forte humidité (présence de cristaux de glace), des variations de température et de fortes turbulences.

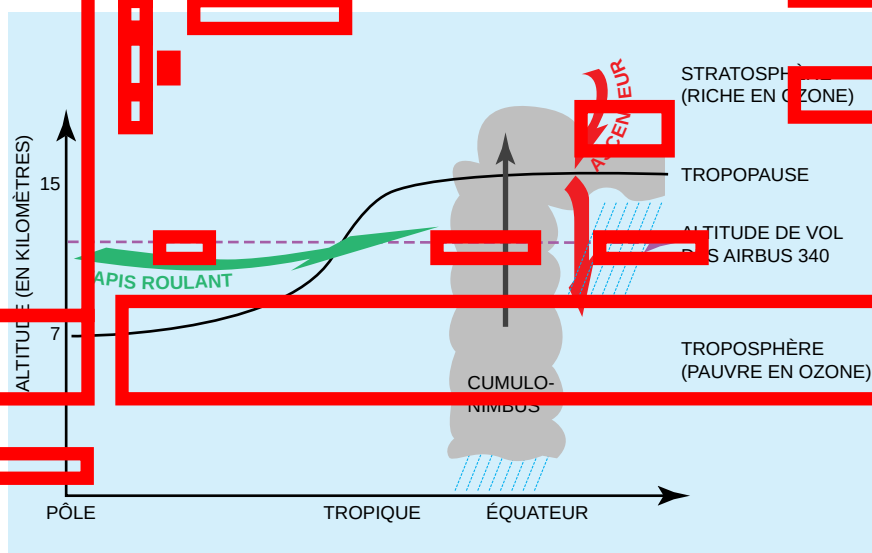
Les concentrations d'ozone y sont trop élevées pour être expliquées par une production photochimique d'ozone à partir des sources de pollution ou de feux de biomasse ou par une production par les éclairs dans les nuages équatoriaux. Ainsi, nous pensons que ces pics d'ozone de la troposphère équatoriale proviennent de la stratosphère.

Pour expliquer l'observation des poches d'ozone, nous proposons deux mécanismes de transport à travers la tropopause, qui constitue normalement une barrière au transport de l'air stratosphérique (voir la figure). Dans le premier mécanisme dit « tapis roulant », l'ozone serait transporté vers la tropopause subtropicale dans un sens pôle-équateur et presque horizontalement sans échange de chaleur, en suivant les courants méridiens. Des phéno-

mènes de turbulence et de mélange assureraient alors le passage à travers la tropopause.

L'autre mécanisme, dit de l'« ascenseur », utilise les courants ascendants et descendants des nombreux cumulonimbus de cette région. Le passage à travers la barrière que constitue la tropopause équatoriale se déroulerait selon le mécanisme suivant : injection de cristaux de glace dans la basse stratosphère par les cheminées ascendantes des cumulonimbus, mélange avec l'air riche en ozone suivi d'une descente des particules mélangées par suite de leur refroidissement (évaporation des cristaux de glace) sous la forme de coulées au pour des cumulonimbus. Cette hypothèse nécessiterait une alimentation continue des nuages en cristaux de glace. La confirmation de ces mécanismes bouleverserait nos connaissances du rôle de la convection nuageuse sur le transport des espèces chimiques en zone équatoriale et remettrait en cause l'étanchéité de la barrière dynamique subtropicale.

K. SUHRE, J.-P. CAMMAS et A. MARENCO, Labo. d'aérologie du CNRS, Toulouse



À bord d'*Airbus 340*, les instruments du programme MOZAIC ont détecté des poches riches en ozone dans la troposphère tropicale. Cet ozone provient de la stratosphère, soit en suivant les courants méridiens des pôles (flèche verte), soit en utilisant des « ascenseurs » que constituent les cumulonimbus tropicaux (flèches rouges).

## Sons rugueux, sons tendus

### L'harmonie musicale a des bases physiologiques.

Le compositeur de musique, devant sa table de travail ou son ordinateur, dispose *a priori* d'une infinité de possibilités dans l'agencement des sons *musicaux* et *acoustiques*. Si l'on compose dans le cadre de la musique tonale occidentale, des usages guident son écriture : seuls les sons de la gamme chromatique sont utilisables, et leur assemblage respecte les lois regroupées sous le nom d'harmonie. Celle-ci n'est pas que des conventions : certaines ont un fondement dans la physiologie de la perception auditive.

En musique tonale, la distinction des accords en deux couples, consonants et dissonants, permet, en partie, d'organiser les moments de tension et de détente à l'intérieur d'une œuvre : une tension est créée par un accord dissonant, puis relâchée par un accord consonnant. La définition de la consonance est partiellement culturelle : son domaine a évolué au cours du temps et s'est agrandi. Toutefois, les règles simples auxquelles on s'est accordé : deux notes dont le rapport des fréquences fondamentales fait intervenir des petits chiffres, tels les intervalles de quinte ( $3/2$ ) ou de quarte ( $4/3$ ), forment un accord plutôt consonant, alors que deux notes dont le rapport des fréquences fait intervenir des nombres élevés, tels les intervalles de septième ( $15/8$ ) ou de triton ( $45/32$ ), sont plutôt dissonants.

La consonance n'est en fait pas seulement conventionnelle. Des enfants de sept mois distinguent en effet les intervalles sur la base de leur consonance plus que sur la proximité des notes qui les composent. Le même phénomène a été observé avec des oiseaux, qui l'on peut difficilement soupçonner de connaître les conventions de l'harmonie tonale.

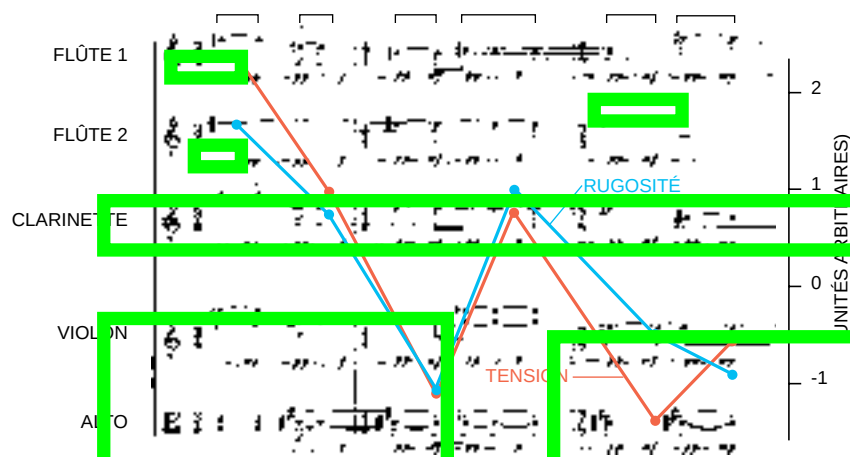
La théorie de la musique de von Helmholtz propose une explication physiologique de la consonance. Lorsqu'un haut-parleur émet simultanément deux sons parfaitement sinusoïdaux de fréquences proches, l'amplitude du son résultant est modulée en « battements », à une

fréquence égale à la différence entre les fréquences fondamentales. Lorsque les deux notes sont assez différentes, notre système auditif les sépare : nous entendons deux notes. Par contre, si les fréquences sont assez proches, nous percevons les battements. Helmholtz nomme rugosité cette perception de battement, et l'associe à la dissonance : plus un son est rugueux, plus il serait dissonant. Les accords simples consonants, joués par des instruments de l'orchestre classique, produisent effectivement une faible rugosité. L'harmonie n'est toutefois pas réduite à la physiologie de l'audition : elle laisse la place à la liberté et aux goûts des musiciens et des auditeurs.

En musique non tonale, les notions de tension et de consonance ne sont pas définies. Et, de surcroît, la rugosité reste identifiable. Nous avons demandé à une quarantaine d'auditeurs aux connaissances musicales variées de noter la tension musicale et la rugosité pour une séquence de huit accords extraite de la pièce contemporaine *Screamlines* de Joshua Fineberg. Pour l'écriture de cette pièce, le compositeur a substitué aux règles de l'harmonie la notion de timbre : les accords joués ne sont pas imaginés en fonction des notes qui les composent, mais pour l'impression sonore globale qu'ils produisent. Les accords ont été enregistrés par un orchestre de chambre avec une même durée et une même intensité, et homogénéisés en studio.

Un consensus s'est dégagé sur des échelles de tension et de rugosité perçues. Ces deux échelles sont en outre fortement corrélées. Ainsi, les auditeurs ont intuitivement perçu des mouvements de tension et de détente, dont la cause semble être la rugosité. La modélisation informatique de cette dernière, grâce à notre connaissance du système auditif, serait donc un outil précieux pour les compositeurs de sinu d'explorer de façon rationnelle une « harmonie » non conventionnelle.

Daniel PRESSNITZER, IRCAM



Pour ces accords, la tension créée par la musique est fortement corrélée à la rugosité du son, selon le jugement des auditeurs.

## Vecteurs de gènes

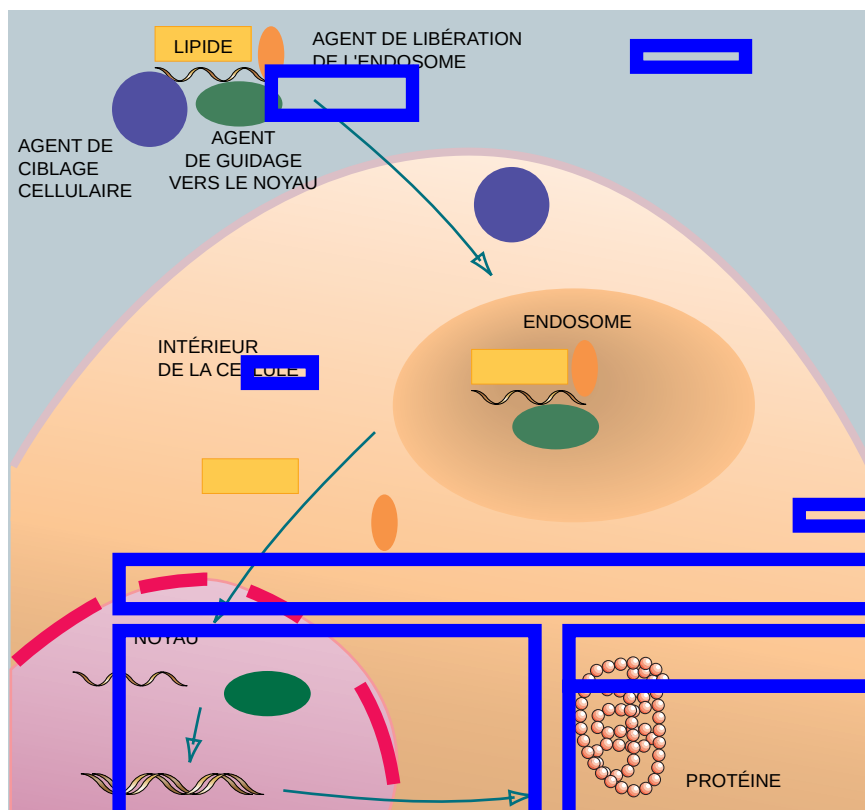
### Des lipides pour transférer des gènes dans les cellules de mammifères

Un gène est déficient dans les cellules d'un organisme, et c'est la maladie. L'administration d'un médicament est la méthode la plus expéditive pour pallier alors les carences de l'organisme. C'est ainsi que l'on traite aujourd'hui le diabète par administration d'insuline. Toutefois, afin de traiter le mal à la

racine, de nombreux laboratoires tentent d'insérer le gène déficient jusque dans le noyau de cellules, à l'aide de virus : ces derniers disposent de molécules qui leur permettent de s'introduire dans les cellules, dont ils utilisent la machinerie biochimique pour faire fabriquer leur propres molécules de protéines. On insère dans ces virus le gène désiré et l'on élimine les gènes dangereux : ces virus modifiés communiquent alors les gènes thérapeutiques en infectant les cellules. Toutefois les virus provoquent des réactions immunitaires et restent parfois toxiques ; en outre, les virus recombinants sont difficiles à produire.

L'autre voie, que nous testons, est celle des vecteurs non viraux, ou « inertes ». On cherche des assemblages de molécules qui compactent l'ADN, masquent ses charges électriques négatives (qui bloquent la traversée de la membrane cellulaire, elle-même chargée négativement) et conduisent l'ADN intrus jusque dans le noyau.

À la fin des années 1980, plusieurs équipes américaines et européennes ont montré que des lipides chargés positivement facilitaient le transfert d'ADN à l'intérieur de cellules cultivées. L'utilisation des nouveaux vecteurs est facile : les



Un vecteur inerte composé de quatre molécules liées à l'ADN permet l'introduction de ce dernier dans le noyau de cellules et la synthèse de protéines codées par l'ADN introduit.

molécules d'ADN, mélangées à des molécules de lipides qui sont positivement chargées, forment spontanément des agrégats, sans doute en raison de l'attraction entre les lipides et les groupes phosphate de l'ADN, chargés négativement. Pour favoriser l'interaction de ces agrégats avec les membranes cellulaires, chargées négativement, on utilise un excès de lipides afin que les complexes lipides-ADN présentent un excès de charges positives.

Nous avons préparé un lipide à base de cholestérol comme partie hydrophobe, parce qu'il s'intègre bien dans les membranes cellulaires, dont il est d'ailleurs un des constituants. Nous l'avons chargé électriquement en lui greffant un groupe guanidinium, car cet atome laisse conserver son atome d'hydrogène, et donc sa charge électrique dans des milieux d'acidité variée : les capacités transfectantes du cholestérol lié au groupe guanidinium devaient ainsi être peu sensibles aux variations d'acidité dans les divers compartiments cellulaires. Le groupe guanidinium se lie aux groupes phosphate de l'ADN.

Le lipide ainsi préparé et nommé BGTC-DOPE peut être utilisé soit directement en solution micellaire dans l'eau (les micelles sont des agrégats sphériques que forment spontanément les molécules de lipides), soit sous la forme de liposomes avec une amine nommée DOPE, par

établissement de doubles couches qui se referment en sphères creuses.

Ces systèmes chimiques inertes ont efficacement transporté le gène de l'enzyme luciférase (qui permet une détection ultérieure des cellules «transfectées») dans une grande variété de cellules de mammifères telles que les cellules PC12, connues pour être difficiles à «transfecter» par les techniques classiques. L'équipe de l'unité INSERM U-568 (Hôpital Robert Debré) a testé nos systèmes sur des cellules épithéliales primaires des voies respiratoires *in vitro* et *in vivo* : des liposomes BGTC-DOPE ont transféré un gène marqueur dans des cultures primaires de cellules respiratoires humaines et dans l'épithélium respiratoire de souris vivantes ; deux jours après l'administration des liposomes par instillation intratrachéale, des cellules possédant le gène marqueur ont été détectées dans l'épithélium de surface et dans les glandes sous-muqueuses de l'épithélium trachéal. La vectorisation pourrait être améliorée, car les complexes lipides-ADN introduits dans les cellules se retrouvent dans des organites nommés endosomes, puis dans les lysosomes, qu'ils doivent quitter sous peine d'être dégradés par les enzymes des cellules. À un certain stade, l'ADN doit aussi se débarrasser des lipides pour accéder au noyau.

Jean-Pierre VIGNERON  
Laboratoire de chimie des interactions moléculaires, Collège de France

## Les feuilles de coca

**Les Boliviens qui mâchent des feuilles de coca sont plus résistants.**

Les autorités politiques boliviennes sont confrontées à un dilemme : pour lutter contre les trafiquants de cocaïne, doit-on interdire toute culture de coca, même celle qui est destinée à la consommation traditionnelle ? Trente pour cent des Boliviens mâchent des feuilles de coca, leur attribuant des vertus thérapeutiques. Les autorités, qui veulent lutter contre les narcotrafiquants sans léser les consommateurs traditionnels, ont voulu savoir s'il s'agit d'une simple habitude culturelle ou si mâcher des feuilles de coca a des conséquences physiologiques réelles. Michaël Sauvain et ses collègues de l'IRSTM et du CNRS, en collaboration avec des biologistes de l'Ins-

tat bolivien de biologie d'altitude (Université de La Paz), ont montré qu'une consommation chronique de feuilles de coca augmente l'endurance.

La Bolivie est divisée en trois zones : une zone réservée à la production de feuilles destinées à la consommation traditionnelle, une zone de production «excédentaire» où la culture, illégale, est commercialisée par les trafiquants et le reste du territoire bolivien où la culture est interdite.

D'après les restes de feuilles de coca que l'on a retrouvés dans les tombes de la côte du Pacifique, il y a plus de 4 000 ans que les habitants de la cordillère des Andes consomment de la coca. Quand les mines d'étain, puis d'argent des hauts plateaux boliviens, situées à plus de 4 000 mètres d'altitude, étaient encore exploitées, les conditions de travail des mineurs étaient particulièrement éprouvantes. Ils consommaient des quantités notables de feuilles de coca, assurant que cela augmentait leur capacité de travail. Aujourd'hui, les Boliviens continuent à en consommer

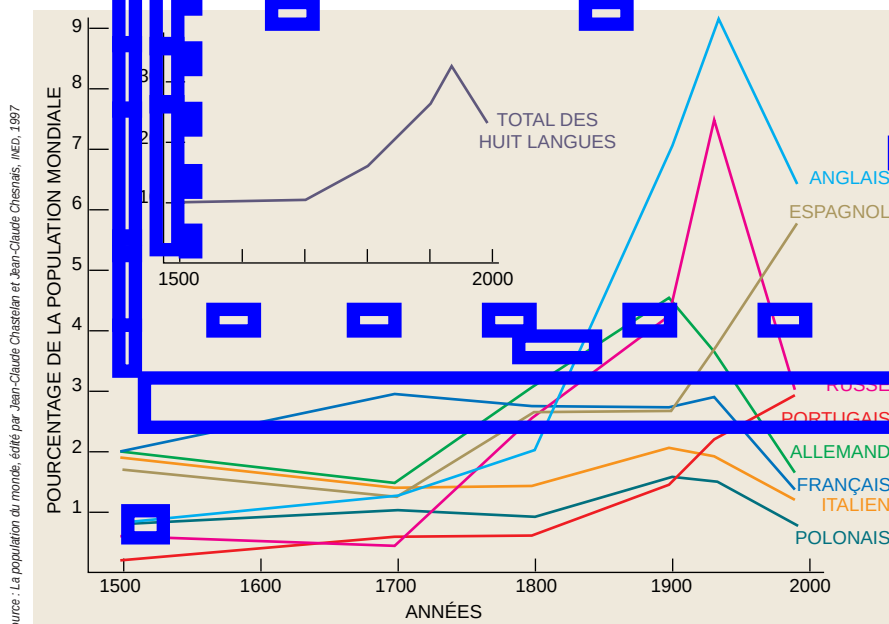
avant les travaux pénibles, les travaux des champs ou dans les mines, par exemple, ou aux grandes occasions de la vie sociale. La consommation commence vers 25 ans, souvent à l'occasion du mariage. Ce sont surtout les hommes qui en consomment.

Pour distinguer les effets psychotropes de la coca des effets physiologiques, M. Sauvain et ses collègues ont mesuré divers paramètres physiologiques chez des mâcheurs traditionnels de feuilles de coca. Ils les ont comparés à ceux des non-mâcheurs vivant dans les mêmes conditions. Ils ont étudié une soixantaine de Boliviens des hauts plateaux, une trentaine de consommateurs réguliers de feuilles et autant de non-consommateurs. Les feuilles de coca mâchées libèrent des alcaloïdes, dont le principal, la cocaïne, est un anesthésiant (orsque l'on mâche ces feuilles, la bouche, anesthésiée, est insensibilisée). Aussi, la consommation de feuilles de coca soulage-t-elle notamment les maux d'estomac. Les alcaloïdes passent dans le sang, absorbés en par-

## Les langues européennes dans le monde

La moitié des douze langues les plus parlées dans le monde sont d'origine européenne. Sauf pour l'espagnol et le portugais, leur part est toutefois en déclin, tendant à disparaître par un usage comme secondes langues de communauté. Jusqu'au 21<sup>e</sup> siècle, la langue maternelle de dix pour cent de la population mondiale figurait parmi huit langues européennes : anglais, espagnol, russe, portugais, allemand, français, italien et polonais). La part mondiale de ces langues

a augmenté progressivement grâce à l'augmentation de la population de leurs pays d'origine et à leurs expansions coloniales. Entre 1700 et 1935, le nombre de leurs locuteurs a été multiplié par dix : en 1935, un habitant de la planète sur sept parlait l'une de ces huit langues. L'anglais, le russe, l'espagnol et le portugais ont le plus progressé. Aujourd'hui, le recul démographique en Europe et en Amérique du Nord s'accompagne d'un recul de ces langues (dont le nombre absolu de locuteurs continue toutefois de croître).



La pratique des huit principales langues européennes a augmenté jusqu'à la moitié du 20<sup>e</sup> siècle, avant de chuter. Seuls l'espagnol et le portugais continuent de progresser.

Sur les 300 langues parlées dans le monde, douze seulement suffisent pour communiquer avec la moitié des hommes. Elles se répartissent en quatre groupes de tailles décroissantes. Le chinois (mandarin) vient en tête, avec 800 millions de locuteurs. Il est suivi de l'anglais, de l'hindi-ourdou et de l'espagnol avec 300 à 350 millions de locuteurs chacun, puis du bengali, du russe, du portugais, de l'arabe et du japonais, avec 125 à 170 millions de locuteurs. Un dernier groupe de langues, comptant 50 à 100 millions de locuteurs,

est formé de l'allemand, du français, de l'italien, de l'ukrainien et de l'indonésien-malais. L'indonésien-malais compte 170 millions de locuteurs, la langue de communication modifie légèrement ce classement : le français passe ainsi de 75 à 135 millions de locuteurs, et l'indonésien-malais de 50 à 190 millions.

RAPHO-M. BERTHETTI



Marchande de feuilles de coca sur un marché de Bolivie.

tie par les gencives et en partie par le tube digestif. La concentration en cocaïne est très inférieure à la concentration obtenue par inhalation ou par injection.

Une faible concentration chronique de cocaïne dans le sang a-t-elle des conséquences physiologiques ? Des études menées il y a une trentaine d'années semblaient montrer que la feuille de coca était un agent coupe-faim. La nouvelle étude a montré qu'il n'en est rien : les personnes étudiées, qu'elles mâchent ou non des feuilles de coca, ont des tailles et des poids comparables. Aucune n'est dénutrie.

Les personnes qui participaient à l'étude devaient pédaler sur une bicyclette de laboratoire. Les consommateurs de coca mâchaient des feuilles environ une heure avant le début de l'expérience, pour que l'effet soit maximal. Les biologistes ont mesuré la consommation d'oxygène, le rythme cardiaque, la concentration en oxygène dissous dans le sang, la concentration en adrénaline et en noradrénaline, en glucose, en insuline, en glucagon (qui dégrade l'insuline) et en acides gras libres

produits pendant l'effort. La consommation d'oxygène était enregistrée soit pendant l'effort maximal (on demande au participant de pédaler aussi vite qu'il le peut), soit pendant un effort prolongé, moins intense pour évaluer l'endurance du sujet.

Chez les consommateurs réguliers de feuilles de coca, la consommation d'oxygène est plus faible (elle augmente surtout moins vite) durant un effort prolongé que chez les non-consommateurs. Par ailleurs, les dosages du glucose ont montré que son métabolisme est optimisé : sa concentration dans le sang est constante, tandis qu'elle varie chez les non-consommateurs (elle baisse après les repas).

En raison de l'usage traditionnel des feuilles de coca, l'Organisation des Nations unies autorisait une culture légale de feuilles de coca jusqu'à ces dernières années. L'étude de l'Instituto de la Universidad de La Paz a montré que cette consommation améliore l'endurance. L'avenir de la culture de la feuille de coca pour un usage traditionnel dans les pays andins dépendra en partie de ces nouvelles données.

## Chant meurtrier

**Une pie-grièche attire ses proies en imitant leur chant.**

Les marins antiques, séduits par le chant magique des sirènes, allaient à leur navire vers leur île ; ils n'apercevaient que trop tard les récifs sur lesquels ils s'échouaient, et périssaient noyés. De la même façon, plusieurs petits passereaux, attirés par le chant de la pie-grièche grise, qui imite leurs, y laissent la vie.

La pie-grièche grise (*Lanius excubitor*) est un oiseau carnivore, au bec crochu comme celui d'un rapace. En hiver, une part importante de son alimentation est constituée de passereaux plus petits : bruants, chardonnerets, tarins, roselins ou étourneaux. À cette période de l'an-

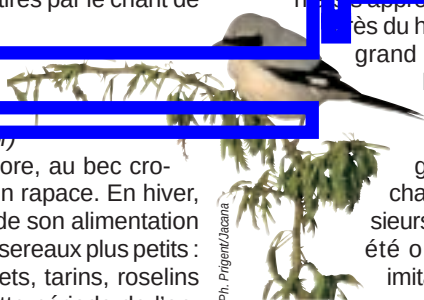
née, le chant de la pie-grièche est varié et mimétique : mâle et femelle, qui chantent tous les deux, imitent des portions de chant, les cris d'alarme et de demande alimentaire de leurs proies.

Eric Atkinson, de l'Université de l'Idaho, a diffusé ces imitations en milieu naturel à l'aide d'un haut-parleur, ainsi que le chant d'un merle, et un bruit « blanc » (analogue au bruit de fond du haut-parleur). Il a ainsi montré que seuls les cris de la pie attirent les petits passereaux. Ces derniers s'approchent de vite et plus

près du haut-parleur, et plus grand nombre, que lorsque

les autres sons sont émis. Cette tromperie de la pie-grièche augmente ses chances de capture : plusieurs attaques réussies ont été observées après des imitations.

Catherine PERRIN



Ph. Prigent/Jacana

## Défense du territoire

**Nous dépendons notre espace, même sur les parkings.**

L'automobile intéresse les anthropologues : elle révèle la vraie nature de l'homme. Un individu bien élevé place au volant d'une automobile se transforme en défenseur acharné de son territoire. D'Artagnan provoquait en duel en se défiant son adversaire. Aujourd'hui, il suffit de se rabattre devant une autre voiture sur l'autoroute pour défier et déclencher un engouffrement automobile. Même à l'arrêt sur un parking de supermarché, haut lieu d'interactions sociales en cette fin de XX<sup>e</sup> siècle, nous exprimons nos instincts territoriaux, quand bien même l'espace que nous occupons n'a guère de valeur.

Selon Barry Ruback, de l'Université de Pennsylvanie, une place de parking est un territoire du troisième type : nous ne le pos-



session, que temporairement, le temps de réaliser une activité prédatrice, après laquelle son occupation est inutile. Les territoires du premier type sont les lieux essentiels à notre vie, tels notre logement ou notre bureau. Les territoires du second type sont ceux que nous occupons régulièrement, tels une table d'hôtel au restaurant : quand nous y sommes, personne ne vient nous la disputer.

À quelle vitesse le détenteur d'une place de parking abandonne-t-il son droit temporaire de propriété après qu'il a fait

ses achats ? La défense de ce territoire est contre-productive : le prédateur n'a, en principe, rien de plus pressé que d'abandonner le lieu de sa chasse et de se porter ses proies chez lui. Pourtant, alors que nous mettons 32 secondes en moyenne pour quitter une place, nous ajoutons sept secondes lorsqu'un autre véhicule attend pour s'y installer.

Une partie de cette majoration proviendrait de l'anxiété, qui diminue, nous le savons, les performances dans des tâches où nous devons insérer des objets dans des espaces étroits ou les enlever. Toutefois, une réaction de défense intervient aussi. Elle est clairement révélée par une autre mesure : nous occupons la place deux secondes de plus lorsque le conducteur qui attend de nous remplacer actionne son avertisseur sonore. Toute tentative d'empiètement sur notre territoire provoque une réaction négative.

La civilisation ne supprime pas nos réactions primitives : elle les transforme. Alors, tournons sept fois la main autour de l'avertisseur pendant 12 secondes avant de klaxonner.

## Oscillations du Pacifique

**Les mécanismes du phénomène El Niño.**

Voulez-vous jouer en bourse sur les valeurs des données climatiques ? Alors scrutez les rapports des météorologues qui analysent les courants dans le Pacifique. Dans cette partie du monde, le phénomène nommé El Niño perturbe le climat mondial jusqu'au cœur de l'Afrique : on vient de démontrer que les récoltes de maïs au Zimbabwe sont réduites après les épisodes El Niño les plus marqués.

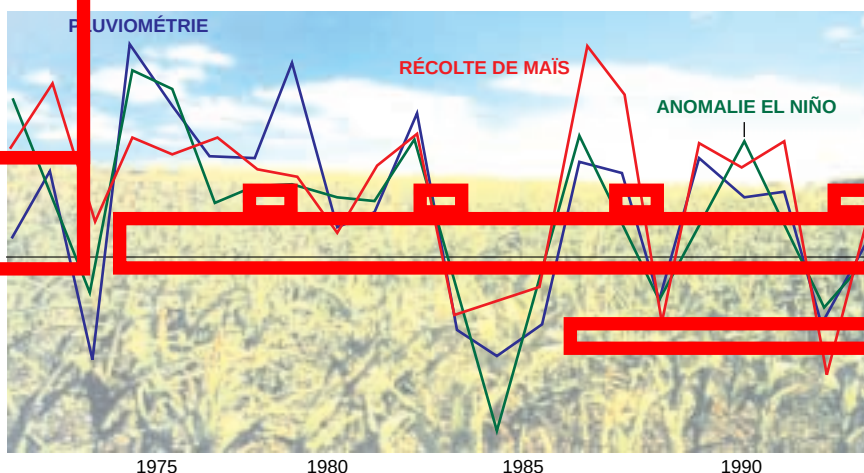
Tous les trois à quatre ans, des pluies diluviennes s'abattent sur les côtes habituellement désertiques du Pérou et de l'Équateur, les glaciers arctiques fondent, l'Afrique du Sud et l'Australie souffrent de sécheresse, les tempêtes font rage sur la côte Ouest des États-Unis, de la Polynésie... Comment se déclenchent ces anomalies climatiques récurrentes ? Le mécanisme responsable du phénomène semble être une instabilité des échanges entre l'atmosphère et l'océan, dans le Pacifique central.

On comprenait mal les causes de l'alternance entre des phases de réchauffement, les «épisodes El Niño», et des phases de refroidissement, nommés «épi-

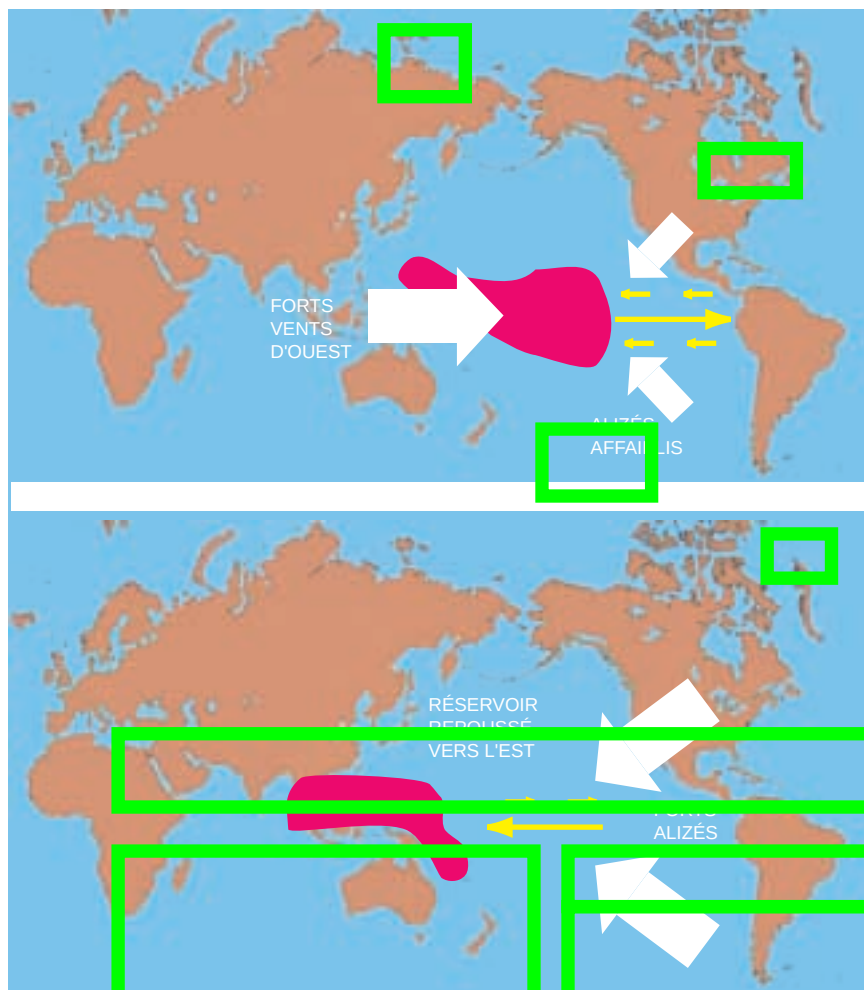
sodes La Niña». On savait que les variations thermiques s'accompagnent d'une oscillation des pressions atmosphériques, entre la Polynésie française et le Nord de l'Australie, ce qui modifie le régime des vents et des courants, le long de l'équateur, mais pourquoi l'immense masse d'eaux chaudes (à une température supérieure à 28,5°C) du Pacifique Ouest du Pacifique équatorial se déplaçait-elle ?

À partir d'observations du satellite franco-américain *Topex Poseidon* et de mesures atmosphériques et océanographiques effectuées par quelque 70 mouillages répartis dans le Pacifique, Joël Picaut, Yves du Penhoat, Thierry Del-

croix et François Masia, de l'ORSTOM, ont montré que les épisodes El Niño ont lieu quand le bord Ouest du réservoir d'eau chaude se déplace vers l'Est, à la faveur d'un accroissement des vents d'Ouest, dans le Pacifique Ouest, et de l'affaiblissement des alizés dans le Pacifique central. Les phénomènes s'amplifient mutuellement : l'affaiblissement des alizés résulte lui-même du déplacement du réservoir d'eau chaude, parce qu'ainsi la zone principale de convection se décale dans l'atmosphère (l'air chaud monte par convection au-dessus des eaux chaudes), ce qui amplifie les anomalies de vent et les anomalies de courant.



L'intensité du phénomène El Niño (par rapport à la moyenne, en vert) perturbe les précipitations au Zimbabwe (en bleu) ainsi que la production du maïs (en rouge).



Les deux temps forts d'un cycle El Niño : le déplacement d'eaux chaudes vers l'Est bloque la remontée d'eau froide, près du Pérou (*en haut*) ; puis les courants engendrés par ce déplacement rebondissent contre l'Amérique et repoussent les eaux chaudes vers l'Ouest.

Comment l'océan et l'atmosphère sont-ils couplés ? Les vents d'Ouest engendrent des ondes équatoriales qui se propagent vers l'Est à une vitesse de 250 kilomètres par jour : ce sont des ondes d'énergie, comme les vagues ou comme des vibrations à la surface d'un tambour, mais la rotation de la Terre les confine près de l'équateur. Ces ondes ne se déplacent ainsi que dans la direction Ouest-Est ; elles ont une longueur d'onde de plusieurs milliers de kilomètres, et s'accompagnent de courants dans les couches de surface.

Arrivées aux abords des côtes d'Amérique latine, les ondes équatoriales et leurs courants associés bloquent la remontée d'eaux froides profondes, qui refroidissent habituellement cette région : le bassin de l'Est du Pacifique se réchauffe, c'est l'épisode El Niño. Toutefois les ondes équatoriales se réfléchissent sur les côtes, et, avec les courants qui les accompagnent, elles repartent vers le front du réservoir chaud. Elles le repoussent vers l'Ouest, de sorte que les eaux froides remontent à l'Est du bassin Pacifique : c'est la Niña. Puis, quand

cette dernière a recréé les conditions de vent initiales, le phénomène reprend.

Cette description est au cœur d'un programme informatique qui calcule les courants et détermine l'anomalie de vent associée : le résultat est une alternance périodique qui décrit bien le phénomène. Pourquoi, cependant, tous les événements El Niño ne sont-ils pas identiques ? Le programme ne reproduit que des épisodes identiques car il est volontairement simplifié, mais la prise en compte d'autres phénomènes importants, tels les mouvements verticaux dans l'océan ou les interactions du Pacifique et d'autres régions du Globe, devrait améliorer la théorie. Ces résultats fondamentaux devraient intéresser l'industrie. Michael Wilson a démontré que la consommation de combustibles fossiles dans les installations de chauffage domestique, en Amérique, est réduite quand les épisodes El Niño sont intenses. Comme ces derniers réduisent le nombre d'ouragans dans le golfe du Mexique, la production de gaz naturel est facilitée, de sorte qu'une surproduction menace doublement les sociétés pétrolières.

# Des lasers pour déclencher la foudre

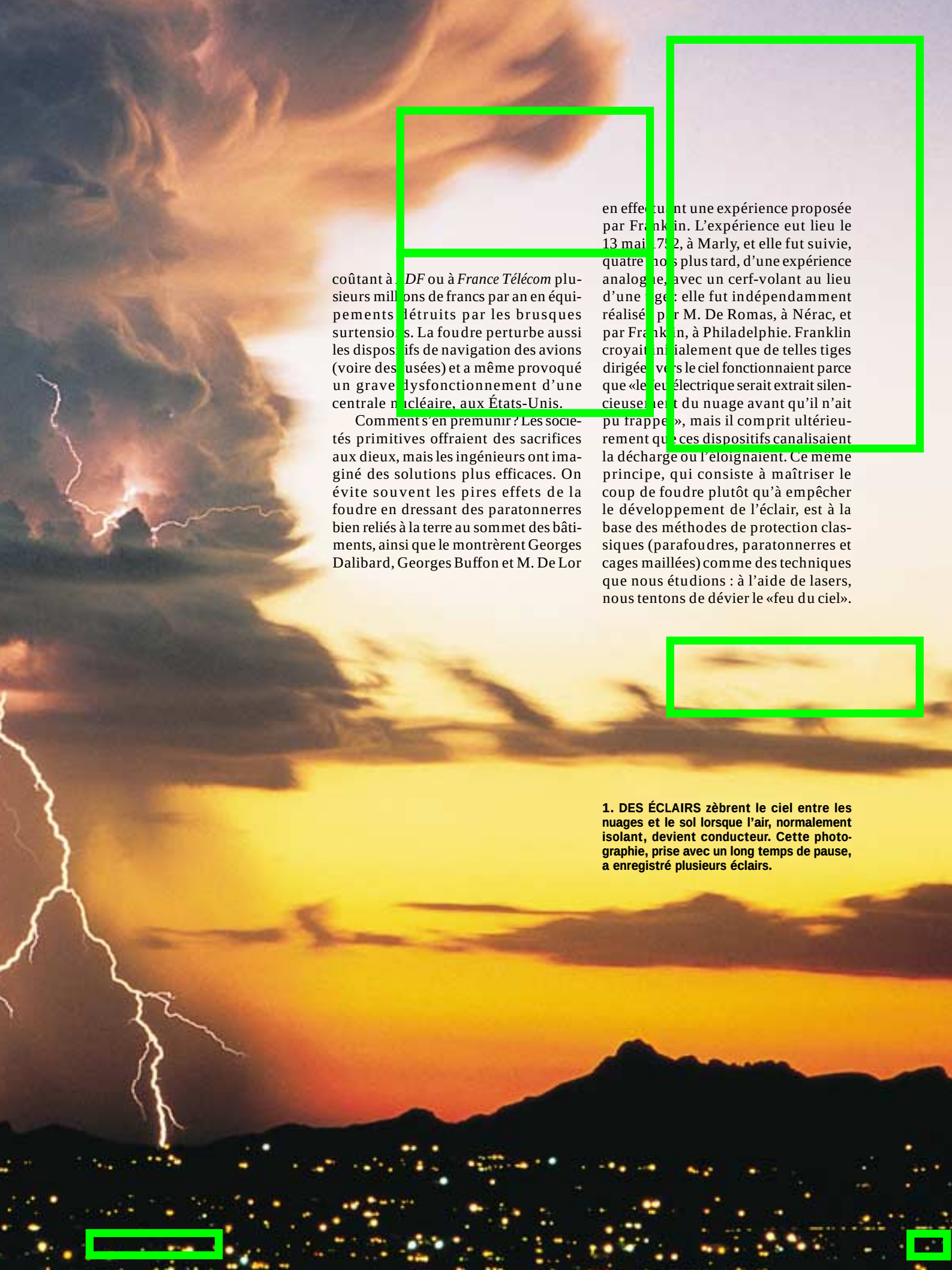
JEAN-CLAUDE DIELS • RALPH BERNSTEIN • KARL STAHLKOPF • XIN MIAO ZHAO

*Afin de protéger les équipements industriels, on cherche à dévier les éclairs dangereux à l'aide de lasers.*

**M**algré plusieurs siècles d'études expérimentales, la foudre demeure un phénomène mystérieux. Depuis Benjamin Franklin, les physiciens savent que des charges électriques peuvent s'accumuler lentement dans les nuages et créer ensuite des éclairs, quand l'énergie emmagasinée est soudainement libérée. Toutefois les

mécanismes exacts du phénomène leur ont échappé longtemps. Quelle est la vitesse de formation des éclairs? Comment se détermine leur trajectoire? Que deviennent les charges électriques dans le sol? L'étude de ces questions laisse entrevoir des moyens pour éviter que la foudre ne frappe des équipements importants.

La foudre est un phénomène naturel aux effets destructeurs : chaque année, en France, elle frappe en moyenne un million de fois, tue des dizaines de personnes et provoque des dégâts matériels considérables, parmi lesquels des incendies de forêts. Elle est responsable d'environ la moitié des coupures de courant dans les régions sujettes aux orages,



coûtant à EDF ou à France Télécom plusieurs millions de francs par an en équipements détruits par les brusques surtensions. La foudre perturbe aussi les dispositifs de navigation des avions (voire des usées) et a même provoqué un grave dysfonctionnement d'une centrale nucléaire, aux États-Unis.

Comment s'en prémunir ? Les sociétés primitives offraient des sacrifices aux dieux, mais les ingénieurs ont imaginé des solutions plus efficaces. On évite souvent les pires effets de la foudre en dressant des paratonnerres bien reliés à la terre au sommet des bâtiments, ainsi que le montrèrent Georges Dalibard, Georges Buffon et M. De Lor

en effectuant une expérience proposée par Franklin. L'expérience eut lieu le 13 mai 1752, à Marly, et elle fut suivie, quatre ans plus tard, d'une expérience analogue, avec un cerf-volant au lieu d'une tige : elle fut indépendamment réalisée par M. De Romas, à Nérac, et par Franklin, à Philadelphie. Franklin croyait initialement que de telles tiges dirigées vers le ciel fonctionnaient parce que «le feu électrique serait extrait silencieusement du nuage avant qu'il n'ait pu frapper», mais il comprit ultérieurement que ces dispositifs canalisaient la décharge ou l'éloignaient. Ce même principe, qui consiste à maîtriser le coup de foudre plutôt qu'à empêcher le développement de l'éclair, est à la base des méthodes de protection classiques (parafoudres, paratonnerres et cages maillées) comme des techniques que nous étudions : à l'aide de lasers, nous tentons de dévier le «feu du ciel».

**1. DES ÉCLAIRS zèbrent le ciel entre les nuages et le sol lorsque l'air, normalement isolant, devient conducteur. Cette photographie, prise avec un long temps de pause, a enregistré plusieurs éclairs.**

## Les éclairs cernés

Vers la fin des années 1970, des physiciens de l'Université d'Albany ont constitué un petit réseau d'antennes directionnelles afin de suivre les éclairs entre les nuages et le sol sur une petite superficie de l'État de New York. Ce réseau de détecteurs s'est

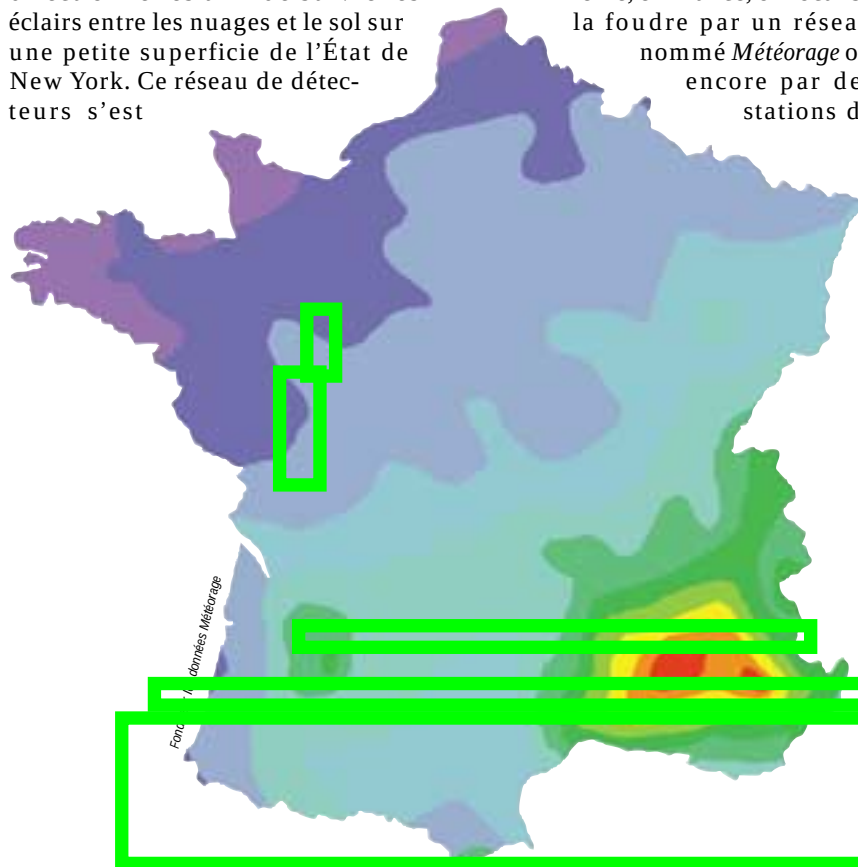
progressivement étendu à d'autres États, au cours des années 1980, de sorte qu'en 1991 ce groupe d'antennes pouvait détecter la chute de la foudre n'importe où aux États-Unis. De même, en France, on localise la foudre par un réseau nommé *Météorage* ou encore par des stations de

type S-FEL, qui captent les ondes de très haute fréquence.

Ces réseaux se composent de stations (105 aux États-Unis, 17 en France) qui observent la foudre en mesurant les temps et direction exacts des impulsions électromagnétiques engendrés par les décharges. Les stations transmettent leurs mesures à un satellite, qui les renvoie vers un centre de contrôle, où des ordinateurs traitent l'information et préparent des synthèses qui sont ensuite diffusées à des centaines d'abonnés : compagnies de distribution d'électricité, compagnies aériennes, armée de l'air... Certaines compagnies de distribution de l'électricité utilisent l'information qui leur est fournie pour renforcer les couloirs de ligne d'énergie électrique susceptibles d'être perturbés par la foudre, d'autres pour réparer plus rapidement les installations. Toutefois les gestionnaires de réseau électrique ne peuvent pas encore prévenir les dégâts aux lignes à haute tension, aux pylônes ou aux autres structures vulnérables.

Deux d'entre nous (R. Bernstein et K. Stalzkopf) et des collègues de l'Institut de recherche sur la production d'électricité ont poussé la Société *Power Technologies* à construire une installation spéciale, en vue de tester la résistance de diverses structures souterraines ou de surface. Plutôt que d'attendre la chute aléatoire de la foudre, les ingénieurs du centre peuvent provoquer des décharges en lançant de petites fusées qui déroulent un mince fil relié à la terre.

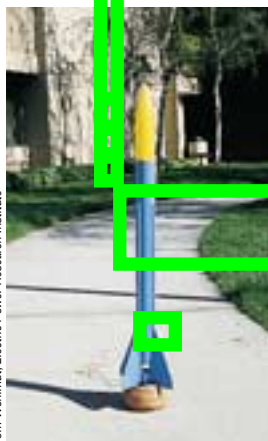
Contrairement à ces coups de foudre déclenchés, les éclairs naturels commencent par un précurseur



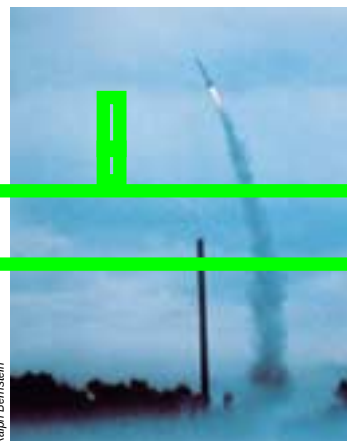
NOMBRE D'ÉCLAIRS PAR KILOMÈTRE CARRÉ ET PAR AN



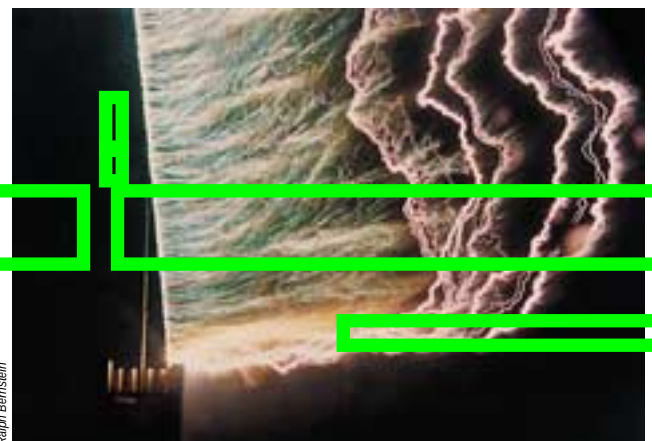
**2. LE RÉSEAU FRANÇAIS DE DÉTECTION DE LA FOUDRE MÉTÉORAGE** recense les coups de foudre pour l'ensemble de la France. En mesurant l'instant et la direction des impulsions électromagnétiques produites par la foudre, ce réseau de capteurs localise les éclairs et détermine automatiquement leurs caractéristiques (pour connaître la densité de foudroiement sur l'une des 36 000 communes de France, vous pouvez utiliser le Minitel, au 3617 MÉTÉORAGE).



Tom Wahlund, Electric Power Research Institute



Ralph Bernstein



Ralph Bernstein

**3. DES FUSÉES** déclenchent des éclairs. Le petit missile de gauche porte à sa base une bobine de fil de cuivre très fin qui se déroule au cours du vol (au centre). Une première décharge suit alors préfé-

rentiellement le fil conducteur et crée un canal conducteur d'air ionisé ; les décharges suivantes ont des trajectoires plus complexes, parce que le vent déforme le canal conducteur (à droite).

à peine visible, qui se propage du nuage vers le sol par paliers, arrachant en chemin des électrons aux molécules de l'atmosphère et créant un canal d'air ionisé qui sert de conducteur. Dès que le précurseur a atteint le sol, une phase «d'arc en retour» brillante et énergétique jaillit. Cette dernière, qui transporte des courants d'intensité comprise entre 5 000 et 300 000 ampères (les conducteurs domestiques ne supportent guère plus de 60 ampères), est alimentée par la différence de potentiel considérable (plusieurs centaines de millions de volts) qui s'est préalablement établie entre le sol et les nuages ; sur son passage, elle détruit tout ce qui est isolant ou tous les conducteurs trop fins.

## Éviter les catastrophes

Les faisceaux lasers devraient bientôt servir de paratonnerres perfectionnés pour détourner la foudre des régions où elle pourrait causer de



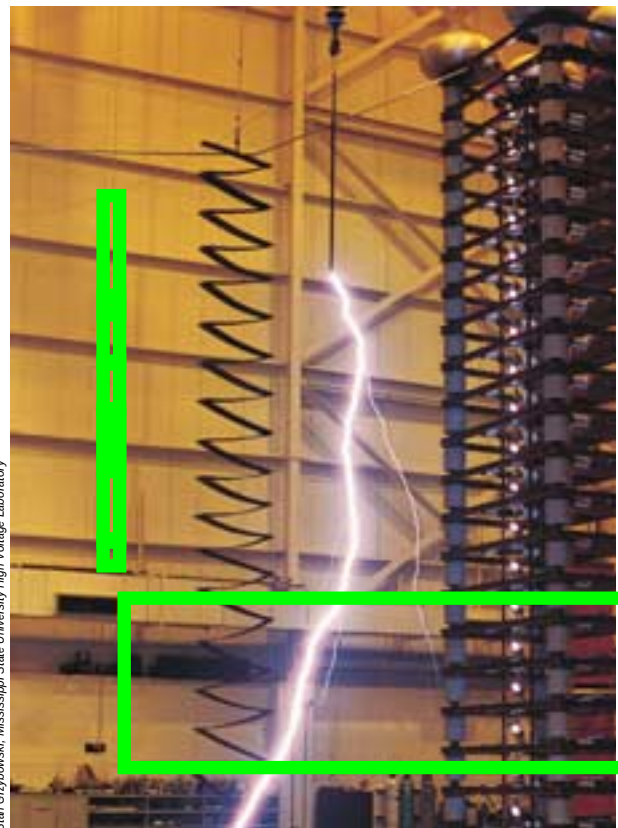
Tom Wohlmuth, Electric Power Research Institute

**4. DES «FULGURITES» sont produites quand la foudre fait fondre le sol en s'y enfonçant. Cette photographie montre comment la foudre a atteint un câble électrique souterrain qui semblait pourtant à l'abri, à un mètre de profondeur, dans le sol.**

graves dégâts. Il y a quelques décennies, des ingénieurs avaient supposé que l'on pourrait déclencher des éclairs en utilisant l'énergie des lasers pour ioniser l'air et créer des canaux conducteurs, mais leurs expériences échouèrent, parce que leurs lasers ionisaient tant l'air qu'il devenait opaque aux faisceaux, et bloquait leur propagation.

Deux équipes japonaises ont récemment tenté d'éviter cet effet en utilisant des lasers infrarouges : au lieu de créer un tunnel continu de particules ionisées, les physiciens ont mis au point une méthode pour focaliser un ou plusieurs faisceaux laser en un chapelet de points où se créent des bulles de plasma. Au cours de tests, en laboratoire, ils ont déclenché une décharge de plus de sept mètres de long (mais avec des champs électriques considérables, qui mettaient l'air à la limite du claquement spontané).

Deux d'entre nous (J.-C. Diels et M. Zhao) ont plutôt utilisé le rayonnement ultraviolet émis par un laser



Stan Gryzbowski, Mississippi State University High Voltage Laboratory



**5. UNE DÉCHARGE ÉLECTRIQUE (en haut à gauche) se produit dès que deux faisceaux laser ont ionisé l'air, entre deux électrodes. Le système laser des auteurs (en bas à gauche) est trop encombrant pour être déplacé jusqu'aux installations de haute tension de l'Université du Mississippi (ci-dessus), mais un nouveau laser mobile devrait provoquer des décharges artificielles plus longues.**

de relativement faible puissance. De tels faisceaux ionisent peu les molécules d'air sur leur passage, mais les quelques électrons arrachés par les ultraviolets se combinent rapidement aux molécules neutres d'oxygène voisines, formant des ions oxygène négatifs (qui réduisent la conductibilité électrique) ainsi se crée une longue colonne ionisée, qui agit comme un paratonnerre. A son sommet, le champ

électrique est si intense que les décharges électriques qui se déclenchent accroissent le canal d'air devenu conducteur.

Nous avons également découvert qu'un second laser émettant de la lumière visible réduit la formation d'ions oxygène libre quand il est focalisé sur le laser ultraviolet : les photons du faisceau de lumière visible sont suffisamment énergiques pour expul-

ser les électrons des ions négatifs. Le laser ultraviolet que nous avons testé, de faible puissance, ionise remarquablement bien l'air, car il émet des impulsions lasers très courtes (moins d'un trillionième de seconde) : la lumière laser peut atteindre une intensité de crête élevée, alors que la puissance moyenne consommée par l'appareil est relativement faible. De surcroît, les impulsions laser se com-

## Apprivoiser le point d'impact de la foudre

Depuis l'époque de Benjamin Franklin, de Dalibard, de l'abbé Nollet et d'autres, il est bien connu que les objets pointus et élevés attirent la foudre. Mais comment quantifier le pouvoir d'attraction d'un paratonnerre ou d'une structure comme un clocher d'église ou comme la tour Eiffel ?

On sait que le processus de foudroisement met en jeu deux phases principales : la phase «précurseur» est celle où la foudre choisit sa victime. La phase de l'«arc en retour» de la foudre est caractérisée par ses effets : thermiques, électromagnétiques, sonores et lumineux. Dans le domaine de la protection des êtres vivants et des structures contre les effets de la foudre, la première phase «précurseur» est essentielle, car elle détermine le point de connexion de la foudre, et qui subira l'impact.

Jusqu'à présent, la détermination du pouvoir de captation de la foudre par une structure était fondée sur des modèles tirés principalement de l'observation expérimentale. Quelques considérations physiques permettaient en outre de mieux comprendre les observations, mais ne donnaient pas de vision cohérente des phénomènes. Ces modèles, dit semi-empiriques, se traduisaient par une relation simple entre la distance  $d$  d'attraction de la foudre par une structure, et l'intensité  $I$  du courant de l'arc en retour ( $d = 10 I^{2/3}$ ). Ce «modèle électrogéométrique» est, encore aujourd'hui, à la base de tous les calculs de protection.

Les progrès réalisés conjointement par l'Université de Padoue et par l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) ont permis, ces dernières années, de décrire physiquement les différentes phases d'une décharge électrique, aussi bien lorsque les charges électriques mises en jeu dans cette décharge sont négatives que lorsqu'elles sont positives. Cette description est fondée sur une analyse pas à pas, depuis l'ionisation initiale jusqu'à la phase d'arc, ou saut final, qui conduit à la rupture diélectrique de l'air. Outre les caractéristiques du milieu où se propage la décharge, le paramètre fondamental est le champ électrique de la structure, pour laquelle est réalisée la simulation, et son évolution temporelle. Ce champ électrique, qui décrit la force électrique exercée sur la structure, doit être calculé en tous points ; c'est lui qui détermine l'existence et l'évolution du précurseur. Les calculs, fondés sur la résolution des équations

de Maxwell, sont aujourd'hui réalisés par des programmes d'ordinateur.

Ces modélisations indépendantes de toute donnée expérimentale, permettent de caractériser complètement la décharge électrique, par exemple sa vitesse de propagation, la quantité de charges drainées ou encore l'intensité du précurseur.

Ces travaux ont été adaptés, dans le cadre d'une collaboration avec *Électricité de France*, aux grandes décharges de plusieurs mètres de longueur, puis à la foudre naturelle. Il fallait valider ces modèles pour des structures soumises à des contraintes réelles.

La première expérimentation a été réalisée dans le gigantesque laboratoire d'essais à haute tension des Renardières : haut de 45 mètres sous plafond, large de 65 mètres, il pourrait contenir quatre Arcs de Triomphe. La simulation a été réalisée sur des maquettes au dixième qui représentaient un avion en vol. On a ainsi observé que l'avion paraissait activement à son foudroisement et que les équations physiques régissant la décharge et calculées par modélisation correspondaient aux grandeurs physiques mesurées expérimentalement (courant, charges, champs électriques, phénomènes lumineux).

Cependant, comme les décharges en laboratoire risquaient de différer de la foudre naturelle, nous avons procédé à une deuxième expérimentation, où nous déclenchions un coup de foudre naturel : une fusée, semblable à une fusée para-grêle, mais raccordée au sol par un fil partiellement isolant et partiellement conducteur, a été propulsée en altitude vers un nuage orageux. Pour le coup de foudre déclenché, quasi identique aux éclairs naturels, nous avons mesuré les caractéristiques de la phase précurseur : elles correspondaient aux données de la modélisation adaptée aux conditions d'éclair naturel (essai EDF-ONERA-CEA).

Les résultats obtenus ne remettent pas en cause le classique modèle électrogéométrique, mais en fixent les conditions de validité et d'utilisation. Des caractéristiques de l'air, avant la décharge, telles l'humidité locale ou l'altitude du lieu, peuvent être prises en compte. On sait désormais calculer, sur des structures simples (paratonnerres, lignes aériennes), si les conditions d'impact par la foudre sont réunies. L'extension de ces outils à des structures complexes n'est plus... qu'une question de capacité de calcul.

André BONAMY,  
Laboratoires de génie électrique, EDF



**6. LES INGÉNIEURS TESTENT DES LASERS** pour déclencher la foudre. On pensait que des lasers infrarouges pourraient produire des canaux conducteurs dans l'atmosphère, mais les faisceaux ionisent tout l'air devant eux, que celui-ci devient opaque aux faisceaux et bloque leur propagation (a). Des physiciens japonais expérimentent des faisceaux multiples focalisés par une

série de miroirs pour former un cône de poches ionisées qui devraient canaliser la foudre (b). Enfin les auteurs utilisent un laser ultraviolet couplé à un laser visible afin de former un canal ionisé rectiligne que la foudre pourra suivre (c). Des tiges mises à la terre intercaleront l'éclair résultant, protégeant le miroir et l'équipement laser.

priment au cours de leur propagation dans l'atmosphère : la concentration de l'énergie, dans ces impulsions, compense les pertes par diffusion ou par absorption, au cours de la propagation.

Nous n'avons pas encore déclenché d'éclair en plein air, mais l'accord entre les calculs théoriques, les simulations numériques et les expériences de laboratoire à petite échelle nous laisse espérer un succès proche. Nous avons, par exemple, réussi à produire un canal conducteur entre deux électrodes chargées, distantes de 25 centimètres, au moyen de brèves impulsions ultraviolettes : une décharge électrique se produit lorsque la différence de potentiel entre les électrodes est deux fois inférieure à la tension de claquage de l'air normal.

Avec Patrick Rambo, de l'Université du Nouveau-Mexique, nous avons récemment construit un laser ultraviolet 100 fois plus puissant que tous ceux que nous avons testés jusqu'ici. Cet appareil est trop fragile et encombrant pour être transporté jusque dans le centre de

test, mais nous achevons la construction d'un laser ultraviolet portable, qui, couplé à un laser émettant de la lumière visible, devrait produire des décharges longues de plusieurs mètres, en laboratoire. Déclenchera-t-on bientôt le feu du ciel avec celui de la terre ?

Jean-Claude DIELS est professeur d'astronomie à l'Université du Nouveau-Mexique. Ralph BERNSTEIN est chef de projet à l'Institut de recherches sur l'énergie électrique. Karl STAHLKOPF est vice-président de cet institut. Xin Miao ZHAO travaille aux Laboratoires de Los Alamos.

Martin A. UMAN, *All about Lightning*, Dover Publications, 1986.

Xin Miao ZHAO et J.-C. DIELS, *How Lasers Might Control Lightning Strikes*, in *Laser Focus World*, vol. 29, n° 11,

pp. 113-116, novembre 1993.

Xin Miao ZHAO, Jean-Claude DIELS, Ralph BERNSTEIN, *How Lasers Might Control Lightning Strikes*, in *Laser Focus World*, vol. 29, n° 11,

*Femtosecond Ultraviolet Laser Pulse Induced Lightning Discharges in Gases*, in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 31, n° 3, pp. 599-612, mars 1995.

R. BERNSTEIN, R. SAMM, K. CUMMINS, R. PYLE et J. TUEL, *Lightning Detection Network Averts Damage and Speeds Restoration*, in *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 9, n° 2, pp. 12-17, avril 1996.

# La foudre au-dessus des nuages

STEPHEN MENDE • DAVIS SENTMAN • EUGENE WESCOTT

*Les physiciens observent une curieuse activité électrique au-dessus des nuages, par temps d'orage.*

La foudre a toujours intimidé et fasciné. Les Grecs, par exemple, attribuaient la maîtrise de la foudre à Zeus, le roi des dieux. Encore aujourd'hui, on la redoute, parce qu'on ne la maîtrise pas... et qu'on la connaît mal. Ainsi, de nombreuses personnes avaient décrit des scintillations bizarres du ciel nocturne : certaines semblaient être des aurores ou des nuages étrangement illuminés, mais d'autres étaient plus mystérieuses ; notamment, des pilotes d'avion avaient observé des éclairs au-dessus des orages. La communauté scientifique méprisait ces comptes rendus jusqu'en 1990, quand John Winckler et ses collègues de l'Université du Minnesota commencèrent à étudier ces énigmatiques phénomènes à l'aide d'une caméra vidéo : les images révélaient des éclairs d'un type nouveau.

Comment expliquer ces phénomènes électriques de haute altitude ?

Des centaines d'observations, à partir de la navette spatiale, d'avions et du sol ont montré que les effets électriques analogues aux éclairs ne sont pas confinés aux couches de l'atmosphère comprises entre les nuages et le sol : des décharges électriques se produisent régulièrement dans l'air raréfié jusqu'à 90 kilomètres au-dessus des nuages orageux.

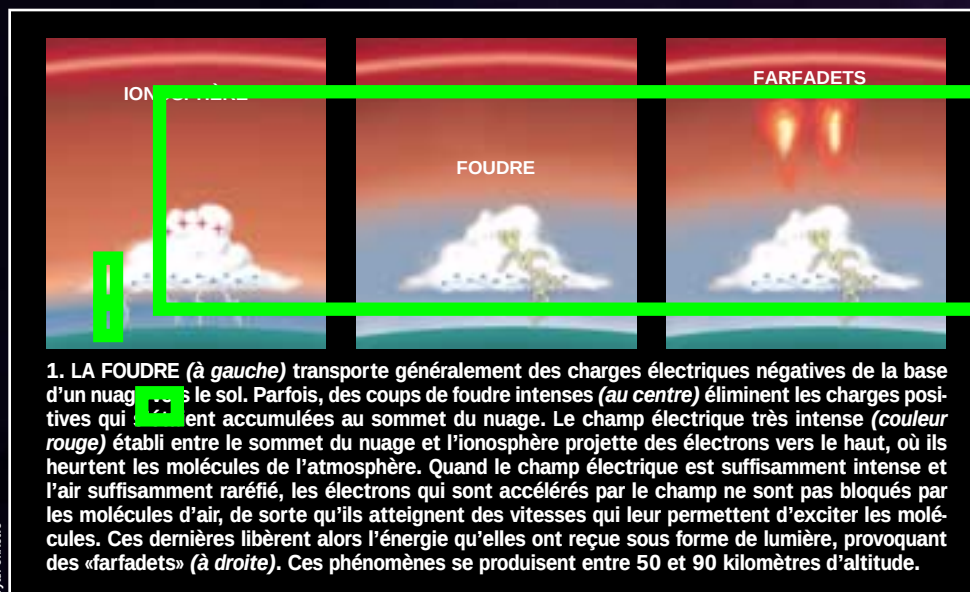
Pourquoi ces phénomènes, souvent visibles à l'œil nu, n'ont-ils pas été découverts plus tôt ? Et pourquoi devaient-ils s'étonner de l'existence d'une forme de foudre très haut dans l'atmosphère ? Les spécialistes de l'atmosphère savent depuis longtemps que, bien au-delà des régions turbulentes de l'atmosphère, les ultraviolets solaires heurtent les molécules de gaz et libèrent quelques électrons : ainsi se crée l'ionosphère, une couche électriquement conductrice autour de

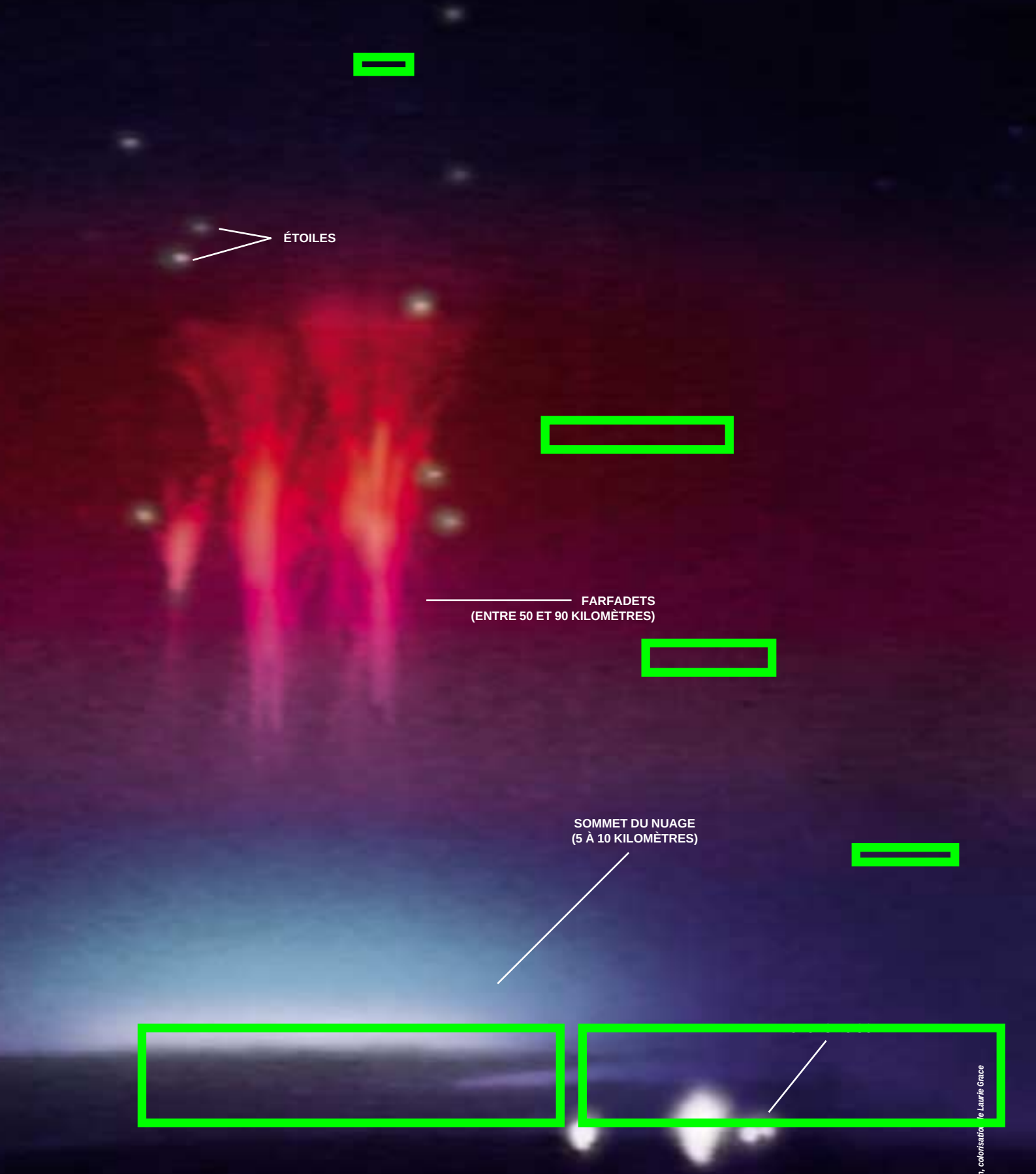
la Terre. Comme des différences de potentiel considérables peuvent s'établir entre les nuages d'orage et l'ionosphère, tout comme entre les nuages et le sol, la foudre peut se déclencher dans ces deux régions, quand l'air, ordinairement isolant, se dissocie et fournit un chemin conducteur que les courants électriques peuvent suivre.

Comme l'atmosphère se raréfie en altitude, les éclairs qui se produisent au-dessus des nuages dissocient moins de molécules d'air que la foudre classique : ils sont généralement rouges et peu visibles. De ce fait, les physiciens doivent utiliser des caméras vidéo sensibles pour les filmer dans la nuit. Malgré ces difficultés, la science des éclairs externes a considérablement progressé, au cours des dernières années.

Deux d'entre nous (D. Sentman et E. Wescott) ont organisé des campagnes de recherche aéroportées, tandis que nous étudions l'activité électrique de haute altitude à partir du sol.

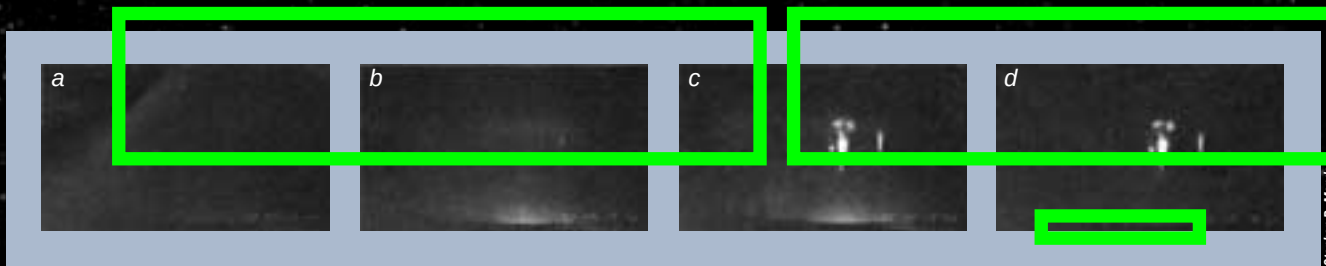
Les événements électriques de la haute atmosphère sont de quatre types. Deux types de foudre d'altitude, nommées farfadets et elfes, sont, malgré leur nom fantaisique, des manifestations atmosphériques bien comprises. Les causes des deux autres types, appelés jets bleus et événements gamma, demeurent plus mystérieuses, mais quelques équipes accumulent les observations dans l'espoir de les élucider.





2. LES FARFADETS sont des éclairs lumineux qui se produisent au-dessus des orages, dans une zone de l'atmosphère nommée mésosphère. Seuls certains orages en engendrent. Généralement les parties supérieures des nuages sont chargées positivement, et les parties inférieures négativement. Le plus souvent, la base négative du nuage produit un éclair vers le sol, mais, parfois, la partie supérieure posi-

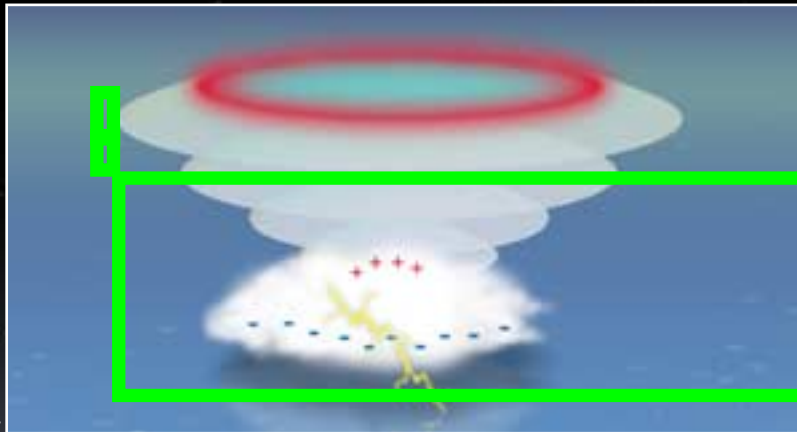
tive peut se décharger directement vers le sol, produisant un éclair d'une intensité exceptionnelle. En moyenne, un de ces coups de foudre sur 20 est assez énergétique pour produire des farfadets. Ces spécimens, filmés du sol par une caméra vidéo noir et blanc, ont été coloriés par ordinateur : ils ont, sur l'image, la même couleur que celle que l'on observe d'avion.



Stephen B. Mende

3. LES ELFES, comme les farfadets, sont des manifestations à haute altitude des champs électriques créés par une foudre exceptionnellement intense. Ils se présentent sous la forme de crêpes lumineuses (*ci-dessous, à droite, on leur a donné la couleur qu'ils ont en réalité*). Les elfes peuvent se produire avec les farfadets, mais ils se forment les premiers et subsistent moins longtemps. La série

d'images vidéo (*ci-dessus*) montre l'apparition d'un elfe : juste avant l'éclair, le ciel est uniformément sombre (a). L'éclair illumine le toit nuageux et produit immédiatement la lueur aplatie des elfes dans la mésosphère (b). Peu après, des farfadets jaillissent dans cette partie de l'atmosphère, ajoutant leur éclat à la faible lueur de la couche lumineuse (c). Enfin, seuls les elfes subsistent (d).



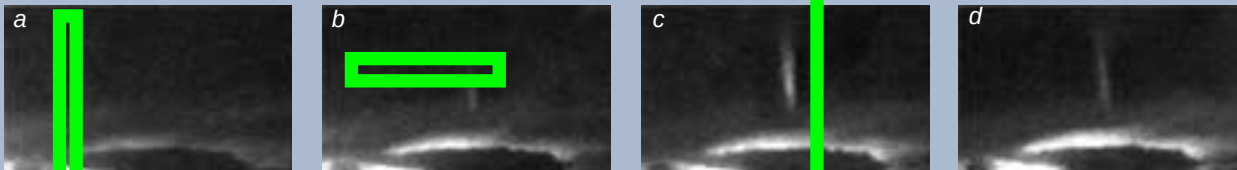
Bryan Christe



Stephen B. Mende

4. LES IMPULSIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES associées aux plus gros éclairs engendrent des elfes. Ces impulsions, qui sont des explosions de champ électromagnétique, sont libérées par la foudre à la vitesse de la lumière dans toutes les directions. Quand la partie ascendante de l'impulsion (*calottes sphériques*) atteint une altitude suffisante (75 à 100 kilomètres), le champ électrique accélère les électrons. Ces derniers heurtent des molécules d'air, leur communiquant une énergie qui, lors de la désexcitation, engendre une émission de lumière. Ce mécanisme crée des anneaux lumineux en expansion qui s'élargissent si rapidement qu'ils apparaissent comme des disques aplatis.

Bryan Christe



20 KILOMÈTRES

5. LES JETS BLEUS, confinés dans la partie inférieure de l'atmosphère, à environ 40 kilomètres d'altitude, sont d'observation difficile. Une image en couleurs (à gauche) montre que la lumière bleu sombre des jets bleus se propage peu dans l'atmosphère, contrairement aux farfadets et aux elfes, qui sont rouges. Pour les observer, on doit s'élever au-dessus des couches inférieures de l'atmosphère. D. Sentman et E. Wescott ont filmé ces cônes de lumière bleue pour la première fois en volant au-dessus d'un très gros orage, dans l'Arkansas, en 1994. Cette suite d'images vidéo (a-d) prises par une caméra monochromatique sensible montre comment les jets bleus sont émis à partir du sommet des nuages d'orage, à des vitesses d'environ 120 kilomètres par seconde. On ignore encore les mécanismes détaillés de leur formation.

6. LES ÉMISSIONS de rayonnements gamma et X, au-dessus des orages, constituent les phénomènes électriques de haute altitude les plus étonnants. Leur existence ne fut découverte que récemment par l'un des instruments de l'Observatoire Compton (à gauche), qui a détecté des rayonnements gamma provenant de la Terre. On savait que les rayonnements gamma étaient produits par diverses sources cosmiques ou par des réactions nucléaires, mais on n'imaginait pas qu'on en trouverait dans l'atmosphère terrestre. Dans les farfadets, par exemple, les électrons atteignent rarement des énergies supérieures à 20 électronvolts (l'énergie qu'un électron gagne quand il est accéléré par une différence de potentiel de 20 volts), alors que les rayonnements gamma correspondent à des énergies atteignant un million d'électronvolts ! L'étude des événements gamma commence seulement.

Stephen MENDE, David SENTMAN et Eugene WESCOTT étudient l'activité électrique de l'atmosphère à l'Université de Fairbanks.

G.J. FISHMAN, P.N. BHAT, R. MALLOZZI, J.M. HORACK, T. KOSHUT, C. KOUVEKOTOU, G.N. PENDLETON, C.A. MEEGAN, AND. WILSON, W.S. PACIESAS, S.J. GOODMAN et H.J. CHRISTIAN, *Discovery of Intense Gamma Ray Flashes of Atmospheric Origin*, in *Science*, vol. 264, pp. 1313-1316, 27 mai 1994.

D.D. SENTMAN, E.M. WESCOTT, D.L. OSBORNE, D.L. HAMPTON et M.J. HEAVNER, *Preliminary Results from the Sprites94 Aircraft Campaign*,

*1: Red Sprites*, in *Geophysical Research Letters*, vol. 22, n° 10, pp. 1205-1208, 15 mai 1995.

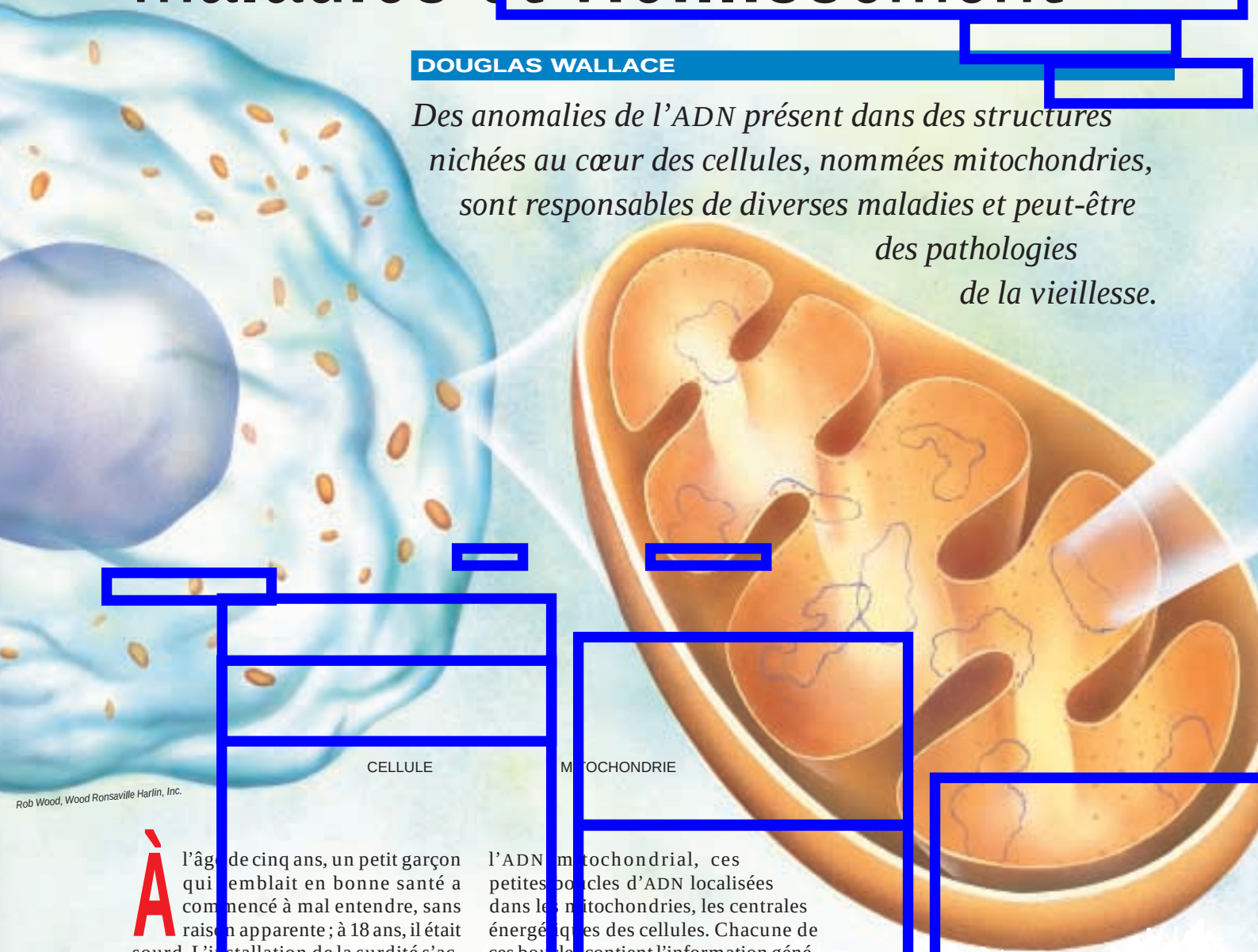
E.M. WESCOTT, D. SENTMAN, D. OSBORNE, D. HAMPTON et M. HEAVNER, *Preliminary Results from the Sprites94 Aircraft Campaign*, *Geophysical Research Letters*, vol. 22, n° 10, pp. 1209-1212, 15 mai 1995.

H. FUKUNISHI, Y. TAKAHASHI, M. KUBOTA, K. SAKANOI, U.S. INAN et W.A. LYONS, *Elves: Lightning-Induced Transient Luminous Events in the Lower Ionosphere*, in *Geophysical Research Letters*, vol. 23, n° 16, pp. 2157-2160, 1<sup>er</sup> août 1996.

# ADN mitochondrial, maladies et vieillissement

DOUGLAS WALLACE

*Des anomalies de l'ADN présent dans des structures nichées au cœur des cellules, nommées mitochondries, sont responsables de diverses maladies et peut-être des pathologies de la vieillesse.*



CELLULE

MITOCHONDRIE

Rob Wood, Wood Ronsaville Harlin, Inc.

**À** l'âge de cinq ans, un petit garçon qui semblait en bonne santé a commencé à mal entendre, sans raison apparente ; à 18 ans, il était sourd. L'installation de la surdité s'accompagna d'hyperactivité et de crises d'épilepsie. À 23 ans, sa vue déclina également ; il souffrait de cataracte, de glaucome et, progressivement, sa rétine se détériora. Entre 23 et 28 ans, il eut des convulsions et une atteinte rénale. Il mourut à 28 ans d'une insuffisance rénale et d'une infection généralisée.

À l'origine de tous ces troubles, une infime anomalie génétique, non pas dans l'ADN chromosomique, présent dans le noyau des cellules, mais dans

l'ADN mitochondrial, ces petites boîtes d'ADN localisées dans les mitochondries, les centrales énergétiques des cellules. Chacune de ces boîtes contient l'information génétique nécessaire à la production des 37 molécules mitochondriales qui fabriquent l'énergie des cellules.

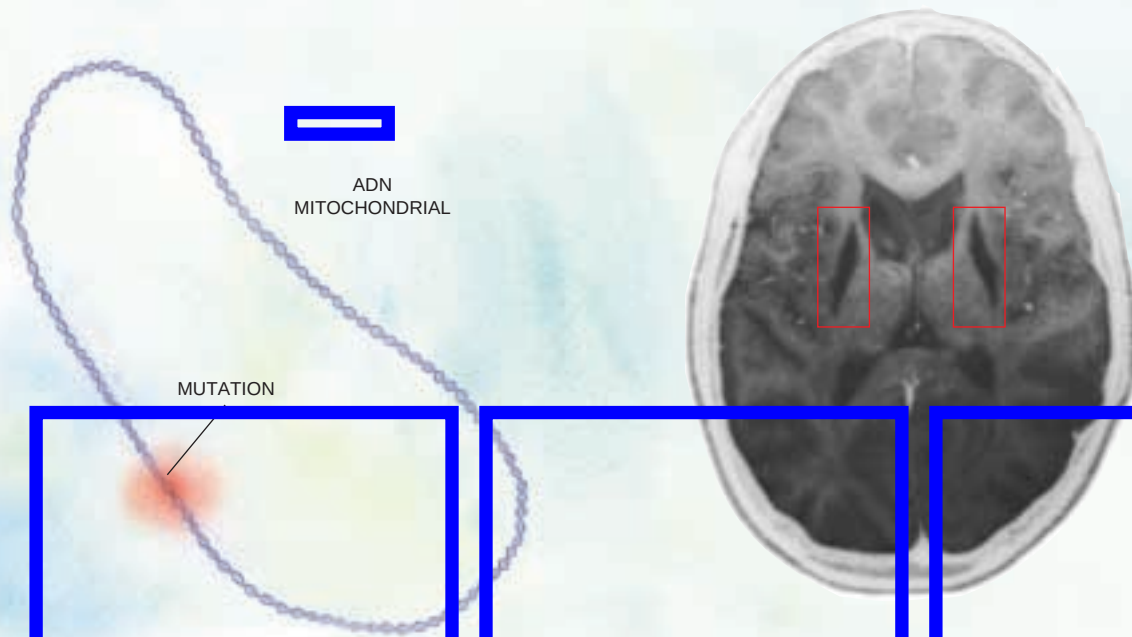
On sait depuis 1963 que les mitochondries contiennent leurs propres gènes, mais la première maladie due à ces gènes n'a été identifiée qu'en 1988. Cette année-là, nous avons découvert l'origine d'une forme de cécité de l'adulte jeune : une atrophie optique familiale, nommée maladie de Leber. Dans plusieurs familles, nous avons

trouvé une petite mutation héréditaire d'un gène mitochondrial. À la même époque, Ian Holt, Anita Harding et John Morgan-Hughes, à Londres, trouvaient que certaines maladies musculaires éruptives résultent d'une anomalie de l'ADN mitochondrial : une délétion (ou absence) d'une partie de cet ADN.

On sait aujourd'hui que des anomalies de l'ADN mitochondrial participent à diverses maladies, dont

1. CHAQUE CELLULE DE L'ORGANISME contient des centaines de mitochondries, les «centrales énergétiques» des cellules. Chaque mitochondrie contient plusieurs molécules d'ADN, chacune portant 37 gènes qui participent à la production de l'énergie. L'ADN mitochondrial est uniquement transmis par la mère. Les anomalies de ces gènes sont associées à des troubles parfois graves. Elles surviennent

dégénératifs, qui touchent surtout le cerveau et les muscles. La tomographie par rayons X (à droite) révèle une anomalie fréquente chez les personnes atteintes de maladies mitochondriales : une dégénérescence des noyaux gris centraux (les structures dans les rectangles rouges), des régions essentielles pour la coordination des mouvements.



on comprend souvent mal les mécanismes, mais qui sont parfois très graves. Des mutations de cet ADN semblent responsables de certains cas de diabète et d'insuffisance cardiaque. En outre, on pense que certaines perturbations des gènes mitochondriaux contribuent au vieillissement et aux maladies chroniques dégénératives, fréquentes chez les personnes âgées, notamment la maladie d'Alzheimer et divers troubles moteurs.

Les biologistes s'intéressent aussi à l'ADN mitochondrial, parce qu'il éclaire l'évolution humaine et révèle les migrations de populations (voir l'encadré des pages 54 et 55). De surcroît, des comparaisons de l'ADN mitochondrial de quelques personnes peuvent servir à l'identification de soldats tués à la guerre (et d'individus morts depuis longtemps) ou à l'établissement de la culpabilité ou de l'innocence d'accusés dans les affaires criminelles (voir l'encadré de la page 57).

Bien que l'intérêt pour l'ADN mitochondrial soit récent, on aurait pu prévoir que des mutations de ce matériel génétique auraient des conséquences physiologiques : les mitochondries produisent environ 90 pour cent de l'énergie dont les cellules, les tissus, les organes – en un mot, l'organisme – ont besoin pour fonctionner.

L'énergie est produite par un ensemble de réactions biochimiques, nommée la chaîne respiratoire, où une série de protéines se transmettent des électrons. Indirectement, l'enzyme ATP synthétase utilise ces électrons pour élaborer de l'ATP (l'adénosine triphosphate), une molécule qui contient de l'énergie sous forme chimique.

On pouvait prévoir que tout ce qui compromet la production d'ATP dans les mitochondries perturbe ou détruit les cellules, ce qui endommage les tissus, dérègle les organes et entraîne l'apparition de symptômes. Dès 1962, Rolf Luft et ses collègues de l'Institut Karolinska, à Stockholm, avaient montré que toute anomalie dans la production de l'énergie cellulaire provoque des maladies. On découvrit ensuite que le système nerveux central, le cœur, les muscles, les reins et les glandes qui produisent des hormones sont sensibles à toute diminution de la production d'énergie.

On a d'abord cru que certaines mutations des gènes nucléaires, dont certains codent des constituants des mitochondries, étaient à l'origine des anomalies de la production de l'énergie cellulaire. Puis, au début des années 1980, les biologistes comprirent que l'ADN mitochondrial code

13 protéines essentielles de la chaîne respiratoire et 24 molécules d'ARN de transfert qui participent à la synthèse de ces sous-unités dans les mitochondries. Ainsi, quand les ARN de transfert mitochondriaux ou les protéines codées par l'ADN mitochondrial sont anormales, la production d'énergie est perturbée, ce qui risque de déclencher des maladies.

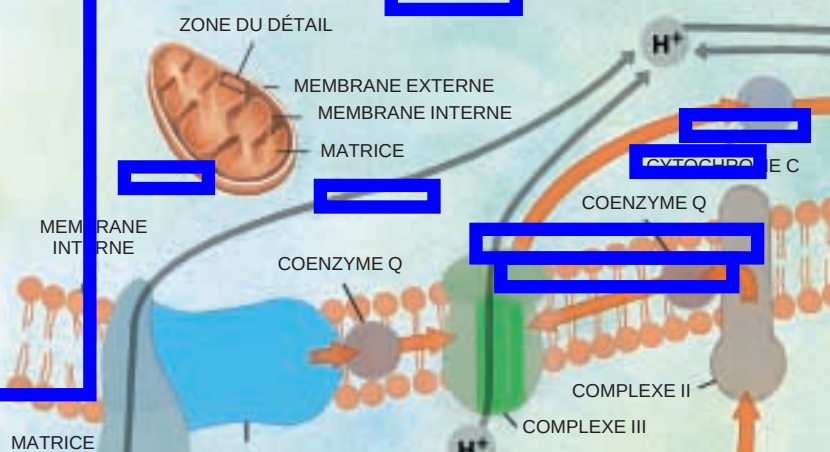
## Tout de la mère

Depuis 1981, les biologistes ont découvert plusieurs caractéristiques des syndromes qu'engendrent les anomalies de l'ADN mitochondrial : ce sont souvent des maladies héréditaires, mais le mode de transmission diffère de celui des mutations dans le noyau. Par ailleurs, les conséquences physiologiques de ces mutations sont plus imprévisibles que celles liées aux mutations des gènes nucléaires.

Après la fécondation d'un ovocyte par un spermatozoïde, l'œuf fécondé contient un noyau renfermant deux lots de chromosomes appariés, l'un d'environ 100 000 gènes (codés par quelque trois milliards de sous-unités de l'ADN, ou paires de bases) provenant de la mère et l'autre, équivalent, provenant du père. Cette cel-

## Le rôle de l'ADN mitochondrial

Les mitochondries produisent de l'énergie en transférant des électrons extraits des aliments (flèches orange, en bas à gauche), le long de la chaîne respiratoire, une série de complexes protéiques (I-IV) présents dans la membrane interne des mitochondries. Dans le complexe IV, les électrons interagissent avec des molécules d'oxygène et des ions hydrogène ( $H^+$ ) pour former de l'eau. Les mitochondries utilisent l'énergie libérée par cette oxydation de l'hydrogène pour pomper des protons (flèches grises) à travers la membrane interne. La charge électrique résultante et les différences de concentrations en diverses molécules qui résultent de ce pompage permettent à un autre complexe, l'ATP synthétase, de synthétiser l'ATP (adénosine triphosphate), la molécule qui transporte l'énergie dans les cellules. Treize protéines, qui constituent les complexes, sont codées par des gènes de l'ADN mitochondrial ; elles sont représentées par les couleurs vives sur le schéma. L'ADN mitochondrial, schématisé à droite, code pour 24 molécules d'ARN utilisées dans la synthèse de ces protéines. Chaque sous-unité (ou paire de base) de l'ADN mitochondrial est numérotée dans le sens inverse des aiguilles d'une montre à partir de la position marquée  $O_H$ . On a indiqué quelques sites de mutations responsables de maladies (les acronymes sont développés dans le tableau ci-contre).



ÉLECTRONS PRÉLEVÉS SUR LES ALIMENTS

lule et ses descendantes se divisent jusqu'à former le nouveau-né. Avant chaque division cellulaire, les chromosomes sont dupliqués, de sorte que chaque cellule transmet à chacune de ses cellules filles un jeu complet de chromosomes maternels et paternels. Ainsi, toutes les cellules de l'organisme ont les mêmes gènes nucléaires, et aussi les mêmes mutations.

Au contraire, les gènes répartis sur les 16 569 paires de bases de chaque molécule d'ADN mitochondrial ne sont transmis que par la mère, puisqu'ils proviennent des mitochondries de l'ovocyte et que le spermatozoïde n'apporte aucune contribution durable. En outre, toutes les cellules de l'organisme contiennent des centaines de mitochondries, lesquelles renferment plusieurs molécules d'ADN mitochondrial ; bien que le nombre des mitochondries et des molécules d'ADN mitochondrial double approximativement avant chaque division cellulaire, pour que chaque cellule fille hérite de quantités quasi équivalentes, la répartition des mitochondries est aléatoire entre les différentes cellules filles.

Ainsi, quand un ovule fécondé contient une mutation de l'ADN mitochondrial dans certaines de ses mitochondries seulement (on parle alors

d'hétéroplasmie), certaines des cellules filles peuvent hériter de nombreuses mitochondries contenant l'ADN muté, tandis que d'autres reçoivent davantage de mitochondries normales. Progressivement, à mesure que les cellules se reproduisent, les populations d'ADN mitochondrial dans les cellules filles s'uniformisent (tendant vers une homoplasmie) : soit avec de plus en plus de molécules normales, soit avec de plus en plus de molécules mutées.

Chez un enfant né d'un ovule hétéroplasmique, certains tissus sont enrichis en ADN mitochondrial normal, tandis que d'autres sont enrichis en ADN muté. De plus, les divers ovocytes d'une femme qui a des cellules hétéroplasmiques ont des proportions variables d'ADN mitochondrial muté ; ses enfants n'ont pas le même nombre de molécules d'ADN mitochondrial muté ni la même répartition de ces molécules dans les tissus ; la nature et la gravité de leurs symptômes différeront. En revanche, une même mutation homoplasmique déclenche les mêmes symptômes.

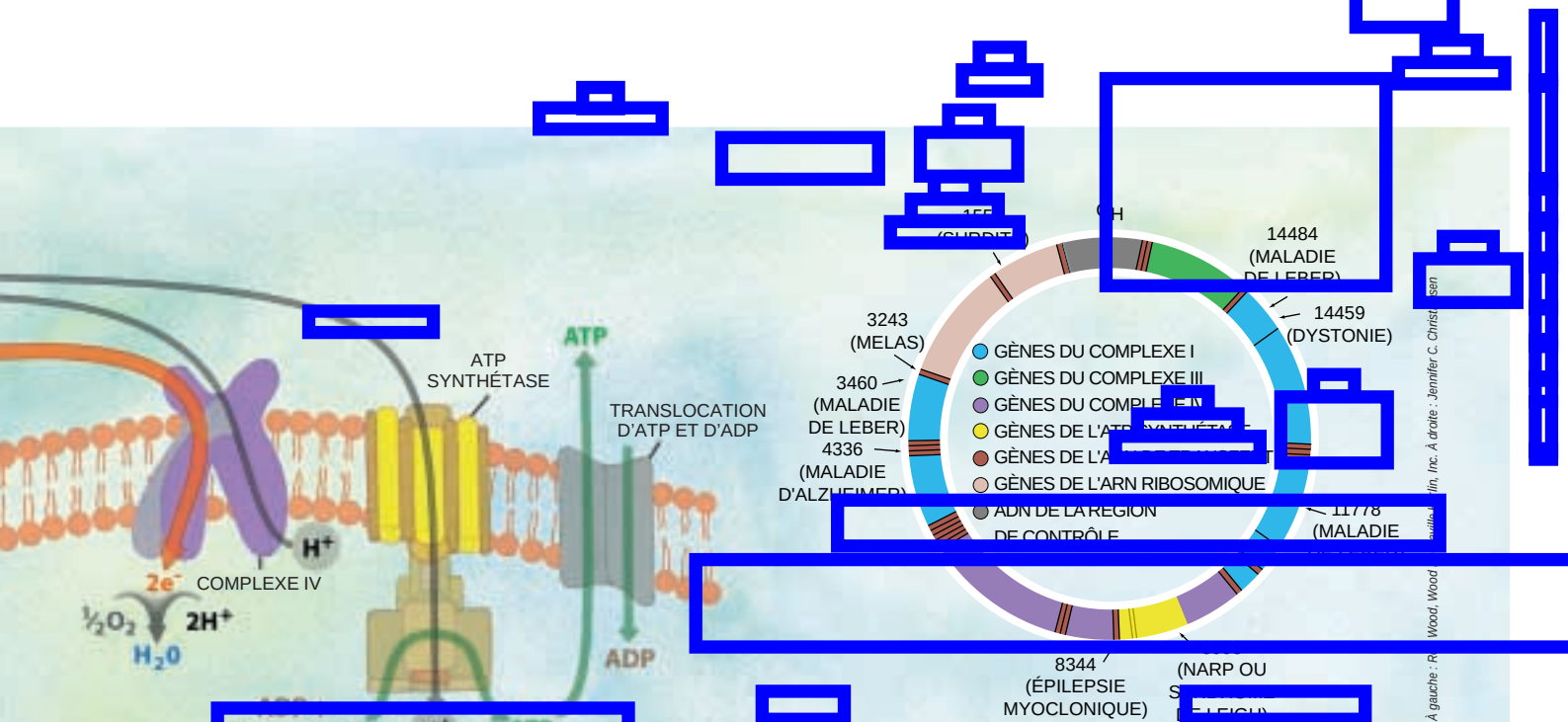
Les anomalies de l'ADN mitochondrial sont souvent héréditaires, mais elles apparaissent parfois spontanément dans un ovocyte ou à un stade précoce du développement

embryonnaire. Ces mutations spontanées, comme les mutations héréditaires, se disséminent dans l'organisme au cours du développement de l'embryon, et elles peuvent avoir de graves conséquences. Des mutations peuvent aussi apparaître au cours de la vie, soit dans différentes cellules, soit dans plusieurs molécules d'ADN mitochondrial d'une même cellule ; ce sont des mutations dites somatiques.

### Des maladies à retardement

L'accumulation de ces mutations expliquerait en partie deux caractéristiques des maladies génétiques héréditaires d'origine mitochondriale. D'une part, chez les personnes nées avec des mutations de l'ADN mitochondrial, les maladies sont souvent longues à se déclarer, et l'état des malades se détériore progressivement. Nous supposons que les mutations héritées de l'ADN mitochondrial perturbent peu le fonctionnement des mitochondries, mais que l'accumulation progressive des mutations somatiques réduit lentement la production d'énergie, jusqu'à ce que les tissus ne fonctionnent plus.

La diminution de la production d'énergie n'est pas la seule consé-



quence des mutations héréditaires ou somatiques. La production d'énergie entraîne la formation de sous-produits toxiques, des radicaux libres. Ces dérivés oxygénés, qui ont un électron non apparié, sont très réactifs ; ils attaquent tous les constituants cellulaires, notamment les protéines de la chaîne respiratoire et l'ADN mitochondrial. Toute anomalie du transfert d'électrons dans la chaîne respiratoire risque d'augmenter leur transfert vers des molécules d'oxygène et de stimuler la formation de radicaux libres. Une seule mutation peut ainsi perturber le transfert des électrons, augmenter la production de radicaux libres et engendrer, de ce fait, de nouvelles mutations de l'ADN mitochondrial.

Généralement, les mutations mitochondriales observées chez les malades sont hétéroplasmiques, car les mutations homoplasmiques graves (qui seraient présentes dans chaque copie d'un gène) donneraient de tous les tissus) réduiraient la production d'énergie, tuant le fœtus ou le nouveau-né. Au contraire, quand une mutation grave est hétéroplasmique, les exemplaires normaux du gène endommagé produisent assez d'énergie pour permettre la survie pendant plusieurs années. Enfin les mutations

## Les maladies mitochondriales

Cette liste des maladies causées par les mutations de l'ADN mitochondrial n'est pas exhaustive. Certaines de ces maladies peuvent résulter de mutations nucléaires ou d'autres mécanismes qui perturbent le fonctionnement des mitochondries.

| MALADIE                                                                                                 | CARACTÉRISTIQUES                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Maladie d'Alzheimer                                                                                     | Perte progressive des capacités cognitives                                                                                                                                                                                                                |
| Ophthalmoplégie externe progressive chronique                                                           | Paralysie des muscles oculaires réduisant la mobilité des yeux et myopathie d'origine mitochondriale (voir ci-dessous)                                                                                                                                    |
| Diabète sucré                                                                                           | Concentration sanguine en sucre élevée entraînant diverses complications                                                                                                                                                                                  |
| Dystonie                                                                                                | Mouvements anormaux, rigidité musculaire ; souvent dégénérescence des noyaux gris centraux du cerveau                                                                                                                                                     |
| Syndrôme de Kearns-Sayre                                                                                | Paralysie de la motricité, myopathie, myasthénie, troubles tels que détérioration de la rétine, maladie cardiaque, surdité, diabète et insuffisance rénale                                                                                                |
| Syndrôme de Leigh                                                                                       | Perte progressive des capacités motrices et verbales et dégénérescence des noyaux gris centraux ; maladie de l'enfance potentiellement mortelle                                                                                                           |
| Maladie de Leber                                                                                        | Cécité temporaire ou permanente due à une lésion du nerf optique                                                                                                                                                                                          |
| Syndrôme MELAS (encéphalomyopathie mitochondriale, acidose lactique et accidents vasculaires cérébraux) | Fonctionnement anormal du tissu cérébral, entraînant des crises d'épilepsie, des paralysies locales temporaires et une démence, associé à une myopathie mitochondriale et une acidose du sang                                                             |
| Épilepsie myoclonique                                                                                   | Crises d'épilepsie associées à une myopathie mitochondriale (voir ci-dessous) ; surdité et démence possibles                                                                                                                                              |
| Myopathie mitochondriale                                                                                | Détérioration des muscles, qui se manifeste par une grande faiblesse, surtout à l'effort ; les muscles présentent souvent des fibres rouges en lambeaux, contenant des mitochondries anormales et se colorant en rouge au contact d'un réactif spécifique |
| Syndrôme NARP (faiblesse musculaire neurogène, ataxie et rétinite pigmentaire)                          | Perte de la force et de la coordination musculaire, accompagnée d'une dégénérescence cérébrale locale et d'une détérioration de la rétine                                                                                                                 |
| Syndrôme de Pearson                                                                                     | Anomalie du fonctionnement de la moelle osseuse chez l'enfant (entraînant une perte des cellules sanguines) et insuffisance pancréatique ; les sujets qui survivent évoluent souvent vers un syndrome de Kearns-Sayre                                     |

hétéroplasmiques ou homoplasmi-  
ques qui réduisent peu la produc-  
tion d'énergie déclenchent des ma-  
ladies moins graves.

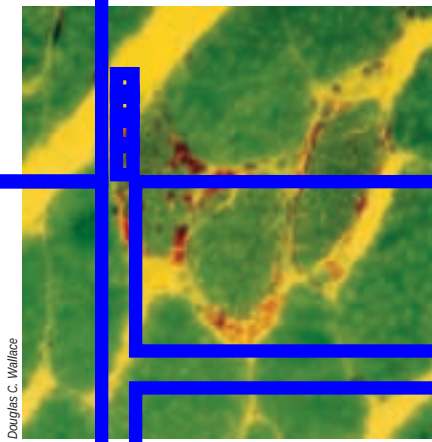
## Petites mutations grands effets

Avant d'examiner les effets tardifs des anomalies mitochondriales, examinons quelques exemples de maladies dues à des mutations héréditaires. Ces maladies sont généralement peu connues, mais leur étude a dégagé des mécanismes importants.

Certaines mutations héréditaires sont « ponctuelles » : une seule paire de bases est remplacée par une autre, dans un gène. De ce fait, la protéine codée par le gène muté est incorrecte, parce qu'un de ses acides aminés (les sous-unités enchaînées) diffère de celui de la protéine normale. Une telle mutation « faux-sens » a des conséquences différentes sur la santé des personnes atteintes, selon la quantité des mitochondries anormales. Ainsi la substitution de la base en position 993 aboutit au remplacement d'un acide aminé dans une sous-unité de l'ATP synthétase.

Dans une famille suivie sur quatre générations, on a observé que la même mutation a causé chez plusieurs personnes une dégénérescence légère de la rétine, à la périphérie du champ visuel (une rétinite pigmentaire) ; chez une autre personne, une dégénérescence grave de la rétine et du système nerveux central ; et, chez deux garçons, une maladie infantile très grave, connue sous le nom de syndrome de Leigh (cette maladie se caractérise par une dégénérescence rapide des noyaux gris centraux, une région du cerveau essentielle à la coordination des mouvements). De toute évidence, les symptômes observés au sein de cette famille différaient surtout parce que la proportion des molécules d'ADN mitochondrial mutées dans les tissus variait selon les personnes : plus cette proportion était élevée, plus la production d'ATP était faible, et plus les maladies étaient graves.

Certaines substitutions nucléotidiques de l'ADN mitochondrial n'engendrent des maladies que si elles deviennent homoplasmiques. Les anomalies génétiques à l'origine de la plupart des cas de la maladie de Leber sont de ce type. Cette maladie apparaît généralement au début de



**2. CERTAINES FIBRES MUSCULAIRES (les fibres rouges en lambeaux) sont anormales chez les personnes souffrant de diverses maladies musculaires d'origine mitochondriale. On les repère par la coloration rouge des mitochondries volumineuses et informes qui s'y accumulent.**

l'âge adulte, avec la détérioration de la région centrale du nerf optique : le malade perd son champ visuel central. Chez 90 pour cent des malades recensés dans le monde, on retrouve systématiquement trois mutations de l'ADN mitochondrial : elles ont toutes pour conséquence une perturbation du transport des électrons, au début de la chaîne respiratoire. Deux des mutations provoquent généralement une perte permanente de la vue ; les personnes qui ont la troisième mutation retrouvent parfois partiellement la vue.

Certaines substitutions de bases dans l'ADN mitochondrial touchent les molécules d'ARN qui sont copiées à partir de cet ADN et servent de plan pour l'élaboration des protéines ; ces mutations qui perturbent la synthèse des protéines mitochondriales diminuent notablement la production d'ATP. Les personnes nées avec de telles anomalies génétiques, nommées mutations de la synthèse protéique, ont plusieurs organes déficients, souvent le système nerveux central et les muscles.

L'exemple que nous avons cité en début d'article, celui du jeune homme décédé à 28 ans d'une insuffisance rénale et d'une infection, montre la gravité de certaines mutations de la synthèse protéique. Ce jeune homme était porteur d'une mutation ponctuelle, caractérisée par l'absence d'une des bases d'un gène qui code une molécule d'ARN de transfert. Normalement, cet ARN ajoute l'acide aminé nommé leucine

aux protéines en cours d'élaboration dans les mitochondries. La mutation était probablement présente dans les cellules germinales de la mère, car ses cellules sanguines ne contenaient pas d'ADN mitochondrial anormal.

Plusieurs autres mutations du même gène sont responsables de maladies graves, trois d'entre elles provoquent une myopathie mitochondriale, une faiblesse musculaire progressive, caractérisée par la présence de fibres rouges en lambeaux (des fibres musculaires anormales où sont accumulées des mitochondries déficitaires). Deux de ces anomalies génétiques font grossir le muscle cardiaque et le détériorent progressivement (cardiomyopathie hypertrophique). Cinq mutations en commun agissent simultanément sur plusieurs systèmes et sont ainsi à l'origine d'une encéphalomyopathie mitochondriale, d'une acidose lactique et d'accidents vasculaires cérébraux à répétition. L'une de ces mutations est également à l'origine d'environ 1,5 pour cent des diabètes sucrés, même lorsque peu de mitochondries contiennent la mutation.

Bien que de nombreuses mutations héréditaires de l'ADN mitochondrial soient fatales dès le plus jeune âge, certaines, moins graves, ne se manifestent qu'à un âge avancé. Ainsi, près de cinq pour cent des Européens qui ont une maladie d'Alzheimer tardive ont une mutation d'un gène qui code une molécule d'ARN de transfert (celui qui transporte l'acide aminé glutamine).

On trouve aussi certaines anomalies simultanées de plusieurs gènes mitochondriaux (des délétions ou des duplications grande taille) ; là encore, ces mutations de « réarrangement », ou remaniements, causent des maladies plus ou moins graves.

## Vieillessement anticipé

Deux maladies, qui se manifestent par une paralysie des muscles oculaires et par une myopathie mitochondriale, résultent de remaniements : l'ophtalmoplégie externe progressive chronique, qui apparaît généralement après 20 ans, et le syndrome de Kearns-Sayre, qui apparaît parfois avant 20 ans et qui se traduit par une dégénérescence de la rétine, des troubles cardiaques, une petite taille et divers symptômes. Les remaniements sont également fréquents dans

le syndrome de Pearson : l'organisme des enfants atteints ne fabrique pas de cellules sanguines, et leur pancréas fonctionne mal. Quand les enfants survivent grâce à des transfusions, ils finissent par être atteints de paralysie oculaire et de diverses anomalies associées au syndrome de Kearns-Sayre. L'état de ces trois types de maladies se détériore lentement, et la mort survient souvent par insuffisance respiratoire.

Les cellules d'une personne atteinte de l'une de ces maladies contiennent généralement un mélange de molécules d'ADN mitochondrial, dont certaines présentent des délétions et d'autres des duplications. Les délétions sont vraisemblablement la cause de la gravité initiale des maladies : les gènes perdus codent normalement des ARN de transfert, de sorte que plusieurs protéines indispensables à la production de l'énergie sont anormales ou absentes. Ces maladies s'aggravent progressivement, parce que les ADN mitochondriaux incomplets se répliquent spécifiquement dans certains tissus, notamment dans les muscles et dans les tissus dont les cellules ne se multiplient pas.

On ignore pourquoi les ADN mitochondriaux incomplets se multiplient sélectivement dans les tissus dont les cellules ne se divisent pas, mais deux hypothèses ont été avancées. D'une part, les ADN incomplets, plus petits

que les ADN normaux, se dupliqueraient plus rapidement, si bien que leur concentration augmenterait ; d'autre part, lorsqu'un des nombreux noyaux d'une fibre musculaire détecte un déficit énergétique dans son voisinage, par exemple, à des gènes mitochondriaux mutés, il tente de compenser la carence en stimulant la réplification de toutes les mitochondries voisines. Malheureusement, cette réaction amplifie la réplification des mitochondries qui sont précisément responsables du déficit énergétique local.

L'origine des délétions mitochondriales intrigue les biologistes depuis longtemps : alors que ces troubles peuvent se transmettre de génération en génération, les ADN mitochondriaux délétés eux-mêmes sont rarement transmis, probablement parce qu'une cellule ou un embryon contenant beaucoup d'ADN mitochondrial délétés ne serait pas viable. Les molécules d'ADN mitochondrial contenant des duplications de gènes seraient en cause : ces molécules contiennent tous les gènes nécessaires à la production d'énergie et ne sont pas directement à l'origine de la maladie. Toutefois, elles subissent parfois des recombinaisons et des réarrangements internes qui aboutissent à des délétions dont les conséquences physiologiques sont graves.

Parfois, les anomalies héréditaires de l'ADN mitochondrial provoquent

des formes précoces de maladies dont souffrent beaucoup de personnes âgées, telles que le diabète, la surdité, les troubles cardiaques, une faiblesse musculaire, des troubles moteurs et une démence. De plus, certaines mutations de l'ADN mitochondrial sont responsables de certains cas de maladie d'Alzheimer, de dystonie (un trouble moteur évolutif) et d'autres maladies neurodégénératives. De surcroît, on a découvert que certaines maladies dégénératives liées à l'âge (tout comme de nombreuses maladies mitochondriales) résultent d'un ralentissement de la production d'énergie. On a déduit que des réductions progressives de la production d'énergie mitochondriale dans les nerfs, dans les muscles ou dans d'autres tissus participeraient aux mécanismes du vieillissement et à l'apparition des diverses maladies dégénératives qui y sont liées.

## Le poids des ans

Plusieurs facteurs, par exemple l'exposition prolongée à des toxines présentes dans l'environnement, pourraient perturber la production d'énergie mitochondriale chez les personnes âgées, même quand les mitochondries et les gènes nucléaires étaient initialement normaux. Ainsi de nombreuses toxines, parmi les plus puissantes, inhibent les mitochondries. L'accumulation progressive de muta-

## L'ADN mitochondrial, un outil pour les médecins légistes

Le 3 septembre 1996, à Chattanooga, dans le Tennessee, un homme âgé de 27 ans était reconnu coupable du meurtre d'une petite fille de quatre ans : une analyse de l'ADN mitochondrial de sa salive, comparée à celle prélevée sur les cheveux de la victime, permit de le confondre. C'était la première fois qu'une preuve fondée sur l'ADN mitochondrial était avancée devant un tribunal. De même, les tests d'ADN mitochondrial sont de plus en plus utilisés pour l'identification des restes humains. Ainsi, les États-Unis financent un programme visant à identifier des ossements de soldats morts pendant la guerre de Corée, à la fin des années 1950. Quand l'ADN prélevé sur des os d'un soldat mort à la guerre correspond exactement à celui d'un de ses frères ou sœurs, on peut en conclure que les restes sont ceux d'un parent disparu. D'autres tests ont permis d'attribuer des os exhumés en Russie en 1991 au tsar Nicolas II et d'établir que l'individu enterré

en 1882 sous le nom de Jesse James était effectivement le bandit légendaire (tous les autres hommes qui s'étaient fait passer pour Jesse James étaient des usurpateurs). Ici, on a comparé l'ADN mitochondrial du défunt à celui des descendants d'un parent proche.

Les biologistes font ces tests en comparant les régions de l'ADN mitochondrial qui ne contiennent pas de gènes. Dans ces régions, les séquences d'ADN varient selon les individus. Quand l'ADN d'un cheveu trouvé sur la victime du meurtre ou d'un violeur et l'ADN d'un coupable présumé sont identiques, le cheveu appartient vraisemblablement à l'accusé.

On établit plus aisément des différences et des similitudes en comparant de l'ADN nucléaire, mais les tissus dont on dispose généralement (un fragment de cheveu, d'os ou de dent) ne contiennent pas toujours assez d'ADN nucléaire ; en revanche, on dispose souvent d'une grande quantité d'ADN mitochondrial.



Jesse James en 1864.

tions somatiques de l'ADN mitochondrial perturberait aussi la production d'énergie.

Selon la théorie mitochondriale du vieillissement, les mitochondries produisent des radicaux libres qui attaquent inexorablement et créent des mutations dans l'ADN mitochondrial. L'accumulation ultérieure de mutations somatiques dans l'ADN mitochondrial de personnes dont les gènes mitochondriaux étaient ini-

talement normaux, finit par réduire trop la production d'énergie dans certains tissus. Ainsi, les mutations somatiques et l'inhibition de la fonction mitochondriale participeraient à l'apparition des signes cliniques observés lors du vieillissement normal : la perte de mémoire, la baisse de l'ouïe, de la vue et de la force. Chez les personnes atteintes d'une production d'énergie était déjà diminuée (par des mutations héritées,

mitochondriales ou nucléaires, ou par des toxines), les anomalies supplémentaires de l'ADN mitochondrial abaisseraient la production d'énergie au-dessous du seuil tolérable. Ces personnes seraient atteintes plus jeunes que les personnes dont la capacité de production d'énergie était initialement normale.

On a effectivement démontré qu'avec l'âge la production d'énergie diminue et que le nombre de muta-

## ADN mitochondrial et migrations humaines

**D**es analyses comparatives de molécules d'ADN mitochondrial de personnes disséminées dans le monde entier ont permis aux généticiens de retracer les grandes migrations humaines. Grâce à ces analyses, ils ont aussi daté approximativement le moment où les diverses populations sont arrivées sur leurs continents respectifs (bien que certaines dates diffèrent selon les méthodes de calcul utilisées).

D'après notre modèle, *Homo sapiens* est apparu en Afrique il y a 130 000 ans. Les premières migrations l'auraient conduit jusqu'en Asie (flèche rouge) il y a 73 000 ans. Il y a quelque 51 000 ans, un autre groupe aurait quitté le Moyen-Orient pour coloniser l'Europe (flèche orange).

Plusieurs vagues migratoires ont mené l'homme moderne de l'Asie vers le Nouveau Monde. Il y a environ 34 000 ans, certaines tribus ont traversé la Sibérie et l'Alaska, puis sont descendues par l'Amérique du Nord et l'Amérique centrale jusqu'en Amérique du Sud (flèches jaunes). Ce sont les ancêtres des Paléo-Indiens modernes : les Pimas d'Arizona, les Mayas du Mexique et les Yanomamis du Venezuela. Il y a 15 000 ans, une deuxième vague d'immigrants venus d'Asie traversa la Sibérie, probablement en longeant la côte, avant d'atteindre l'Alaska et de se disperser sur l'ensemble du territoire américain (flèches vertes). Ils se sont mélangés à la population indigène pour engendrer les Paléo-Indiens actuels qui parlent l'amérindien.

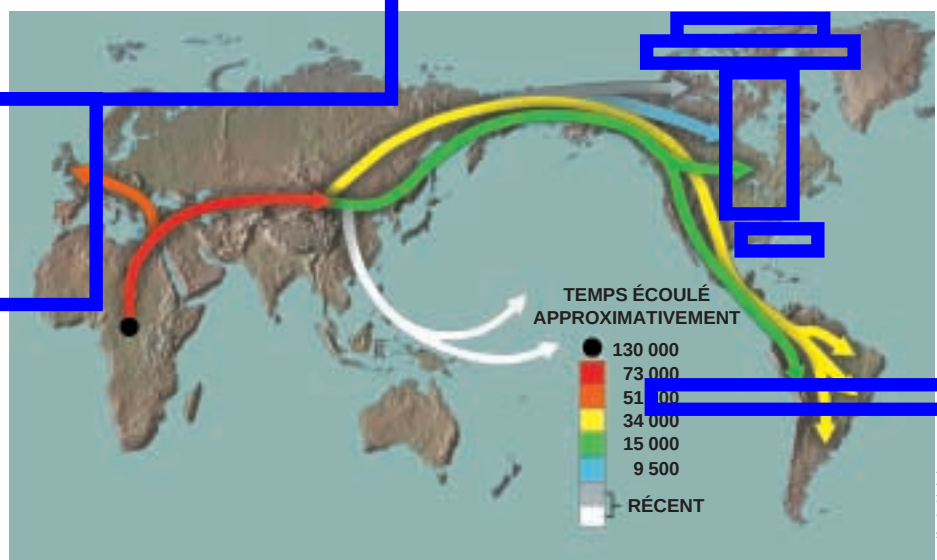
Il y a plus de 9 500 ans, une migration en provenance de la Sibérie a conduit en Amérique du Nord les fondateurs du groupe linguistique Na-Déné, incluant les tribus athabaskanes du Nord-Ouest du Canada et d'Alaska (tels les Dogribs), ainsi que les Apaches et les Navajos du Sud-Ouest des États-Unis (flèche bleue). Les migrations des Esquimaux et des Aléoutes, vers l'Amérique du Nord (flèche grise), et celles des peuples insulaires, vers le Pacifique (flèches blanches), sont plus récentes, mais n'ont pas été datées avec précision à l'aide de l'ADN mitochondrial.

Les analyses de l'ADN mitochondrial permettent de retracer les migrations mondiales des femmes, car des mutations non pathogènes s'accumulent progressivement dans leur ADN mitochondrial : les séquences de paires

de bases trouvées dans l'ADN mitochondrial ne se sont pas différenciées de la même façon sur les divers continents. En regroupant les séquences apparentées sur un continent en «haplogroupes», puis en comparant ces groupes sur les divers continents, les biologistes déterminent les liens de parenté entre des femmes de divers sites et découvrent quels ont été les pays les premiers colonisés : la colonisation est d'autant plus ancienne que les séquences des ADN mitochondriaux sont diverses. Les populations africaines sont les plus anciennes, car elles ont les ADN mitochondriaux les plus variés. La variation diminue des Asiatiques aux Européens et aux diverses populations américaines.

Toutefois, les dates dépendent de la vitesse à laquelle les molécules d'ADN mitochondrial ont accumulé les mutations. Cette vitesse est quasi constante, mais on ne la connaît pas précisément. Les mutations semblent survenir à peu près tous les 2 000 à 3 000 ans. Les dates que nous donnons ici se fondent sur une fréquence de mutations moyenne d'environ 2 500 ans.

De surcroît, d'après les analyses de l'ADN mitochondrial, *Homo sapiens* aurait remplacé toutes les espèces humaines plus primitives (par exemple, l'Homme de Neandertal) qu'il a rencontrées sur les territoires colonisés. Certains anthropologues contestent cette hypothèse, affirmant que les ancêtres d'*Homo sapiens* sont apparus en Afrique il y a plus d'un million d'années. Ils se seraient ensuite répandus dans l'Ancien Monde et auraient évolué localement, donnant naissance aux principales races humaines.



tions somatiques de l'ADN mitochondrial augmente : l'activité d'un des complexes de la chaîne respiratoire diminue progressivement dans le cerveau, les muscles, le cœur et le foie. Par ailleurs, les remaniements mitochondriaux se multiplient dans de nombreux tissus, notamment dans le cerveau (probablement dans les régions qui commandent la mémoire et les mouvements), dans des muscles squelettiques, dans le muscle cardiaque et dans la peau. Les substitutions de bases, responsables des maladies mitochondriales héréditaires, s'accumuleraient également.

Avant l'âge de 30 ou 40 ans, les mutations décelables sont rares, mais après, elles se multiplient rapidement. Cette augmentation résulterait d'une amplification sélective des ADN mitochondriaux mutés.

## Maladie d'Alzheimer et diabète

Des analyses de tissus prélevés sur des personnes âgées atteintes de maladies dégénératives (neurologiques et musculaires) confirment que certaines de ces maladies résultent de l'accumulation de mutations somatiques. Par exemple, les personnes souffrant de la chorée de Huntington perdent le contrôle moteur et sont atteintes de démence sénile à cause d'une mutation héréditaire spécifique, dans leur ADN nucléaire. Toutefois, les délétions dans l'ADN mitochondrial sont également plus nombreuses dans leur cerveau que dans celui des sujets sains du même âge, et leur ADN mitochondrial contient davantage de mutations somatiques. Dans le cas de la chorée de Huntington, la mutation nucléaire et les mutations mitochondriales somatiques se combineraient pour diminuer la production d'énergie dans les cellules cérébrales et déclencher les symptômes.

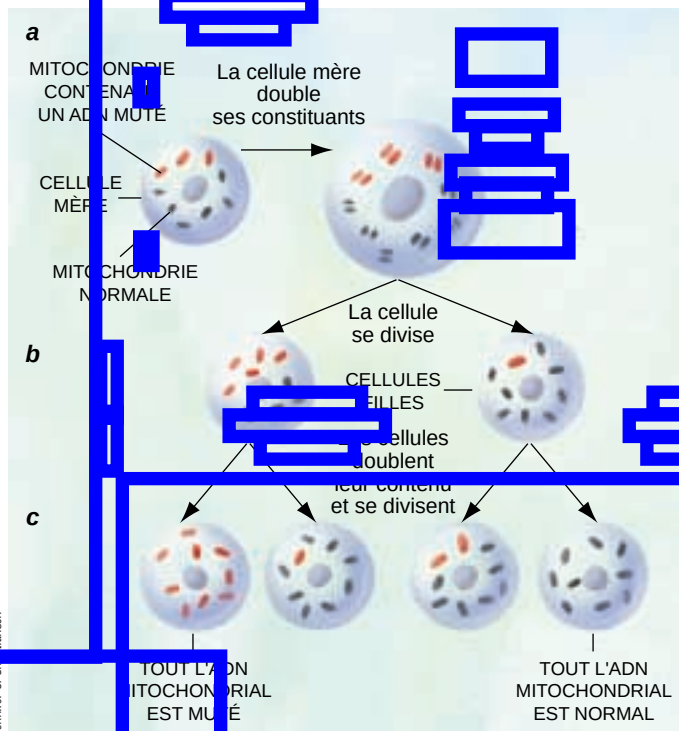
Nous avons vu, certains cas de maladie d'Alzheimer résulteraient de mutations héréditaires de l'ADN mitochondrial. Cependant, ces mutations sont incapables de déclencher la maladie à elles seules, puisque les symptômes n'apparaissent que tardivement : les effets de mutations mitochondriales acquises doivent se conjuguer à ceux des mutations héréditaires. Effectivement, le tissu cérébral des patients atteints de la maladie d'Alzheimer contient beaucoup

de mutations somatiques de l'ADN mitochondrial.

Certains diabètes sucrés de l'adulte résulteraient aussi d'anomalies mitochondriales. Les personnes atteintes de cette maladie sécrètent de l'insuline, mais en quantité insuffisante pour les besoins de l'organisme. Or ce diabète est héréditaire, et c'est souvent la mère qui transmet la maladie (comme pour les maladies d'origine mitochondriale). En outre, on connaît déjà des mutations de l'ADN mitochondrial (des réarrangements et des substitutions de bases) qui engendrent un diabète sucré (d'autres mutations peuvent bien sûr avoir le même effet). Certaines mutations de l'ADN mitochondrial pourraient réduire la production d'énergie, privant ainsi les cellules sécrétant l'insuline de l'énergie nécessaire à la synthèse de cette molécule.

On pense aussi que, chez des patients souffrant d'athérosclérose, l'insuffisance cardiaque est renforcée par la multiplication des mutations somatiques de l'ADN mitochondrial. Lorsque les plaques d'athérome se déposent sur les parois des artères, elles provoquent des occlusions temporaires, de sorte que le cœur est privé d'oxygène : la chaîne respiratoire cesse de fonctionner, mais elle libère des radicaux libres au moment où la circulation sanguine et l'oxygénation sont rétablies. Cet afflux de radicaux libres endommage l'ADN mitochondrial dans le muscle cardiaque et limite la production d'ATP disponible pour sa contraction. On observe effectivement une proportion anormalement élevée de lésions de l'ADN mitochondrial chez les patients dont le cœur a été reperfusé après un arrêt temporaire de la circulation.

Des études faites sur des rongeurs confirment qu'une accumulation rapide de mutations dans l'ADN mitochondrial accélère le vieillissement : les animaux soumis à une restriction calorique restent en bonne santé et vivent plus longtemps que ceux nourris sans restriction. Or ces animaux



**3. UNE CELLULE contenant des mitochondries dont l'ADN muté et d'autres avec de l'ADN normal (a) engendre souvent des cellules filles qui diffèrent par le nombre de mitochondries contenant de l'ADN anormal (b). Après de nombreuses divisions cellulaires, les cellules finissent par contenir soit de l'ADN mitochondrial totalement normal, soit de l'ADN mitochondrial totalement anormal (c). Cette tendance à l'uniformisation se produit dans les cellules au cours du développement embryonnaire. Elle s'opère également dans les ovocytes des générations féminines successives, de sorte que certains des enfants engendrés ont davantage d'ADN mitochondrial muté que leur mère et des symptômes plus graves.**

produisent moins de radicaux libres et accumulent moins de lésions dans leur ADN mitochondrial que leurs congénères mieux nourris.

### La jeunesse par les vitamines

Si les radicaux libres favorisent effectivement l'accumulation de mutations somatiques dans l'ADN mitochondrial et accélèrent le vieillissement, de traitements qui protègent

l'ADN mitochondrial en inhibant la production des radicaux libres devraient ralentir le vieillissement et retarder l'apparition des maladies qui y sont liées. Serait-il utile d'utiliser des antioxydants (tels que le coenzyme Q ou les vitamines C ou E). Des études réalisées sur des animaux semblent encourageantes.

Pour ralentir le vieillissement, on pourrait aussi tenter l'amplification des ADN mitochondriaux mutés dans les tissus. Pour ce faire, les biologistes tentent de clarifier les interactions moléculaires qui permettent au noyau de détecter les déficits locaux en énergie et de stimuler la multiplication des mitochondries anormales environnantes.

Il y a dix ans, peu de biologistes imaginaient que des mutations dans l'ADN mitochondrial participent à de nombreuses maladies mystérieuses, ainsi qu'au vieillissement et à diverses maladies dégénératives. Aujourd'hui, étudier de l'ADN mitochondrial éclaire le développement de nombreuses maladies et, mieux encore, ouvre des perspectives pour leur traitement ou l'inhibition de leur évolution. Si les mutations de l'ADN mitochondrial contribuent réellement au vieillissement et au déclenchement de certaines maladies, des recherches fondamentales devraient déboucher sur des traitements qui soulageront beaucoup de souffrances humaines.

Douglas WALLACE, professeur de génétique moléculaire, dirige le Centre de médecine moléculaire d'Emory.

D.C. WALLACE, *Mitochondrial Genetics: A Paradigm for Aging and Degenerative Diseases?*, in *Science*, vol. 256, pp. 628-632, 1<sup>er</sup> mai 1992.

D.C. WALLACE, *Mitochondrial DNA Variation in Human Evolution: 1994 William Allan Award Address*, in *American Journal of Human Genetics*, vol. 57, n° 2, pp. 201-223, août 1995.

D.C. WALLACE, M.D. BROWN et M.T. LOTT, *Mitochondrial Genetics*, in *Emery and Rimoin's Principles and Practice of Medical Genetics*, troisième édition, sous la direction de David L. Rimoin et al., Churchill Livingstone, 1997.

MITOMAP: a Human Mitochondrial Genome Database, 1995-1997, Center for Molecular Medicine, Emory University, Atlanta, Ga. Disponible sur le site Web de *Pour la Science*: <http://www.pourlascience.com>

# Les coulées de boue

PHILIPPE COUSSOT

*Les coulées de boue en montagne, des laves torrentielles dévastatrices charriant blocs de rocher, graviers et particules argileuses, ont un comportement étrange : elles se déversent par vagues et peuvent s'arrêter à mi-pente.*



«Le torrent [...] J s'est grossi en alluvions, entraînant des masses de rochers, de pierres, de terre, de tout, et ça dévalait dans la vallée sur Pralognan, du côté du hameau de Granges. Précédant la masse d'alluvion, il y avait un énorme rocher qui roulait et sur ce rocher il y avait une vieille femme assise qui filait avec un rouet. Les gens, attirés par le bruit du cataclysme, se sont précipités et ils ont vu cette vieille qui n'était autre que le diable.» (Ch. Favre, Darbellay)

Ces propos, recueillis dans un village de montagne par Christian Albry et Alice Joisten (*Le monde alpin et rhodanien*, 1995, pp. 39-66), montrent combien les coulées de boue dans les torrents frappent l'imaginaire collectif. Ces écoulements, aussi appelés laves torrentielles, sont rares, imprévisibles, brutaux, bruyants et, enfin et surtout, destructeurs.

J.R. Rodine et A. M. Johnson, de l'Université de Purdue, aux États-Unis, ont décrit les effets des laves torrentielles : «Dans un grondement de tonnerre, un mur noir apparut soudain au détour du canyon. Le torrent s'emplit d'un mélange de boue et de rochers s'entrechoquant avec fracas. Cette masse visqueuse dévalait la pente en transportant d'énormes blocs posés à sa surface. Parvenu dans la vallée le torrent déborda. La lave torrentielle se répandit sur le cône de déjection [zone de dépôts des sédiments apportés par un torrent] emportant au passage maisons et voitures. Enfin, comme essoufflé, le mélange boueux et rocaillieux vint s'arrêter mollement dans des pâturages. La lave formait maintenant des lobes épais qui couvraient les champs comme une sauce au chocolat nappant un gâteau. Après quelques jours, la lave asséchée allait se pétrifier telle un béton grossier.»

Les laves torrentielles sont suffisamment fréquentes et destructrices pour que de nombreux chercheurs et ingénieurs à travers le monde étudient comment en atténuer les effets. Le premier congrès mondial relatif à la lutte contre les laves torrentielles s'est tenu en août 1996, à San Francisco. Les sujets abordés allaient du déclenchement des coulées de lave aux mesures de protection à mettre en œuvre, en passant par les propriétés mécaniques de l'écoulement.



1. LE 16 JUILLET 1904, un torrent de boue dans le lit du torrent de Bonrieux a envahi un village de Savoie (voir la page de gauche). Le 24 août 1981, une lave a recouvert la zone industrielle de Modane et la voie ferrée en aval, causant environ 50 millions de francs de dégâts (ci-dessus). Depuis le début du siècle, les travaux des ingénieurs et techniciens des services de Restauration des Terrains de Montagne ont ralenti l'érosion et protégé les surfaces habitées. Les laves torrentielles restent cependant un souci, du fait du tourisme.

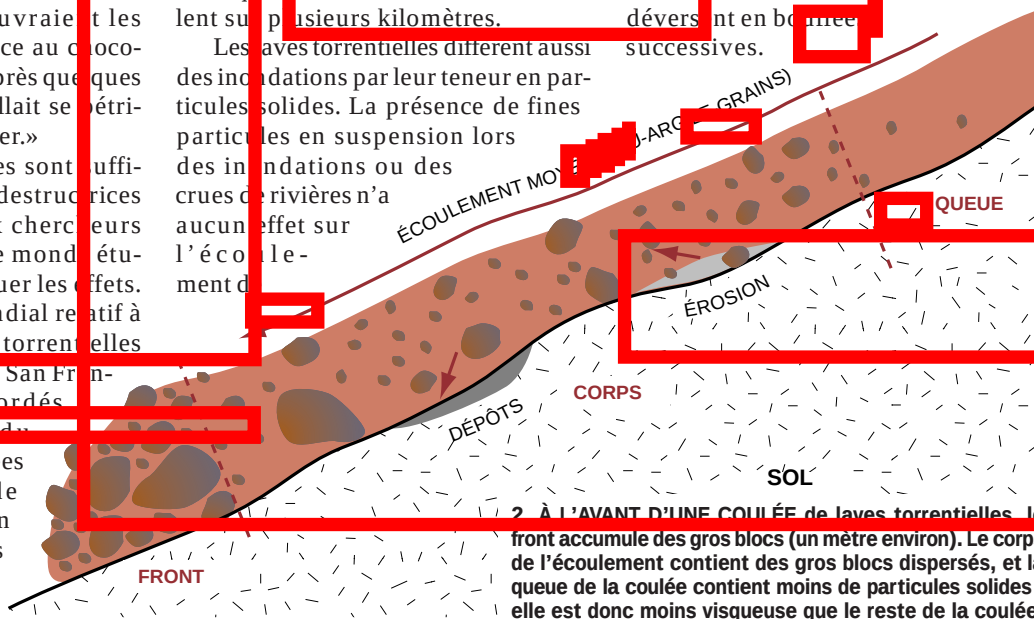
## Le phénomène géophysique

Les laves torrentielles se distinguent des glissements de terrain. Elles s'écoulent continuellement et inexorablement, alors que, dans les glissements de terrain, le matériau détaché se déplace comme un bloc de terrain et assez peu déformé. La distance parcourue par un glissement de terrain est courte, au plus quelques centaines de mètres, alors que les laves torrentielles s'écoulent sur plusieurs kilomètres.

Les laves torrentielles diffèrent aussi des inondations par leur teneur en particules solides. La présence de fines particules en suspension lors des inondations ou des crues de rivières n'a aucun effet sur l'écoulement de l'eau.

La coloration de l'eau est trompeuse : quelques grammes d'argile résultant de l'érosion du bassin versant donnent une coloration foncée à un litre d'eau. Dans les laves torrentielles, la masse liquide essentielle n'est pas l'eau, mais un mélange eau-argile-grains.

Enfin, contrairement aux crues torrentielles où le niveau d'eau varie rapidement au cours du temps à mesure que la pluie se rassemble dans le lit du torrent, les laves torrentielles se déversent en bouées successives.



2. À L'AVANT D'UNE COULÉE de laves torrentielles, le front accumule des gros blocs (un mètre environ). Le corps de l'écoulement contient des gros blocs dispersés, et la queue de la coulée contient moins de particules solides ; elle est donc moins visqueuse que le reste de la coulée.

La durée entre chacune de ces bouffées est de l'ordre de quelques minutes. Le nombre de bouffées, généralement de quelques unités, peut atteindre plusieurs dizaines. Dans la ravine Jiangjia, en Chine, en juin 1966, 126 bouffées de 665 à 24 600 mètres cubes ont été enregistrées pendant cinq heures. Ces vagues de boue ont plusieurs mètres de haut, une densité supérieure à deux, et avancent sur des fronts de plusieurs centaines de mètres de large, à une trentaine de kilomètres à l'heure. La ravine Jiangjia produit en moyenne dix laves torrentielles par an. Aussi, la vallée de la rivière Xiaojiang, affluent du fleuve Yang-tsé, où aboutissent cette ravine et d'autres « torrents à laves », est recouverte de boues séchées de plusieurs dizaines de mètres de haut le long de plusieurs dizaines de kilomètres. Le seul moyen de voyager au fond de cette vallée est la marche.

La vitesse de la lave varie en fonction de la pente : du haut bassin, où l'on trouve des pentes de l'ordre de 100 pour cent, au cône de déjection, dont la pente varie aux alentours de dix pour cent, la vitesse décroît de plusieurs mètres par seconde à l'arrêt complet.

Les laves torrentielles surviennent lors d'orages violents et localisés. Le mélange boueux et rocaillieux qui s'écoule dans le lit du torrent parvient jusqu'à la vallée, parcourue par la rivière torrentielle. Là, un pont, un coude du canal ou un rétrécissement de la largeur du lit du torrent poussent la lave à sortir du lit pour s'épancher

sur le cône de déjection. Ce cône est formé de l'ensemble des sédiments amené par les torrents dans la vallée, très souvent fertile, et la population s'y installe volontiers en dépit des risques encourus.

## Des conséquences souvent catastrophiques

La boue envahit alors des maisons, submerge une route ou une voie ferrée. Les dépôts boueux qui stagnent momentanément dans le lit du torrent sont laves et emportés par la queue de la lave constituée d'un mélange d'eau et de sédiments plus liquides, ou par les écoulements hyperconcentrés lors de crues suivantes. Au contraire, les laves arrêtées sont difficiles à mouvoir, et des couches épaisses de matériau s'arrêtent sur des pentes supérieures à quelques pour-cent.

Les matériaux sortis du lit et arrêtés sur le cône de déjection ne se remettent pas en mouvement d'eux-mêmes et ne sont pas non plus évacués par l'érosion progressive due aux eaux de ruissellement : du fait de la présence d'argile, ils forment une masse compacte, relativement imperméable, dure après séchage, et de forte densité.

À partir de 1985, les voies d'accès à la vallée de la Maurienne ont été coupées régulièrement pendant plusieurs années par des coulées provenant du torrent de Pontamafrey. En 1981, une lave torrentielle dans le torrent de la Ravoire, près de Bourg-Saint-Mau-

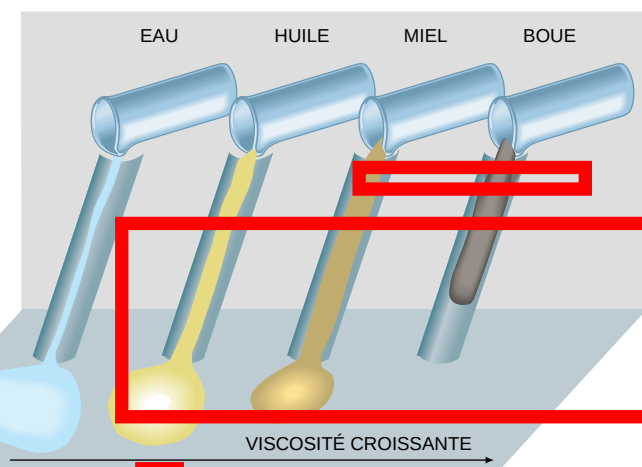
rice a coupé la ligne de chemin de fer et plusieurs routes, dont celle menant à la station des Arcs. En 1987, la zone industrielle de Modane a été envahie par une lave torrentielle (voir la figure 1). En 1995, 21 laves torrentielles « ordinaires » se sont déversées dans 9 torrents différents dans la seule vallée de la Maurienne. Pendant l'été 1995, des laves torrentielles se sont répandues sur la station de ski de Serre-Chevalier, envahissant de nombreuses voitures et envahissant plusieurs maisons. Enfin, en juillet 1996, une lave du torrent de l'Arbonne a coupé la route et la voie ferrée conduisant à Bourg-Saint-Maurice.

Si, en France, on déplore très rarement des victimes, les laves torrentielles sont plus meurtrières en Chine et au Japon. Au Japon, où la densité de population est forte, les laves torrentielles causent en moyenne 100 morts par an. En Chine, en 1980, un train reliant Kunming à Chengdu a été happé par une lave torrentielle, ce qui a causé la mort de 300 personnes.

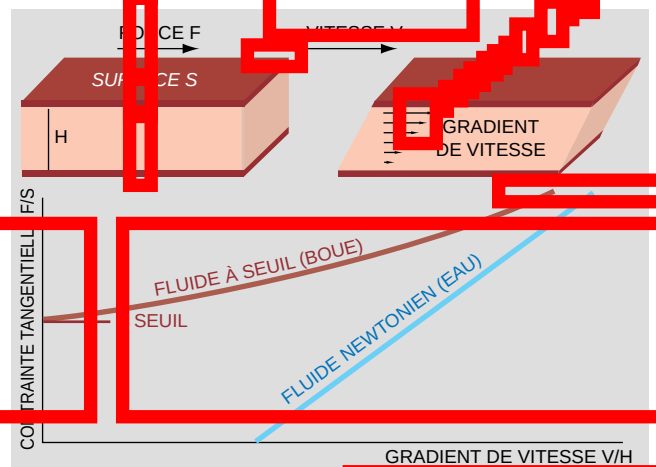
## Le mode de déclenchement

Les laves torrentielles sont constituées d'eau qui provient directement ou indirectement de pluies (après que l'eau a séjourné un temps plus ou moins long dans le sol), et de sédiments qui sont arrachés à la surface du bassin versant.

On pourrait penser que les laves torrentielles sont déclenchées par un glissement de terrain qui, au cours de



3. DIFFÉRENTS FLUIDES s'écoulent différemment en fonction de leur viscosité (à gauche). Lorsque la viscosité augmente, la vitesse d'écoulement diminue et le niveau atteint par le fluide dans le canal augmente, jusqu'à éventuellement déborder. Un matériau est caractérisé par sa résistance au cisaillement, mesurée par la force de déplacement d'un plateau divisée par sa surface (à droite). L'intensité du cisaillement pour une contrainte tangentielle donnée est mesurée par le gradient de vitesse. Pour un fluide newtonien tel que l'eau ou



la confiture, une toute petite contrainte entraîne un mouvement du fluide. De ce fait, en attendant suffisamment longtemps, on obtient des flaques d'eau, d'huile et de miel similaires. Pour un fluide à seuil, tel que la boue, le gradient de vitesse ne s'établit – et le fluide ne s'écoule – que si la contrainte est supérieure à une valeur minimale. Un tas de boue ne s'écoule donc pas de lui-même : si la pente n'est pas assez forte, il ne bouge pas. Ainsi les laves torrentielles peuvent s'arrêter à mi-pente.

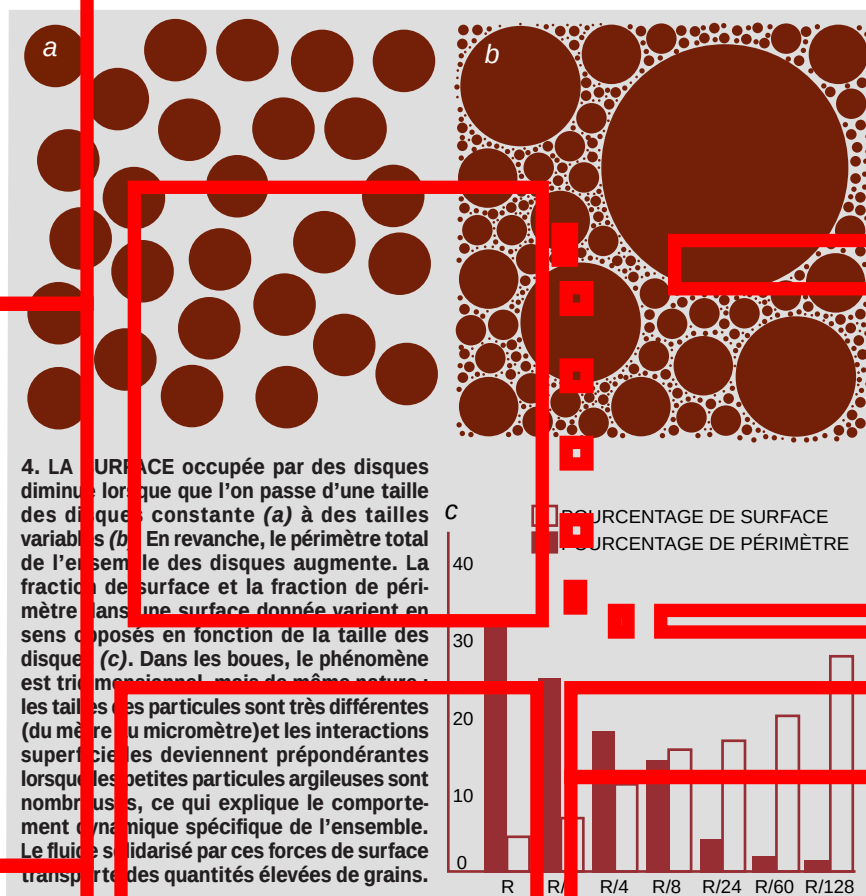
son mouvement, et par addition d'eau, formerait un fluide boueux. Cependant, lorsqu'on explore un bassin versant immédiatement après une lave torrentielle, comme l'ont fait Didier Richard et Emmanuel Bossan dans les Alpes durant l'été 1992, on ne trouve pas de zone de départ de matériau bien identifiée qui aurait fourni l'essentiel du volume de la lave. L'ensemble du bassin, notamment le lit et les berges du torrent et de tous les ravins affluents, sont assez uniformément érodés. Localement, on observe les traces de petits glissements de terrain ou des effondrements de berges, mais il faut cumuler l'ensemble de ces phénomènes pour obtenir le volume de lave qui aboutit dans la vallée.

Ainsi la formation d'une lave résulte, semble-t-il, de l'érosion de tout un bassin versant, sans que l'on distingue une cause prédominante. Une lave torrentielle se forme lorsqu'un ensemble de conditions critiques sont réunies : série de glissements de berges d'assez grande ampleur, conjonction de plusieurs écoulements très chargés en matériaux solides venant des berges ou des affluents du torrent principal, formation puis rupture brutale d'une retenue permettant l'accumulation, puis le départ brutal, d'une grande masse de matériaux solides, etc. La corrélation systématique de ces paramètres pour décrire les situations favorables à la formation de laves semble pour l'instant hors de portée des spécialistes.

Durant les 30 dernières années, les chercheurs se sont surtout intéressés à la prédiction des caractéristiques d'écoulement de ces laves. Ces travaux tendent à délimiter les zones susceptibles d'être atteintes par des coulées, ou à concevoir des ouvrages capables de les stopper ou de les détourner. En France, l'équipe de recherches dirigée par Maurice Meunier étudie le problème depuis une dizaine d'années au Cemagref de Grenoble. A son initiative, des moyens importants de caractérisation du matériau et d'études des écoulements ont été mis en œuvre. Une plateforme torrentielle unique au monde a été construite au Laboratoire d'hydraulique de France (voir la figure 5).

## Des grains de toutes tailles

Quelles sont les propriétés caractéristiques du matériau constituant les coulées de boue. Ce sont des mélanges très



visqueux constitués d'eau, d'argiles, de limons, de sables, de cailloux et de rochers : toutes les tailles de sédiments, du plus petit (argile) au plus grand (bloc rocheux de quelques mètres de diamètre) sont représentées. Des blocs énormes de quelques dizaines de mètres cubes peuvent être transportés par la coulée : au Japon, un bloc de 3 000 tonnes (plus de 1 000 mètres cubes) s'est déplacé sur plusieurs kilomètres. Des blocs dont le diamètre est de l'ordre du mètre semblent flotter à la surface de l'écoulement, portés non seulement parce que le matériau qui s'écoule est très visqueux, mais aussi parce que la différence de masse volumique entre ce bloc et le mélange qui l'entoure est faible.

On observe ces mouvements rapides de tels mélanges boueux dans d'autres domaines : effondrements ou glissements sous-marins, vases mobilisées par des vidanges de barres de forage, boues résiduaires, charbon liquide. Dans tous ces cas, ces écoulements de fluides sont composés de trois ingrédients principaux : un liquide (essentiellement de l'eau), des particules solides très fines (colloïdales) et de grosses particules

solides. Le comportement mécanique du mélange dépend de la quantité relative de ces trois composants.

La caractéristique commune de tels fluides est leur concentration solide (rapport du volume occupé par le solide et du volume total, eau plus solide) très élevée : pour les laves torrentielles, elle peut dépasser 85 pour cent.

Cet résultat est à rapprocher de la fraction solide maximale d'un mélange compact de sphères rigides, 74 pour cent, et de celle d'un mélange désordonné, 60 à 64 pour cent. À ces concentrations, le mélange de sphères est un solide, sauf quand on parvient à le laisser la fraction solide, auquel cas il peut s'écouler. C'est le phénomène de dilatance des matériaux granulaires, découvert par Reynolds à la fin du siècle dernier : au sein des tas de sable, pour bouger les uns par rapport aux autres, les couches de grains doivent s'écarter légèrement, ce qui diminue la concentration solide moyenne.

La concentration courante d'une lave torrentielle, dont les éléments solides sont disposés « en vrac » au sein d'un fluide qui ne peut se dilater nota-

blement, paraît étonnamment élevée. Il est ainsi surprenant qu'un tel matériau s'écoule aussi rapidement.

## Et pourtant elles coulent

L'explication de ce phénomène est «l'étalement granulométrique» des particules solides : celles-ci ont un diamètre entre un dixième de micromètre et quelques mètres, toutes les classes intermédiaires étant à peu près également représentées. Avec cette granulométrie étalée, des petits grains peuvent s'insérer dans les vides entre les gros grains entassés, et ainsi de suite jusqu'à des tailles de l'ordre du micromètre. Il en résulte un important volume solide relatif.

Le mélange boueux (au sens large) constitué de la lave torrentielle se déforme à peu près continûment et inexorablement, comme un fluide homogène (pour autant, toutefois, que la plupart des blocs présents dans la lave aient un diamètre faible devant la largeur du canal d'écoulement). Cependant un volume égal d'eau et de boue s'écoule très différemment dans un canal, car les résistances internes (des interactions entre les particules constitutives des matériaux) diffèrent. L'eau est (en général) un fluide beaucoup moins visqueux que la boue. Précisons donc ce que nous entendons par viscosité.

Au contraire d'un solide, qui subit des déformations limitées, un fluide s'écoule. Pour les fluides les plus simples (newtoniens), l'effort appliqué pour obtenir un mouvement est proportionnel à la vitesse de cisaillement du fluide. Lorsque deux plaques rigides sont séparées par un fluide newtonien, on les fait glisser l'une par rapport à l'autre en exerçant une force tangentielle sur les plaques proportionnelle à la vitesse souhaitée. Dans ce cas, la contrainte tangentielle (force/surface) est égale au gradient de vitesse (vitesse/épaisseur de fluide) multiplié par la viscosité du fluide, indépendante de la vitesse pour un tel fluide (voir la figure 3). C'est cette viscosité qui détermine les caractéristiques des écoulements newtoniens. Pour de nombreux fluides, en particulier pour les laves torrentielles, le modèle newtonien n'est pas valable, et la loi de comportement est plus complexe.

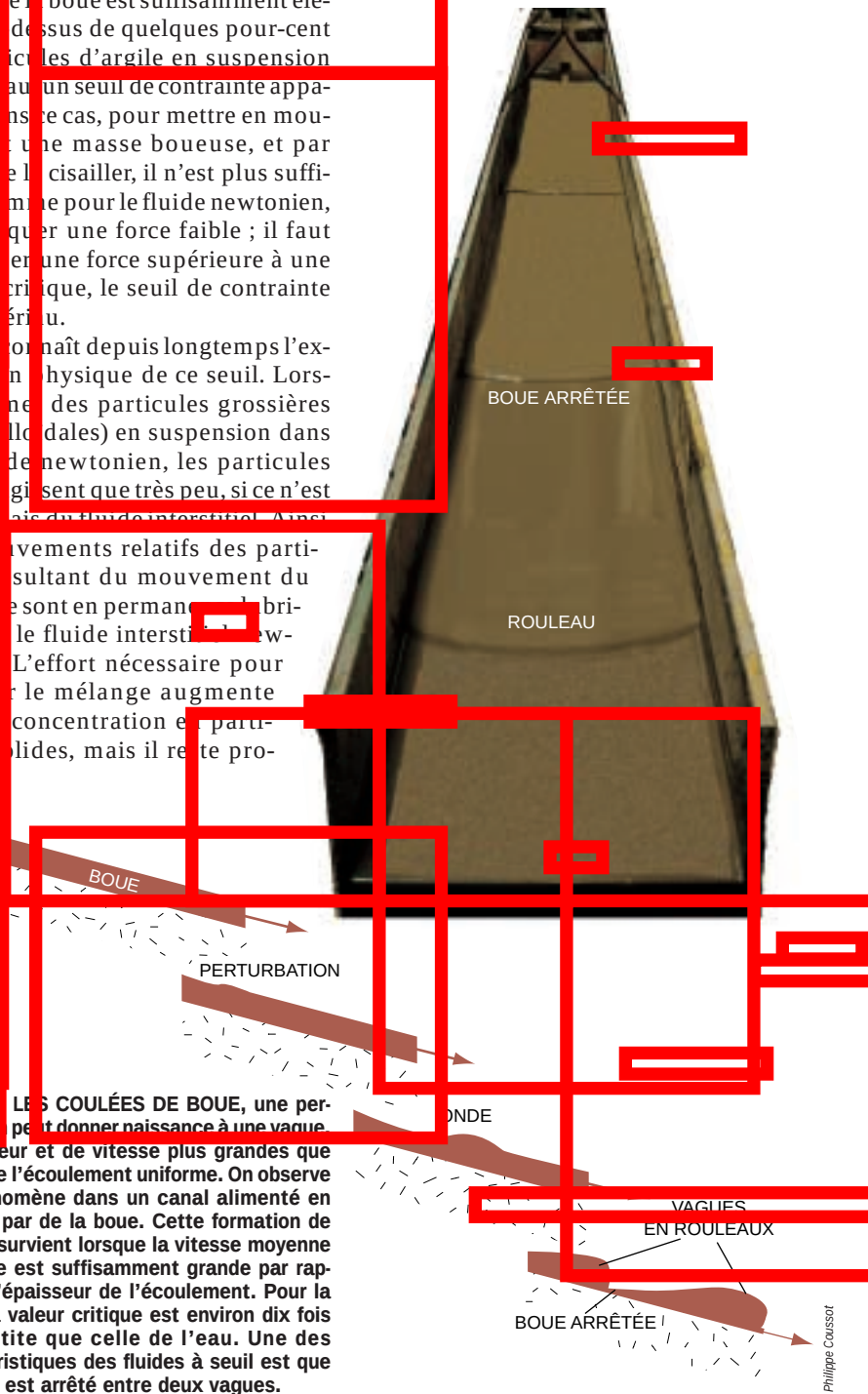
Dans des conditions extérieures fixées, un fluide coule d'autant plus

rapidement qu'il est moins visqueux. Seul l'équilibre entre les sollicitations extérieures et la tension superficielle peut permettre à un liquide de s'arrêter. Le cas de la boue (et d'autres suspensions comme les peintures, les encres, le béton frais) est singulier (voir la figure 5) : lorsque la contrainte extérieure due à la gravité diminue, la masse boueuse s'arrête au lieu de ralentir, même sur de fortes pentes. Le mouvement ne se continue que si les forces appliquées sont supérieures à un certain seuil. Lorsque la concentration solide de la boue est suffisamment élevée, au-dessus de quelques pour-cent de particules d'argile en suspension dans l'eau, un seuil de contrainte apparaît. Dans ce cas, pour mettre en mouvement une masse boueuse, et par exemple la cisailier, il n'est plus suffisant, comme pour le fluide newtonien, d'appliquer une force faible ; il faut appliquer une force supérieure à une valeur critique, le seuil de contrainte du matériau.

On connaît depuis longtemps l'explication physique de ce seuil. Lorsqu'on met des particules grossières (non colloïdales) en suspension dans un fluide newtonien, les particules n'interagissent que très peu, si ce n'est par le biais du fluide interstitiel. Ainsi les mouvements relatifs des particules résultant du mouvement du mélange sont en permanence lubrifiées par le fluide interstitiel newtonien. L'effort nécessaire pour cisailier le mélange augmente avec la concentration en particules solides, mais il reste pro-

portionnel au gradient de vitesse. En revanche, dans les laves torrentielles, les particules d'argile (colloïdales) peuvent interagir à travers le fluide interstitiel, même lorsque la suspension est au repos. Lorsque la concentration en particules solides est suffisamment grande, les particules d'argile forment un réseau continu d'interactions d'un bout à l'autre de l'échantillon. Pour briser ce réseau, et donc mettre en mouvement le mélange, il faut appliquer une force minimale, le seuil de

**5. DANS LES COULÉES DE BOUE, une perturbation peut donner naissance à une vague de hauteur et de vitesse plus grandes que celles de l'écoulement uniforme. On observe ce phénomène dans un canal alimenté en continu par de la boue. Cette formation de vagues survient lorsque la vitesse moyenne du fluide est suffisamment grande par rapport à l'épaisseur de l'écoulement. Pour la boue, la valeur critique est environ dix fois plus petite que celle de l'eau. Une des caractéristiques des fluides à seuil est que le fluide est arrêté entre deux vagues.**



contrainte du matériau. Bien entendu, ce seuil augmente avec la concentration solide, car le réseau devient de plus en plus serré. De nombreux chercheurs ont constaté que cette augmentation se faisait selon une loi de puissance. Ce résultat est à peu près expliqué (par la théorie de la percolation) pour des concentrations proches de la concentration critique correspondant à l'apparition d'un seuil, mais reste mystérieux pour des concentrations nettement supérieures. Or le matériau constitutif des laves torrentielles ne contient pas seulement de l'eau et de l'argile, mais aussi des grains de toutes tailles. La plupart du temps la fraction eau-argile seule est un fluide à seuil. La lave complète incluant les grains est un fluide de même type avec un seuil de contrainte qui augmente avec la concentration solide totale. Tant que la concentration solide n'est pas trop grande, les grains sont isolés les uns des autres par des couches plus ou moins épaisses de mélange eau-argile. Celui-ci forme une matrice continue où existe encore le réseau d'interactions entre particules d'argile, ce qui explique l'existence du seuil de contrainte du mélange eau-argile-grains. En revanche, il n'existe pas encore de théorie pertinente expliquant l'augmentation du seuil avec la concentration solide en grains ajoutés.

À concentration solide égale, la granulométrie fixe la viscosité : celle-ci est d'autant plus grande que la fraction de particules colloïdales (argileuses) est grande.

Lorsque le nombre de grains ajoutés est trop grand, beaucoup d'entre eux peuvent entrer en contact plus ou moins direct. Du coup, le comportement mécanique du mélange n'est plus dicté essentiellement par la matrice de boue fine qui enrobe tous les grains mais par les contacts entre grains. Les physiciens étudient ces milieux granulaires plus intensément depuis quelques années. On sait notamment que, lorsqu'une masse de grains secs s'écoule sur un plan incliné à très grande vitesse, la «viscosité» du mélange est réglée par les collisions entre les particules. En revanche, au delà d'une pente critique, à débit

pas encore été établies ou vérifiées. On sait cependant d'ores et déjà qu'il faut tenir compte de divers phénomènes : les grains peuvent frotter les uns contre les autres, entrer en collisions ou être animés d'un mouvement relatif simplifiés par du fluide interstitiel. En s'appuyant entre autres sur les raisonnements ci-dessus, en vue d'applications sur le terrain, nous avons, au Cemagref, décidé de distinguer deux catégories principales de matériaux du point de vue mécanique : «granulaires» si la fraction solide critique qui induit un grand nombre de contacts entre les grains est dépassée ; «boueux» dans le cas contraire.

## Modélisation des écoulements

C'est dans le domaine des fluides dits boueux que nous disposons actuellement des meilleures modélisations d'écoulement. Le seuil de contrainte est leur caractéristique essentielle et explique un certain nombre de leurs propriétés : notamment les dépôts épais de boue qui stagnent sur de relative-ment fortes pentes.

Par ailleurs, une instabilité hydro-dynamique de type vague se manifeste aussi. Comme dans n'importe quel fluide, lorsque l'épaisseur du fluide est suffisamment faible et sa vitesse suffisamment forte, l'écoulement se déstabilise et se transforme en vagues déferlantes. Une petite perturbation de l'écoulement (variation de la rugosité du fond du canal, léger rétrécissement, etc.) provoque une ondulation de la surface libre de l'écoulement (en contact avec l'air), dont l'amplitude s'accroît jusqu'à occuper toute la hauteur de l'écoulement (voir la figure 5). L'écoulement permanent, uniforme au départ, se transforme en une succession de vagues plus rapides et plus hautes que l'écoulement initial. Finalement il existe souvent une gamme très étroite de pentes pour lesquelles un écoulement de boue est uniforme : au-dessous d'une pente critique, il n'y a pas d'écoulement, du fait du seuil de contrainte du fluide, au-delà d'une pente critique, à débit fixé, les vagues déferlantes apparaissent. Or ces deux pentes sont relativement proches.

Ces vagues augmentent le potentiel destructeur des écoulements de laves torrentielles. Par ailleurs, le

phénomène pourrait être à l'origine de la formation des bouffées successives observées dans les torrents.

On peut ensuite entrer dans le domaine de la modélisation des écoulements réels, à l'aide de modèles numériques notamment. Cela constitue par exemple l'objet des travaux d'équipes telles que celle de P.Y. Julien, à Fort Collins, aux États-Unis, ou D. Laigle au Cemagref, à Grenoble. Les modélisations effectuées permettent d'ores et déjà de prédire les zones susceptibles d'être touchées par d'éventuelles laves torrentielles dans les vallées. On a pu aussi réaliser des modèles réduits en similitude des écoulements naturels, de la même manière que l'on réalise des maquettes pour étudier le mouvement dans l'air ou dans l'eau des avions ou des bateaux. Cela a permis par exemple d'étudier la forme à donner à des ouvrages permettant le passage de torrents au-dessus de l'autoroute de la Maurienne actuellement en construction. Cette étude a été réalisée au travers d'une collaboration entre des bureaux d'études (HYDRATEC et SOGREAH) et avec l'aide d'un laboratoire de recherches (Cemagref). Ces modèles permettront aussi d'étudier l'impact des laves sur les ouvrages construits dans les torrents. Ce n'est plus le diable qui dirige les coulées de boue!

## Archivèd'émission scientifique de la Sept-ARTV présentera Les coulées de boue, mardi 18 novembre 1997, à 20 h.

P. COUSSOT a été chercheur à la Division Protection contre les érosions au Cemagref de Grenoble. Il est actuellement chef de projet IRM (Imagerie par résonance magnétique) au Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil, à Champs-sur-Marne.

P. COUSSOT, *Mudflow Rheology and Dynamics*, IAHR monograph, Balkema, Rotterdam, 1997.

P. COUSSOT, *Les laves torrentielles. Connaissances de base à l'usage de l'ingénieur*, Coll. Études Cemagref 23, 1996.

SHROB VAGE, *The mechanics of rapid granular flows*, Adv. Appl. Mech., 24: 289-366, 1984.

T. TAKAHASHI, *Debris flow*, IAHR monograph series, Balkema, Rotterdam, 1991.

H. Van DAMME, E. LEMAIRE et P. LEVITZ, *La physique de la boue*, Pour la Science, septembre, 1991.



# La découverte du quark top

TONY LEISS • PAUL TIPTON

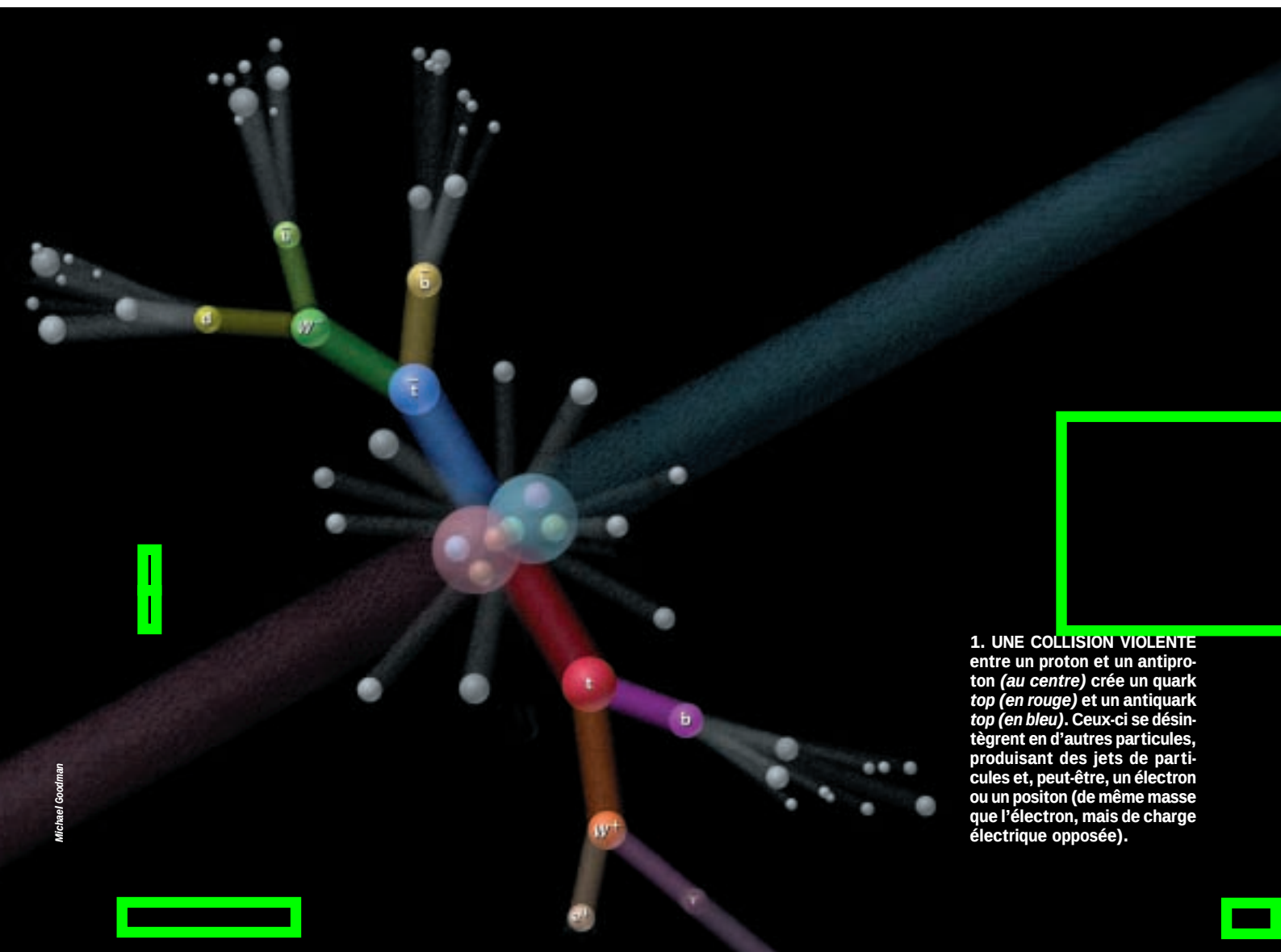
*L'accélérateur de particules le plus puissant du monde, conduit par des milliers de personnes, a identifié le sixième et dernier quark.*

**E**n mars 1995, les physiciens rassemblés en hâte au Laboratoire Fermi, près de Chicago, assistèrent à un événement historique : les différentes équipes, chargées chacune d'un détecteur installé sur l'accélérateur, annoncèrent la découverte du quark *top*. Avec cette découverte de l'une des pièces manquantes du Modèle standard de la physique des particules, une quête de près de 20 ans s'achevait.

Le quark *top* est le sixième et, probablement, le dernier quark. Avec les leptons — l'électron et les particules du même type —, les quarks sont les briques fondamentales de la matière. Les quarks les plus légers, nommés *u* et *d* (pour *up* et *down*), sont les constituants des protons et des neutrons qui, en se liant à des électrons, forment tous les éléments de la Classification périodique de Mendeleïev. Les quarks plus lourds, comme les quarks *c* (charmé),

*s* (*strange*), *t* (*top*) et *b* (*bottom*) et les leptons lourds, bien qu'abondants juste après le Big Bang, ne sont produits aujourd'hui que dans les accélérateurs de particules. Selon le Modèle standard, qui décrit les interactions entre ces briques constitutives, les leptons et les quarks se groupent en paires, souvent nommées familles.

Depuis la découverte de son partenaire, le quark *b*, en 1977, les physiciens savaient que le quark *top* devait



1. UNE COLLISION VIOLENTE entre un proton et un antiproton (au centre) crée un quark top (en rouge) et un antiquark top (en bleu). Ceux-ci se désintègrent en d'autres particules, produisant des jets de particules et, peut-être, un électron ou un positon (de même masse que l'électron, mais de charge électrique opposée).

exister, mais il fut particulièrement difficile à trouver. Bien qu'il s'agisse d'une particule fondamentale, sans structure apparente, le quark *top* possède une masse de 175 milliards d'électronvolts/ $c^2$  (GeV/ $c^2$ ), égale à celle d'un atome d'or et bien supérieure à la plupart des prévisions (1 électron-volt est une unité d'énergie, reliée à la masse par la relation  $E = mc^2$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière). Le proton, composé de deux quarks *u* et d'un quark *d*, possède une masse légèrement inférieure à un GeV/ $c^2$ .

## Des collisions par milliards

Pour créer un quark *top*, on devait donc concentrer une quantité considérable d'énergie dans une minuscule région de l'espace : c'est ce que font les physiciens quand ils accélèrent deux particules avant de les projeter l'une contre l'autre. Les expérimentateurs espéraient que, parmi les milliers de milliards de collisions provoquées, quelques-unes produiraient un quark *top*. À quelle énergie ? Le Modèle standard prédisait de nombreuses propriétés du quark *top*, comme sa charge électrique et son spin (ou moment cinétique intrinsèque), mais pas sa masse. La quête était hasardeuse...

Bien que les particules puissent être créées à partir d'énergie pure, certaines propriétés, comme la charge électrique, sont conservées : dans une collision, la charge électrique totale des particules est égale avant et après la collision. Un quark *top* ne peut naître par lui-même. La façon la plus simple de produire ce quark est de le créer avec son antiparticule, l'antiquark *top* : ce dernier possède la même masse que le *top*, mais le signe de toutes les autres propriétés est opposé, de sorte que toutes les quantités conservées s'annulent.

En 1965, quand le collisionneur du Laboratoire Fermi fut mis en service pour la première fois, la recherche du quark *top* avait commencé depuis huit ans. Les premières tentatives, menées au Collisionneur linéaire de Stanford, en Californie, et au Laboratoire DESY de Hambourg, n'aboutirent pas. Au fil des ans, à mesure que les physiciens construisaient des accélérateurs plus puissants, la quête se poursuivait. Au début des années 1980, au CERN (le Laboratoire européen de physique des particules, près de Genève),

les collisions de faisceaux de protons et d'antiprotons de 315 GeV avaient engendré deux nouvelles particules : les bosons *W* et *Z*.

Tandis que les quarks et les leptons constituent la matière, ces particules véhiculent les forces entre particules. C'est la force nucléaire faible, responsable de certaines désintégrations radioactives. Leur découverte renforçait le Modèle standard, qui avait com-

plètement prédit leurs masses. On pensait alors que la découverte du quark *top* au CERN était imminente.

Ce fut plus difficile qu'on ne l'imaginait. À haute énergie, lors d'un choc entre des protons et des antiprotons, la collision n'affecte que les quarks et gluons constitutifs. Ainsi, chaque quark ou gluon n'a qu'une part infime de l'énergie totale du proton ou de l'antiproton, et la collision doit être suf-

| CONSTITUANTS DE LA MATIÈRE       |                              |                |                |                        | CHARGE         |
|----------------------------------|------------------------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|
| QUARKS                           | UP                           | DOWN           | STRANGE        | CHARM                  | TOP            |
|                                  | MASS (GeV/ $c^2$ )<br>0,3    | 0,3            | 0,5            | 1,5                    | 175            |
|                                  | MASS (GeV/ $c^2$ )<br>0,3    | 0,3            | 0,5            | 1,5                    | 175            |
|                                  | CHARGE<br>$+\frac{2}{3}$     | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | $+\frac{2}{3}$         | $+\frac{2}{3}$ |
| LEPTONS                          | ÉLECTRON                     |                | MUON           |                        | TAU            |
|                                  | MASS (GeV/ $c^2$ )<br>0,0005 | 0,0005         | 0,106          | 0,106                  | 1,7            |
|                                  | MASS (GeV/ $c^2$ )<br>0,0005 | 0,0005         | 0,106          | 0,106                  | 1,7            |
|                                  | CHARGE<br>$-1$               | $-1$           | $-1$           | $-1$                   | $-1$           |
| PARTICULES VÉHICULANT LES FORCES |                              |                |                |                        | CHARGE         |
| BOSONS VECTEURS                  |                              |                | PHOTON         | GLUON                  |                |
| MASS (GeV/ $c^2$ )               | 80                           | 80             | 91             | 0                      | 0              |
| CHARGE                           | $+1$                         | $-1$           | 0              | 0                      | 0              |
| FORCE                            | FAIBLE                       | FAIBLE         | FAIBLE         | ÉLECTRO-<br>MAGNÉTIQUE | FORTE          |

## Le monde selon le Modèle standard

La matière est formée de deux types de particules : les quarks et les leptons, groupés en familles. Les quarks *u* et *d*, par exemple, forment les atomes avec les électrons ; ils appartiennent à la première famille. Les quarks plus lourds, tels le *top* et le *bot*, ne sont créés que dans les accélérateurs. À chaque quark ou lepton correspond un antiquark ou un antilepton de charge opposée (non représentés).

Les forces sont transmises par un ensemble différent de particules : les bosons *W* et *Z*, le photon et les gluons. Les bosons *W* et *Z* transmettent la force nucléaire faible, en jeu dans les désintégrations radioactives. Par exemple, un quark *u* peut se transformer en un quark *d* en émettant un boson *W*, qui se désintègre alors en un quark ou en une paire de leptons. Le photon transmet la force électromagnétique, laquelle, à haute énergie, se confond avec la force faible. Les gluons transportent la force nucléaire forte, qui lie les quarks *u* et *d* en protons et en neutrons. Les physiciens croient à l'existence d'une particule supplémentaire, le boson de Higgs, mais ils ne l'ont pas encore découverte.

fisamment énergétique pour produire des quarks *top*. De telles collisions sont rares et plus l'énergie nécessaire est élevée – c'est-à-dire plus la masse du quark *top* est grande –, plus elles sont rares.

Fin 1988, le CERN n'avait toujours pas observé le quark *top*, de sorte que sa masse était supérieure à 41 GeV/c<sup>2</sup>. Entre-temps, le collisionneur proton-antiproton du Laboratoire Fermi (Tevatron) entra en service avec son détecteur CDF (l'acronyme de *Collider Detector at Fermilab*, soit «Détecteur de collisions du Laboratoire Fermi»). Malgré une brève et intense compétition entre nous et un groupe du CERN, la décennie 1980 s'acheva sans que le *top* apparaisse ; on savait seulement que sa masse était supérieure à 77 GeV/c<sup>2</sup>.

À cette époque, le CERN avait atteint sa limite : on ne pouvait trouver le quark *top* si sa masse était supérieure à 77 GeV/c<sup>2</sup>. En revanche, une autre équipe fut chargée d'un second détecteur, de l'autre côté de l'anneau du Laboratoire Fermi, nommée DØ (prononcez D-zéro) en raison de sa position le long de l'anneau. Des 1992, la collaboration DØ commença à accumuler des données. Non seulement le fonctionnement des deux détecteurs créait une émulation bénéfique, mais les deux groupes pouvaient confronter leurs résultats et les vérifier.

Les expériences CDF et DØ sont deux collaborations internationales de

plus de 400 physiciens, auxquels s'ajoutent de nombreux ingénieurs, techniciens et personnels de soutien. Les deux équipes sont indépendantes et ne collaborent jamais aux analyses. Entre ces deux collaborations une compétition amicale s'est instaurée.

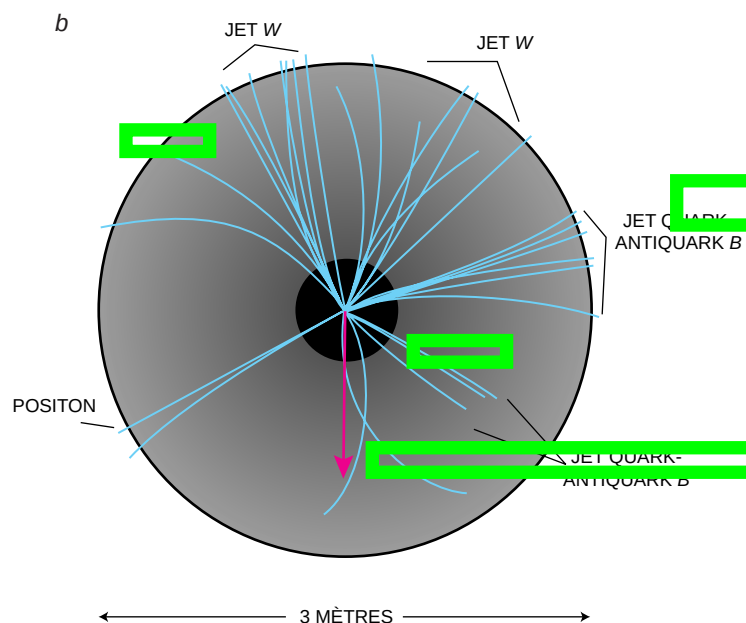
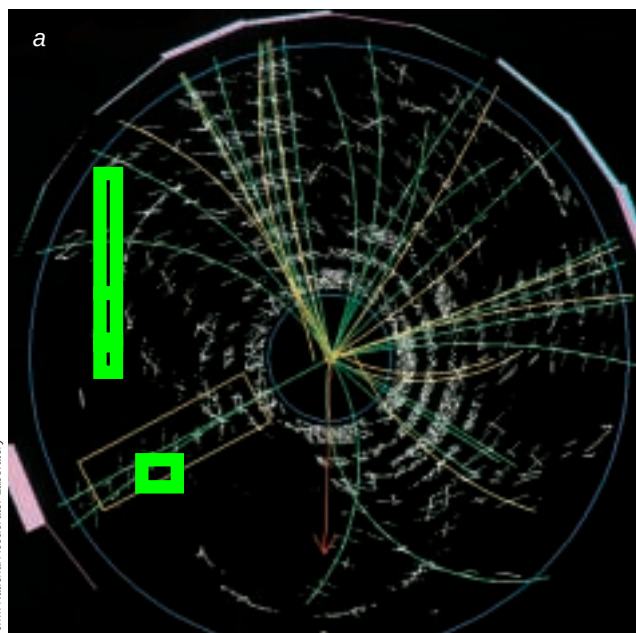
Conformément à une règle implicite, les résultats des analyses ne sont pas discutés en dehors de chaque groupe tant que les analyses ne sont pas terminées. Cependant, comme au moins trois physiciens ont un conjoint dans l'autre équipe, le secret dans la recherche du quark *top* paraissait difficile. Afin d'éviter les rumeurs, nous étions convenu que si l'un des groupes était sur le point de faire une annonce importante, il avertirait l'autre une semaine à l'avance. En nous fondant sur les meilleurs calculs théoriques, nous avions prévu qu'environ une collision sur dix milliards produirait un quark *top*. Le détecteur doit être suffisamment sensible pour extraire ces événements rares des différentes sources de bruit de fond.

Dix ans durant, les collaborations CDF et DØ ont construit d'énormes instruments, avec des centaines de milliers de canaux électroniques, afin d'identifier la «signature» du *top*, c'est-à-dire la trace qu'il laisserait dans le détecteur. Le détecteur CDF suit avec précision les particules individuelles dans un champ magnétique (en vue de mesurer leurs quantités de mouvement). La détection avec DØ est fon-

dée sur un calorimètre segmenté, qui mesure avec précision l'énergie de chaque collision.

Aus sitôt produits, le quark *top* et son antiparticule se désintègrent. Contrairement aux quarks *u* et *d*, qui sont stables, le quark *top* a une durée de vie d'un milliardième de milliardième de milliardième de seconde (10<sup>-24</sup> seconde). Le Modèle standard prédit que, si le quark *top* est suffisamment lourd, il se désintégrera presque toujours en un boson W et en un quark *b*. Ainsi, la création d'un quark *top* conduit à deux bosons W, un quark *b* et un antiquark *b*.

Malheureusement, ni les bosons W ni les quarks *b* ne sont observables directement. La durée de vie du boson W est analogue à celle du quark *top*. Le quark *b* est lui aussi instable, bien qu'il ait une vie moyenne plus longue que celle du *top*. En outre, des quarks isolés – ou «nus» – ne sont jamais observés : en raison de la force nucléaire forte qui lie les quarks, ceux-ci apparaissent toujours couplés à d'autres quarks ou à des antiquarks. Les quarks sont ainsi rassemblés par paires, nommées mesons, ou par triplets, nommés baryons (les protons et les neutrons, par exemple, sont des baryons). Dès qu'un quark est créé lors d'une collision, il «s'habille» d'un nuage de quarks et d'antiquarks. On observe alors un jet de particules qui se meuvent à peu près dans la même direction que le quark originel.



## Des jets partout

Le boson  $W$  peut se désintégrer en un quark et un antiquark de la même famille, comme un quark  $u$  et un antiquark  $d$ . Dans ce cas, le quark et l'antiquark se présentent dans un détecteur de particules sous la forme de deux jets. Cependant, le boson  $W$  peut aussi se désintégrer par la voie «leptonique», en un lepton chargé et un lepton neutre de la même famille, par exemple un électron et un neutrino.

Si le lepton chargé est un électron ou un muon (analogue à l'électron, mais plus massif), il peut directement être observé dans le détecteur. Toutefois, si c'est un tau (une version encore plus lourde de l'électron), il se désintègre assez rapidement, ce qui le rend difficile à identifier. D'autre part, le neutrino dont la masse est nulle ou très petite qui accompagne le lepton n'est pas détecté, car il interagit avec la matière par l'intermédiaire de la force faible. On détermine sa présence indirectement car il emporte une partie de la quantité de mouvement de la collision : lorsque l'on additionne les quantités de mouvement de toutes les particules vues dans le détecteur et que l'on observe une diminution notable de la quantité de mouvement, après la collision, on suppose qu'elle a été emportée par un neutrino.

En août 1992 nous avons repoussé la masse minimale du quark  $top$  à 91 GeV/c<sup>2</sup>. C'était un progrès impor-

tant, parce qu'il nous aidait à trouver le quark  $top$ . En effet, le boson  $W$  véhicule les forces entre quarks de la même famille comme entre le  $top$  et le  $b$ . Ainsi ces particules sont couplées et peuvent se désintégrer les unes en les autres. Si le quark  $top$  avait été léger – moins de 75 GeV/c<sup>2</sup> environ –, un boson  $W$ , dont la masse est égale à 80 GeV/c<sup>2</sup>, aurait pu se désintégrer en un quark  $top$  et un antiquark  $b$ . Nous savions alors que la seule manière de produire un quark  $top$  était de créer une paire quark-antiquark  $top$ .

L'une des caractéristiques d'une telle production est la présence de jets provenant des quarks  $b$ . Le quark  $b$  est éjecté avec d'autres particules qui constituent un méson ou un baryon, et il se désintègre un demi-millimètre après son point de création. En 1992, nous avons commencé à suivre précisément la trace des particules des jets en utilisant un instrument placé près de la région de collision des faisceaux (voir *Les détecteurs de particules en silicium*, par Alan Litke et Andreas Schwarz, *Pour la Science*, juillet 1995). Ce «détecteur de vertex» localise la trace d'une particule à 15 micromètres près (on nomme vertex le point de production des particules). En identifiant la plupart des traces dans un jet et en les extrapolant vers l'origine nous espérons découvrir le point de désintégration du quark  $b$  et identifier ainsi le jet comme provenant d'un quark  $b$ .

À l'époque, la technique des détecteurs en silicium était neuve, et nous

redoutions l'impact des milliards et des milliards de particules à travers le détecteur. Nous savions que le détecteur tout entier grillerait en une fraction de seconde si un incident dans l'accélérateur projetait le faisceau dessus. Aussi avons-nous conçu un dispositif de protection qui écarterait le faisceau du silicium en cas de problème. Alors même que nous appréhensions à nous servir du nouveau détecteur de vertex, l'équipe DØ mettait en service son nouveau détecteur, de l'autre côté de l'accélérateur.

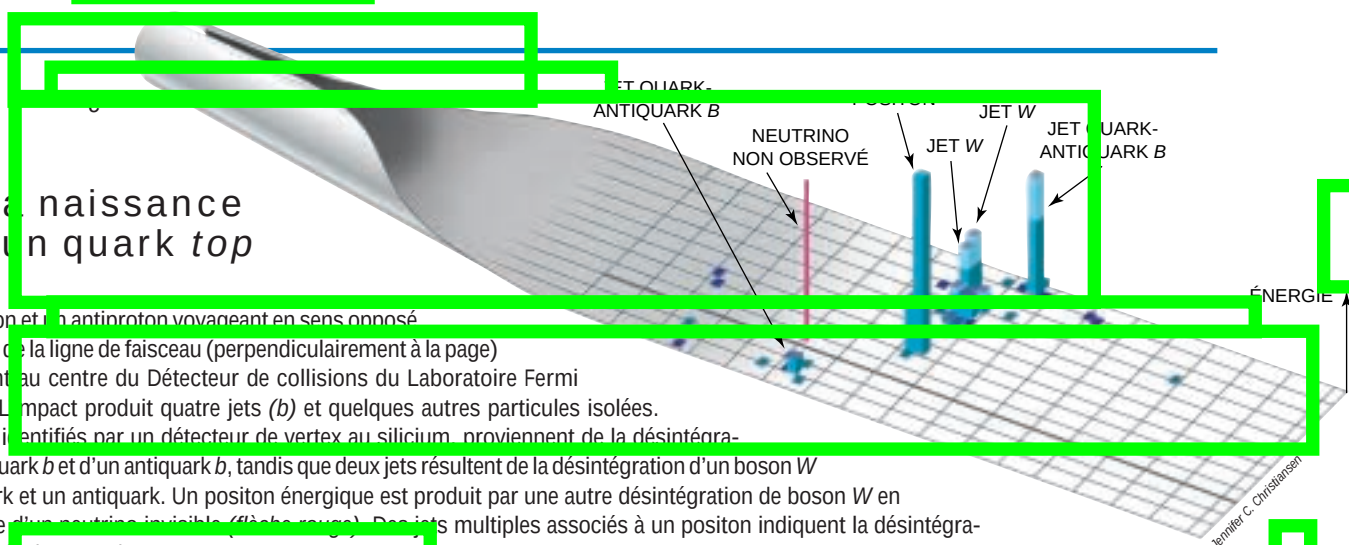
En octobre 1992, à peine trois mois plus tard nous apercevions le premier indice de la présence du quark  $top$  : une collision avait engendré un muon et un électron très énergiques, au moins deux jets, avec une quantité de mouvement totale qui avait beaucoup diminué. Nous avons analysé cet événement dans ses moindres détails et conclu qu'il provenait probablement de la désintégration d'un quark  $top$ . L'équipe DØ avait également observé un événement similaire, dont l'interprétation la plus probable était la présence d'un quark  $top$ .

Cependant, un seul événement ne suffisait pas. Il nous fallait observer le quark  $top$  de diverses manières, afin de vérifier qu'il n'était pas en présence d'un bruit de fond reproduisant aléatoirement la signature du quark  $top$ . Nous avons alors poursuivi l'analyse de nouvelles données encore plus méticuleusement, mais, devant

## La naissance d'un quark $top$

Un proton et un antiproton voyageant en sens opposé le long de la ligne de faisceau (perpendiculairement à la page) se heurtent au centre du Détecteur de collisions du Laboratoire Fermi (CDF) (a). L'impact produit quatre jets (b) et quelques autres particules isolées. Deux jets, identifiés par un détecteur de vertex au silicium, proviennent de la désintégration d'un quark  $b$  et d'un antiquark  $b$ , tandis que deux jets résultent de la désintégration d'un boson  $W$  en un quark et un antiquark. Un positon énergétique est produit par une autre désintégration de boson  $W$  en compagnie d'un neutrino invisible (flèche rouge). Des jets multiples associés à un positon indiquent la désintégration possible d'un quark  $top$ .

Un champ magnétique parallèle au faisceau courbe les trajectoires des particules chargées : la direction de courbure donne le signe de la charge de la particule, et le rayon de courbure indique sa quantité de mouvement. En outre, un calorimètre qui entoure la ligne du faisceau mesure les énergies des particules émergentes. Ses résultats sont représentés en (c). La hauteur d'un bloc indique l'énergie libérée par les particules dans le segment du calorimètre correspondant. La combinaison des dispositifs permet aux expérimentateurs de reconstruire l'événement originel (représenté page 68).



## Une masse prévue

Pendant près de 20 ans, le quark *top* a été l'une des pièces manquantes du Modèle standard de la physique des particules. Après la découverte de son partenaire, le quark *b*, en 1977, les recherches entreprises dans des accélérateurs d'énergie de plus en plus élevées sont restées infructueuses, ce qui indiquait une masse de plus en plus élevée pour le quark *top* (la gamme de masse couverte par un accélérateur est limitée par son énergie).

En parallèle des recherches directes, l'interprétation théorique de nombreuses mesures effectuées avec d'autres accélérateurs (dont le collisionneur électron-positon LEP du CERN) a permis de cerner la masse du quark *top* : même s'il n'apparaît pas directement dans la désintégration des bosons *W* et *Z*, il intervient de manière virtuelle. Ainsi, en mesurant précisément la masse du boson *W* et du *Z* et leur probabilité de désintégration en différentes particules, on estime indirectement la masse du quark *top*.

Dans le cadre du Modèle standard, ces interprétations indiquaient un intervalle de masse accessible au collisionneur proton-antiproton du laboratoire Fermi, le Tevatron. La masse estimée se situait en effet entre 140 et 200 GeV/c<sup>2</sup>, et l'énergie des faisceaux du Tevatron (900 GeV par faisceau) est suffisante pour produire des quarks de cette masse. Dans le Tevatron, cette énergie est atteinte à l'aide de dipôles supraconducteurs dont le puissant champ magnétique courbe les faisceaux dans un accélérateur circulaire de 6,28 kilomètres de circonférence.

Finalement, après les premières indications obtenues en 1994, la découverte du quark *top* a été annoncée officiellement en 1995 par les deux expériences fonctionnant sur le Tevatron, CDF et DØ. Pour obtenir quelques dizaines d'événements où le quark *top* a été détecté, il a été nécessaire d'observer plusieurs milliers de milliards de collisions entre protons et antiprotons car la production du quark *top* dans ces collisions est un phénomène rare. Pour extraire cette aiguille de

la botte de foin de toutes les collisions, il a fallu utiliser des traitements élaborés. Le nombre de collisions est tel qu'on ne les enregistre pas toutes : l'analyse en temps réel préselectionne les données intéressantes en utilisant toutes les possibilités des détecteurs. Les données sont ensuite exploitées par une analyse « hors-ligne ».

Les détecteurs sensibles et compliqués, dont la taille est de l'ordre d'une dizaine de mètres et dont certains éléments permettent de mesurer les points de passage des particules à la dizaine de micromètres près, ont été construits par des collaborations internationales regroupant plusieurs centaines de physiciens provenant de différents continents. Un groupe français, du Commissariat à l'énergie atomique de Saclay, a ainsi participé à l'expérience DØ pour la construction d'une partie du système d'identification des traces.

Avec les données accumulées auprès du Tevatron entre 1992 et 1996, certaines caractéristiques du quark *top* ont été mesurées, et sont en accord avec les prévisions théoriques. Des mesures plus précises seront effectuées lors de la prochaine campagne de prises de données du Tevatron, qui commencera en 1997, et se poursuivront dans le collisionneur proton-proton du CERN, le LHC, dont le démarrage est prévu en 2005. Cet accélérateur devra aussi permettre d'étudier un des aspects les plus méconnus de Modèle standard, qui est l'origine de la masse des différentes particules, notamment en cherchant le boson de Higgs. Après la découverte du quark *top*, ce boson de Higgs reste la seule particule prédite par le Modèle standard encore non observée à ce jour. La masse élevée du quark *top*, par rapport aux autres particules de matière, indique que celui-ci jouerait également un rôle particulier dans l'origine de la masse des particules.

Guillaume UNAL,  
Laboratoire de l'accélérateur  
linéaire, Orsay.

l'absence de résultats spectaculaires, nous savions que ce serait un travail de longue haleine.

Trois équipes analysaient les données fournies par le détecteur CDF. Pour le premier candidat quark *top* fut découvert par un groupe qui recherchait les événements à deux leptons (issus de la désintégration de deux bosons *W* et à au moins deux jets (provenant probablement des quarks *b*). Les deux autres groupes examinaient les événements à un lepton (désintégration d'un boson *W*) accompagné de jets (marquant de la désintégration de l'autre boson *W* et de quarks *b*). Ces deux équipes utilisaient des méthodes différentes : l'une employait les signaux de la chambre de vertex pour identifier les jets de quarks *b* ; l'autre recherchait les leptons de faible énergie, un autre révélateur de la désintégration d'un quark *b*.

Après un peu moins d'un an d'expérimentation, la limite de masse était poussée à 108 GeV/c<sup>2</sup> par l'équipe CDF et plus tard à 131 GeV/c<sup>2</sup> par l'équipe DØ, et nous étions toujours en train de chercher. Puis, en juillet 1993, lors d'une réunion de toute l'équipe CDF, les trois groupes présentèrent les résultats de leurs analyses en cours. Elles étaient très ambiguës individuellement, mais mises ensembles, elles offraient un indice probant de l'existence du quark *top*. L'un de nous (P. Tipton) devait bientôt se rendre à une conférence et présenter nos derniers résultats, mais nous avons jugé que cela serait prématuré, car la communauté des physiciens concourait que nous possédions de fortes indications de l'existence du quark *top* et demanderait à les vérifier. P. Tipton présenta donc seulement nos méthodes et les difficultés rencontrées dans la quête du *top*, sans mentionner les derniers résultats. Les rumeurs qui circulèrent alors immanquablement s'amplifièrent quand nous annulâmes un exposé prévu pour une conférence importante, au printemps 1994.

Parmi les milliers de milliards de collisions provoquées dans le détecteur CDF, nous avons isolé 12 événements qui semblaient provenir de la désintégration d'une paire quark-antiquark *top*. Comme d'autres mécanismes physiques ont une signature analogue, nous devions en estimer la probabilité. Après des mois d'efforts, nous avons calculé que 5,7 de ces événements devaient être des parasites. La probabilité que seul le bruit de fond

soit responsable des 12 événements était d'environ un sur 400 seulement.

Nous avons donc approfondi l'analyse des 12 événements. Une étude cruciale consistait à essayer de «reconstruire» la masse du *top*. En additionnant les énergies des jets et des leptons émis par une éventuelle paire quark-antiquark *top*, nous devions déduire la masse du quark *top*. Si les événements provenaient bien d'une paire, les masses calculées pour les différents événements devraient avoir toutes la même valeur : la masse réelle du quark *top*. Les masses calculées se révélèrent proches, ce qui donnait une masse du quark *top* d'environ 175 GeV/c<sup>2</sup>. Beaucoup d'entre nous furent alors convaincus que nous avions enfin détecté le quark *top*.

Nous pensions initialement écrire quatre articles, un pour chaque type d'analyse et un résumant les résultats. À la réunion suivante de notre groupe, ce que nous avons nommé entre nous le massacre d'octobre, les quatre équipes présentèrent les articles au reste de la collaboration. Les critiques furent sévères et justifiées, car les articles étaient incomplets et donnaient une image incohérente du travail. Nous avons abandonné l'idée de quatre articles, et un petit groupe (dont les deux auteurs) se mit à rédiger un article unique.

La conciliation des vues des 400 coauteurs fut un tour de force. En outre, alors que nous approchions du but, après quelques mois de travail, nous recevions des corrections de physiciens qui n'appartenaient pas à l'équipe CDF et qui n'auraient pas dû avoir le manuscrit. Après de nombreux débats, nous avons décidé de ne pas présenter les résultats comme une découverte, mais de signaler que nous avions une indication de l'existence du quark *top*. L'article fut soumis pour publication le 22 avril 1994, et la plupart d'entre nous pensaient que c'était un très bon article, le résultat d'un excellent processus démocratique que nous espérions ne jamais devoir renouveler.

Toutes les épreuves et la documentation furent dissimulées dans un sous-répertoire de l'ordinateur de notre secrétaire, mais cette protection fut inefficace car, juste avant l'annonce officielle, deux postdoctorants publièrent sur le réseau Internet un article théorique ironique. Sur la base d'une théo-

rie extravagante, ils «prédisaient» la masse du quark *top* – la valeur mesurée par CDF jusqu'à la dernière décimale – et proposaient leurs services par la même occasion.

## L'aboutissement

Quelques jours après la soumission de l'article, nous avons organisé un séminaire et une conférence de presse au Laboratoire Fermi pour annoncer la découverte. L'équipe DØ présenta aussi ses résultats : leurs données, bien que cohérentes avec celles de CDF, ne fournissaient pas d'indice convaincant de l'existence de quarks *top*, sauf dans le cas d'un événement enregistré au début de leur campagne de mesure. Cependant, le groupe avait supposé une valeur probable de la masse du quark *top* et n'était donc pas optimisé pour la recherche pour des valeurs élevées. L'équipe DØ reprit alors ses analyses et trouva quelques signes de

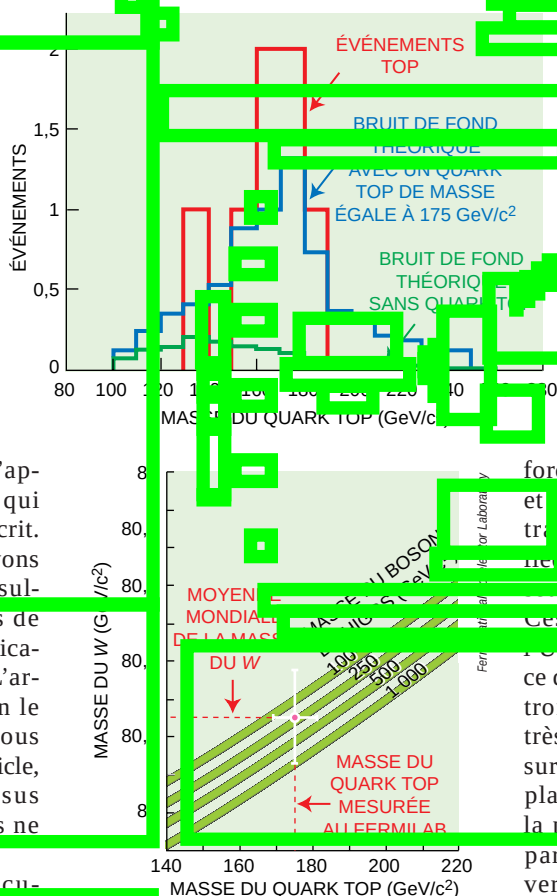
quark *top*. Entre-temps, les deux équipes collectèrent de nouvelles données, car nous avions besoin de deux fois plus d'événements pour confirmer la découverte. L'équipe CDF installa un nouveau détecteur de vertex au silicium, car le précédent avait été endommagé par l'irradiation. Nous avons mis au point de nouveaux algorithmes pour utiliser le détecteur de vertex dans la recherche d'événements *top*, mettant à profit notre expérience acquise. Lorsque suffisamment de données furent accumulées, le traitement révéla le quark *top* presque immédiatement.

Les présentations finales, le 2 mars 1995, montrèrent de façon convaincante que les détecteurs CDF et DØ avaient identifié des quarks *top*. Les deux équipes annoncèrent une mesure combinée de moins d'une chance sur 500 000 pour que les événements détectés soient issus seulement du bruit de fond.

Aujourd'hui, nous avons enregistré plus de 100 événements où apparaît un quark *top*. Nous avons également entamé certaines recherches préliminaires de phénomènes au-delà du Modèle standard. La masse très élevée du quark *top* – la valeur actuelle est de 175,6 GeV/c<sup>2</sup> – suggère qu'il serait fondamentalement différent des autres quarks. Ainsi, la physique sous-jacente pourrait nous conduire au-delà du Modèle standard qui, malgré son succès, laisse de nombreuses questions ouvertes.

Dans le Modèle standard, la force faible, assurée par les bosons W et Z, et l'interaction électromagnétique, transmise par les photons, sont unifiées, aux très hautes énergies, en une interaction nommée électrofaible. Ces énergies existaient au début de l'univers, mais le refroidissement de ce dernier nous montre les forces électromagnétique et faible sous des jours très différents. Le mécanisme de la brisure de cette symétrie initiale (ou découplage) est inconnu ; dans l'hypothèse la plus simple, elle serait provoquée par une particule, non encore découverte, nommée boson de Higgs.

À haute énergie, lorsque les forces électromagnétique et faible sont unifiées, les bosons W et Z, les photons, les leptons et les quarks sont tous de masse nulle. Aux énergies inférieures, lorsque la symétrie se brise, les bosons W et Z interagissent avec les



2. LA MASSE DU QUARK *TOP* calculée (en haut) à partir des 12 premiers événements identifiés par le détecteur CDF est voisine de 175 GeV/c<sup>2</sup>. Malheureusement, la précision sur les masses du quark *top* et du boson W est insuffisante (en bas) pour prédire la masse de la particule de Higgs. Cette masse est comprise entre 100 à 1 000 GeV/c<sup>2</sup>.

bosons du Higgs et deviennent massifs ; simultanément, les quarks et les leptons acquièrent également une masse.

Toutefois, tandis que les masses du boson W et du Z sont prédites par le Modèle standard, les physiciens doivent mesurer les masses des quarks et des leptons pour les décrire théoriquement : ils ajustent des paramètres qui décrivent l'intensité du « couplage » de chaque type de quark et de lepton avec le boson de Higgs.

Pour un électron, très léger, l'intensité de l'interaction est égale à  $3 \times 10^{-6}$  ; pour un quark *top*, elle est voisine de un. Ce couplage relativement fort avec le boson de Higgs et, dans une certaine mesure, la mystique associée à la valeur un, indiquent que le quark *top* jouerait un rôle particulier, mais lequel ?

En raison de sa masse élevée, le quark *top* est certainement le plus influent, en termes de ses interactions avec les autres particules. Une mesure précise de la masse du quark *top* et de la masse du boson W conduirait à une prédiction de la masse du boson de Higgs.

Certaines descriptions de la brisure de symétrie électrofaible ne font pas apparaître de boson de Higgs. Notamment l'une de ces théories parallèles le remplace par une paire quark-antiquark *top*. Il existe ainsi des particules lourdes qui se désintègrent en paires quark-antiquark, on devrait observer plus de quarks *top* qu'on n'en attend dans le cadre du Modèle standard.

## Le top ou top

Avec sa forte masse, le quark *top* devrait se désintégrer en nouvelles particules. Certains théoriciens ont proposé que quelques-uns des événements enregistrés par le détecteur CDF contiennent des particules supersymétriques (voir *La nature est-elle supersymétrique ?*, par Howard Haber et Gordon Kane, *Pour la Science*, août 1986). La supersymétrie est une symétrie postulée qui attribue à toute particule du Modèle standard d'un partenaire encore non découverts. Si ces partenaires existent et sont plus légers que le quark *top*, ils pourraient apparaître dans les événements que nous avons identifiés. Par exemple, un quark *top* peut se désintégrer en son partenaire supersymé-



**3. PRÈS D'UN MILLIER DE PHYSICIENS et de très nombreux techniciens ont utilisé les détecteurs CDF et DØ pour découvrir le quark top. Les premières pages de leurs articles respectifs relatant la découverte ne contiennent que des noms.**

trique (le « *top* »), tandis qu'un « gluino » (le partenaire hypothétique du gluon) se désintégrerait en une paire *top-stop*. Aujourd'hui, les possibilités sont variées : si l'augmentation du nombre de quarks *top* due au second mécanisme est compensée par la rarefaction de celui du premier mécanisme, on n'observerait pas plus, ni moins de quarks et d'antiquarks *top* que le Modèle standard n'en prévoit.

La supersymétrie ne prédit pas l'existence d'un seul boson de Higgs, mais d'une famille de quatre particules ou plus. Si elles existent et sont plus légères que le quark *top*, certaines de ces particules pourraient résulter des désintégrations des quarks *top*. Les équipes CDF et DØ cherchent ces particules hypothétiques, mais elles ne les ont pas trouvées.

Nous étudions une autre question fondamentale : les quarks sont-ils vraiment des particules élémentaires, sans constituants ? L'équipe CDF a récemment mesuré plus de jets de haute énergie qu'on n'en prévoyait. Au début du siècle, Ernest Rutherford révéla la présence des noyaux au sein des atomes par une diffusion des électrons à grand angle. De manière analogue, l'excès de jets énergétiques pourrait résulter de collisions entre des constituants des quarks plus petits qu'eux.

On ne retiendra cette conclusion que lorsqu'on aura éliminé toutes les autres possibilités. Notamment, on doit d'abord vérifier que la production

« excessive » de jets ne résulte pas de petites erreurs de prédiction. Nous étudions les différentes possibilités, et les données actuelles favorisent l'une de ces explications moins spectaculaires. Pour l'instant, nous devons conclure que le quark *top*, malgré sa masse importante, est dépourvu de sous-structure.

Enfin que le Laboratoire Fermi renove son accélérateur, les équipes CDF et DØ amélioreront considérablement leur détecteur. Nous recommencerons à étudier des collisions en 1999. L'accélérateur modifié produira 20 fois plus de quarks *top* que précédemment, et les détecteurs les identifieront avec plus d'efficacité. Les deux groupes trouveront ainsi des quarks *top* 30 fois plus vite que par le passé, ce qui permettra d'examiner plus en détail les caractéristiques de ce quark. En 2005, le Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN entrera en service. Il produira deux faisceaux de protons se heurtant à 4 TeV (tétra, ou  $10^{12}$ , électronvolts), soit sept fois l'énergie du collisionneur du Laboratoire Fermi, engendrant presque une paire de quark-antiquark *top* par seconde.

Ainsi, dans quelques années, les physiciens utiliseront le quark *top* pour étudier les nombreuses questions en suspens sur la matière et les forces qui gouvernent le monde physique. Quelles nouvelles lois physiques émergeront au-delà de ce que nous connaissons aujourd'hui ?

Tony JESS est physicien à l'Université de l'Illinois. Paul TIPTON travaille à l'Université de Rochester. Ils ont tous deux participé à la construction du détecteur CDF, au Laboratoire Fermi.

Steve WEINBERG, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, 1992.

F. ABLE et al., *Observation of Top Quark Production in pp Collisions with the Collider Detector at Fermilab*, in *Physical Review Letters*, vol. 74, n° 14, pp. 2626-2631, 3 avril 1995.

S. ABACHI et al., *Observation of the Top Quark*, in *Physical Review Letters*, vol. 74, n° 14, pp. 2632-2637, 3 avril 1995.

Chris QUIGG, *Top-Ology*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 5, pp. 20-26, mai 1997.



# L'archéologie à distance

FAROUK EL-BAZ

*Les techniques de télédétection transforment le travail des archéologues, qui n'ont plus à creuser la terre pour comprendre le passé*

**R**ub'ah-Khali, le «Quartier vide» d'Arabie, est un désert de plus de 770 000 kilomètres carrés. Les légendes rapportent qu'il était jadis plus accueillant : n'y avait-il pas la cité d'Ubar, une oasis située le long de la route de l'encens et que le Coran nomme la «Ville des Colonnes»? Thomas Lawrence lui-même, mieux connu sous le nom de Lawrence d'Arabie, a cherché, sans succès, cette «Atlantide des sables».

Où chercher Ubar? Récemment, la navette spatiale et des satellites *Landsat* ont détecté de fines lignes qui convergent en un point niché au sein des dunes. Ce point de convergence était-il un cimetière ou une ville? Des expéditions ont été organisées en 1990 et 1991, et des fouilles effectuées le long d'une route ont mis au jour la structure d'une ville fortifiée, enfouie depuis des siècles.

De l'autre côté de la planète, dans le désert du Nouveau-Mexique, la télédétection par radar de sondage terrestre a révélé l'existence d'autres vestiges, bien plus anciens. Les réflexions d'ondes radar émises dans le sol révèlent les différentes couches de terre et de roche, et même des restes de dinosaures. Des paléontologues ont ainsi dégagé des fossiles de dinosaures, dinosaures herbivores qui faisaient trembler le sol lorsqu'ils se déplaçaient.

Dans l'espace ou au sol, les instruments de télédétection sont de plus en plus utilisés par les archéologues. À l'aide de radars, de magnétomètres ou de sismomètres, ces derniers localisent plus facilement les sites à fouiller, et ils les explorent de pres sans les détruire. La pelle et la pioche sont progressivement remplacées par le radar, le magnétomètre ou le sismomètre, d'un maniement plus raffiné.

Bien que des aviateurs prennent des photographies depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, la télédétection n'est appliquée à la Terre que depuis 1968 : lorsque

les astromutes d'*Apollo* envoient les premières images de notre planète prises de la Lune, le public abasourdi contemple la sphère bleue sur le fond noir du vide spatial. Plus tard, des astronautes en orbite autour de la Terre aperçoivent la Grande Muraille de Chine, qui court dans les montagnes chinoises, et la Grande Pyramide, qui surplombe le plateau de Gizeh, à l'Ouest du Nil.

## Des ressources agricoles à l'archéologie

En 1972, la NASA lance le premier satellite *Landsat* d'observation et d'étude des régions agricoles. L'intensité du rayonnement infrarouge réfléchi par la végétation permet la prévision du rendement des récoltes (les plantes ont un fort pic d'émission dans l'infrarouge) : plus la récolte de blé est abondante, plus la réflexion correspondante est forte. Progressivement, des géographes, des géologues et des archéologues s'intéressent à ces images. À la fin des années 1970, des archéologues utilisent les satellites *Landsat* pour localiser des ruines Maya dans la jungle dense de la péninsule du Yucatán et d'anciennes constructions dans les plaines de Mésopotamie.

Puis, dans les années 1980, Thomas Sever, de la NASA, et Payson Sheets, de l'Université du Colorado, installent des caméras à infrarouge sur des avions : les photographies prises à basse altitude sont plus précises que celles fournies par les satellites. Dans la région de Ilarân, au Nord-Ouest du Costa Rica, ils observent une ligne bizarre et sinueuse. Sur certaines images, cette marque traversait en ligne droite les collines et les vallées : des fouilles de terrain confirment que ce sont des sentiers, tracés il y a 1 000 à 2 000 ans, qui relient des cimetières, des villages et des carrières.

Des routes anciennes sont aussi détectables par satellite, comme le prouve l'exemple d'Ubar, mais les détails

révélés par les photographies aériennes sont plus précis : T. Sever et P. Sheets ont facilement trouvé l'emplacement exact des pistes qu'ils cherchaient. La même année a été découvert, dans le canyon du Chaco, au Nouveau-Mexique, d'autres routes préhistoriques qui prouvent que la civilisation Chaco faisait partie d'un vaste réseau commercial.

En 1981, le Centre national d'études spatiales améliora notablement les outils de la télédétection grâce au satellite *SPOT*. Celui-ci produit des images multibandes, en observant simultanément et séparément dans le vert, l'orange-rouge et l'infrarouge proche. Sur ces images, les plus petits détails ont 20 mètres de côté. Un autre mode d'observation est possible, avec des capteurs sensibles à toutes les longueurs d'onde de la lumière visible : on obtient des images en noir et blanc, dont la résolution est abaissée à dix mètres (les trois premiers satellites *Landsat* avaient une précision inférieure à 80 mètres, et les deux suivants de 30 mètres). Les images de *SPOT* sont pas aussi précises que les photographies aériennes, mais elles couvrent des zones plus vastes, ce qui permet d'étudier une région entière. James Wileman et ses collègues, de l'Université de Boston, ont utilisé des photographies *SPOT* du Nord-Ouest de la Grèce pour retracer l'ancienne ligne littorale de la baie d'Ammoudhia, qui abritait un port important : ils ont cartographié les anciens chenaux et les bras de mer.

L'imagerie radar spatiale est un autre outil remarquable pour l'archéologie. Elle a été mise en œuvre pour la première fois lors du vol inaugural

**1. CETTE IMAGE RADAR de la péninsule arabe révèle d'anciennes pistes, invisibles du sol. Leur point de convergence serait la cité perdue d'Ubar. L'image, qui couvre une surface de plus 50 kilomètres sur 80, a été prise en 1994 de la navette spatiale *Endeavour*.**



Les pistes apparaissent comme des lignes rougeâtres. Certaines ont été utilisées récemment, mais des fouilles ont révélé que quelques-unes étaient parcourues il y a plusieurs milliers d'années.

Le lit d'une rivière asséchée apparaît en blanc.

Les zones en vert indiquent la présence d'un terrain désertique calcaire.

D'immenses dunes de sable s'étendent à travers les zones colorées en magenta.

NASA

de la navette spatiale, en novembre 1981, fournissant de nombreuses images de l'Est du Sahara. En 1984, puis en avril et en octobre 1994, des radars embarqués à bord de la navette spatiale ont enregistré des images de la péninsule arabique. Le plus récent de ces radars émet des ondes polarisées (dont le champ électrique est précisément orienté) dans deux directions, révélant des détails supplémentaires dans les régions photographiées.

## Les origines de l'Égypte antique

J'ai notamment utilisé les images radar du désert occidental de l'Égypte, à proximité de la frontière du Soudan. Le terrain est couvert d'une couche de sable épaisse et plate, seulement ponctuée par de petites collines. Sur les images radar, nous avons découvert les lits asséchés de trois grands fleuves dont la largeur avait atteint 20 kilomètres. Les collines étaient d'anciennes îles créées par l'érosion fluviale. Des haches, découvertes par les archéologues sur les rives de ces anciennes voies navigables, ont prouvé que des hommes y ont vécu il y a 200 000 ans. Sans le radar, comment aurions-nous soupçonné le passé de cette région, enfoui sous cinq mètres de sable ?

Cette découverte confirme l'hypothèse que le désert égyptien occidental, aujourd'hui l'endroit le plus sec de la planète, a été humide il y a 5 000 à 11 000 ans. Selon Fred Wendhorf, de l'Université méthodiste méridionale, la hauteur de pluie a augmenté dans cette région de moins de un à 20 millimètres par an, il y a 11 000 ans. Des plantes herbacées et des buissons épineux, semblables à ceux qui survivent dans des environnements arides actuels, tels que la Vallée de la Mort en Californie, sont alors apparus. Bien que le climat, instable, ait été marqué de nombreuses périodes de sécheresse, une culture fondée sur l'élevage se développa.

La fin de la période humide, il y a 5 000 ans, coïncide avec le début de la civilisation égyptienne antique. Ces deux événements seraient liés : l'Est du Sahara devenant plus aride, les pasteurs qui y vivaient se sont rapprochés de la seule source d'eau viable, le Nil, et se sont mêlés aux populations sédentaires qui en occupaient déjà les rives. Le mélange des cultures aurait fructifié. Les riverains vivaient en harmonie avec le fleuve, mesurant la force de ses crues annuelles et le canalisant pour irriguer leurs

## La télédétection à partir de l'espace...

Trois satellites **Landsat** fournissant des images numériques sont lancés dans les années 1970 sur des orbites polaires, de telles orbites survolant la totalité du Globe et se refermant sur elles-mêmes. Elles permettent d'obtenir régulièrement des images des mêmes régions. Les capteurs mesurent le rayonnement électromagnétique réfléchi par les matériaux à la surface de la Terre dans quatre bandes de longueur d'onde : vert, orange, rouge et infrarouge proche. La résolution est de 79 mètres, et chaque image mesure 185 kilomètres de côté.

**Landsat 1 et Landsat 5**, dans les années 1980, fournissaient des images d'une précision de 30 mètres dans sept bandes de longueur d'onde : trois dans la lumière visible (bleu, vert et rouge), une dans l'infrarouge proche, deux dans l'infrarouge moyen et une dans l'infrarouge thermique. Les différences entre les matériaux en surface étaient plus visibles.

Les satellites **SPOT** ont été lancés à partir de février 1986 par le Centre national d'études spatiales dans un but commercial. Pour chaque longueur d'onde d'observation, **SPOT** porte une ligne de capteurs perpendiculaire à sa direction de déplacement : lorsque le satellite avance, les capteurs balayent des lignes parallèles. Les images ne sont pas déformées comme avec **Landsat** qui, portant moins de capteurs, utilisait un miroir mobile pour balayer le champ d'observation. En outre, **SPOT** porte deux systèmes d'observation et peut viser en oblique : en combinant deux images prises sous des angles différents, on obtient des vues en relief.

Les radars émettent des micro-ondes vers la surface de la Terre, et ils enregistrent les réflexions. Les échos renvoyés par un terrain rocailleux sont généralement forts, ou « clairs » ; ceux de surfaces plus lisses sont faibles, ou « sombres ». La combinaison de plusieurs longueurs d'onde et de plusieurs polarisations fournit des images en fausses couleurs qui révèlent des détails. Les images radar montrent bien les éléments linéaires, tels les failles et les accarpements. Elles ont ainsi révélé plusieurs tracés d'un tronçon de la Grande Muraille de Chine qui n'étaient pas visibles avec d'autres systèmes d'imagerie.

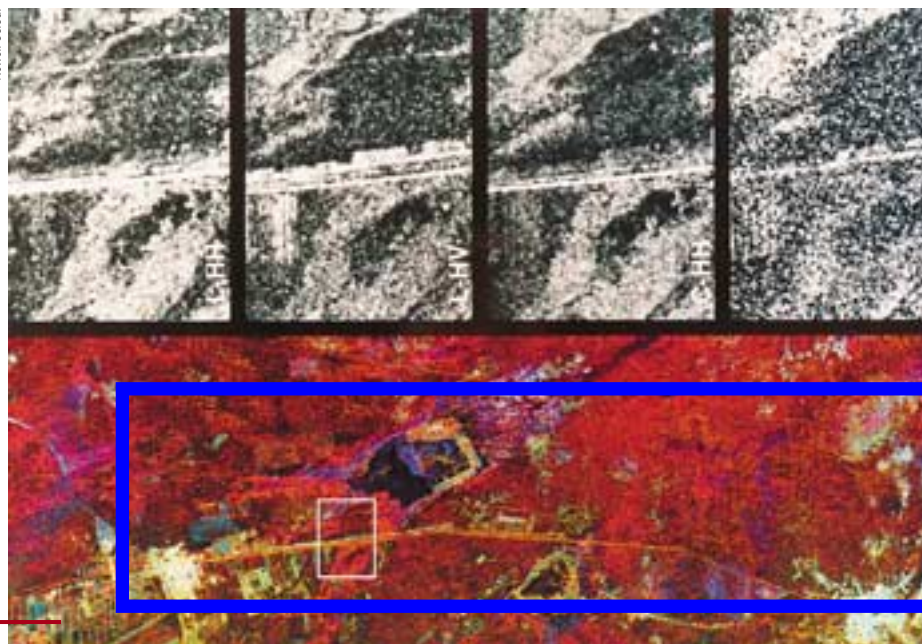
Le gouvernement américain a récemment publié des photographies prises entre 1960 et 1972 par des satellites espions. La précision de ces photographies en noir et blanc atteint deux mètres. Des prises de vues stéréophotographiques permettent de mesurer des hauteurs, informations importantes pour les recherches archéologiques. Des satellites commerciaux prendront bientôt des images avec une précision de un mètre. Quatre consortiums industriels projettent de lancer et d'utiliser de tels systèmes.



**DES TERTRES** construits sur une île, à l'embouchure de l'Amazone (en haut à gauche), ont été étudiés avec plusieurs méthodes de télédétection au sol (photographies de droite). L'emplacement et la nature des tertres ainsi déterminés sont indiqués sur le dessin du site (en bas à gauche).



Peinture : Sal C. Milano. Photographies : A.C. R. Leveit



UN TRONÇON DE LA GRANDE MURAILLE DE CHINE (en bas) apparaît comme une fine bande orange. Les images radar en noir et blanc, prises dans quatre bandes de longueur d'onde, correspondent à la région délimitée par le cadre. Les deux images de gauche fournissent la vue la plus claire de la région de la Muraille : la ligne claire continue date d'à peu près 600 ans ; juste au-dessus, la ligne claire discontinue est un vestige d'un mur plus ancien, construit il y a environ 1 500 ans. La Grande Muraille est bien visible sur ces images, car ses bords abrupts et lisses réfléchissent le faisceau radar. L'image radar permet aux archéologues chinois d'étudier les premiers traces de la Grande Muraille sur de longues portions. Prise de la navette Endeavour en 1994, l'image du bas montre une région de 25 kilomètres sur 75.

## ...et sur Terre

**Des sondes électromagnétiques** indiquent les différences de propriétés électriques ou magnétiques entre les couches de surface et les couches sous-jacentes d'une part, et d'autres éléments, tels des roches ou des saurs enfouis d'autre part. Elles sont sensibles jusqu'à une profondeur de six mètres.

**Le radar de sondage terrestre** «voit» dans le sol. Les radars habituels émettent des micro-ondes qui ne pénètrent que de quelques centimètres dans la plupart des sols. En revanche, les radars de sondage terrestre emploient des ondes de fréquences proches de celles qui sont utilisées par les radios à modulation de fréquence ou par les chaînes de télévision, qui se propagent jusqu'à dix mètres de profondeur. Ces ondes se réfléchissent sur les interfaces des différentes couches de terre, de sable, d'argile, de roches ou de matériaux apportés par l'homme. Plus ces interfaces sont profondes, plus l'onde rencontre met de temps pour retourner vers la surface, indiquant ainsi la profondeur à laquelle est enterré l'objet.

**Des magnéto-mètres** révèlent les structures souterraines qui modifient localement le champ magnétique terrestre. La terre crée des foyers, par exemple, tenant l'orientation passée du champ magnétique terrestre, et son aimantation est légèrement différente de celle du terrain environnant. Le magnéto-mètre à protons, le plus utilisé par les archéologues, mesure le champ magnétique local en soumettant un liquide riche en protons (de l'eau acide ou du benzène) à un champ magnétique alternatif artificiel très intense.

**Des instruments de mesure de la résistivité électrique du sol** indiquent des variations dans la composition des couches sous-jacentes. Les différences de résistivité enregistrées en différents points d'un site sont des indices pour la localisation des objets enfouis.

**Les archéologues utilisent des sismomètres** quasi identiques à ceux qui détectent et enregistrent les vibrations provoquées par des tremblements de terre, mais sensibles à des ondes sonores produites artificiellement. Le temps de déplacement d'une onde et de ses réflexions sont enregistrées, et l'on dresse ainsi une image sismique du sous-sol. Plusieurs instruments sismiques peuvent sonder le sol bien plus profondément que les autres capteurs.

champs. Leurs pensées étaient tournées vers la terre, dont ils avaient développé la connaissance. Les pasteurs de l'Ouest avaient la «sagesse du désert». Ils savaient vivre avec des précipitations capricieuses et rechercher des prairies plus verdoyantes. Afin d'échapper à la chaleur intense du soleil, ils se déplaçaient de nuit, où ils pratiquaient l'astronomie. Les nomades avaient le regard tourné vers le ciel, cherchant la place de l'homme dans l'Univers. On retrouve cette tendance philosophique à travers toute l'histoire de l'Égypte. L'arrivée des nomades sur les rives du Nil, accroissant la population, a imposé une meilleure organisation sociale, afin de produire assez de nourriture. L'interaction culturelle des deux groupes a créé une nouvelle société, à l'origine de la civilisation antique égyptienne.

## La télédétection au sol

D'autres outils de télédétection, encore peu utilisés, facilitent le travail de terrain des archéologues. Généralement, lorsque ces derniers étudient un site, ils le quadrillent avec des cordes et sondent aux intersections du quadrillage. Le risque est grand de manquer des découvertes. En revanche, la télédétection de surface indique les emplacements *a priori* les plus intéressants, réduisant les surfaces à creuser et permettant de gagner du temps.

À New York, au musée Field de Chicago, on utilisait de tels outils pour étudier des cultures préhistoriques de la partie brésilienne de l'Amazonie. Ses travaux ont remis en question plusieurs théories. Ainsi, sur l'île de Marajó à l'embouchure de l'Amazone, elle a utilisé des instruments variés (voir l'encadré ci-contre) pour étudier les tertres construits par une population qui vivait de la pêche, de l'agriculture et de la cueillette. Un balayage avec un magnéto-mètre à protons de plusieurs mètres de trois hectares de largeur et dont la hauteur variait entre sept et dix mètres a permis de repérer les grands foyers d'argile de plusieurs maisons. Un radar de sondage terrestre a révélé des couches de terre remuées, tandis que des mesures de la conductivité électrique du sol ont montré la structure sous-jacente du terrain, avec différentes strates et des modifications liées à la présence de constructions, de foyers et de remplissage par des déchets. Un sismomètre a révélé plusieurs étapes de construction, ainsi que

la position du sol initial, sur lequel les tertres avaient été construits.

Ces résultats, ainsi que les fouilles qui ont suivi, donnent une image de la vie sur les rives de l'Amazonie entre l'an 500 et l'arrivée des Européens, au milieu du XII<sup>e</sup> siècle. Les peuples de Marajo vivaient dans des territoires séparés, en

guerre les uns avec les autres. Ils cueillaient des fruits et récoltaient leurs propres cultures. Leurs habitations étaient aux sommets des tertres, surélevées par rapport au marais; pendant plusieurs siècles, ils construisirent leurs maisons sur les ruines des précédentes. Cette culture perfectionnée était d'ori-

gine locale, contrairement à l'hypothèse selon laquelle la nature luxuriante de la forêt aurait empêché les sociétés indiennes de se complexifier.

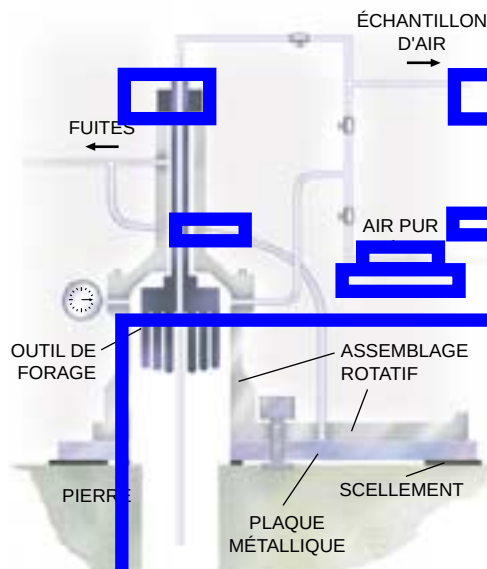
Près de Santarém, dans le Nord-Est du Brésil, M. Roosevelt a fait une découverte encore plus importante pour l'histoire du peuplement de l'Amérique, parce qu'elle démontre que, contrairement à ce que les archéologues pensaient, la poterie n'a pas été apportée en Amazonie par les Indiens du Mexique et du Pérou. Un radar à pénétration terrestre et des études sismiques ont, en effet, révélé la présence de poteries dans des couches qui étaient occupées il y a 7 000 ans. D'autres sites ont livré ensuite des poteries amazoniennes antérieures de plusieurs milliers d'années aux plus anciennes poteries trouvées à l'Ouest du continent, confirmant cette découverte.

Le principal risque auquel les sites archéologiques sont exposés après leur fouille est leur destruction, par l'érosion, par les visiteurs ou par les pilleurs. Des monuments aussi célèbres et précieux que les temples d'Angkor, au Cambodge, ou le Machu Picchu, au Pérou, se dégradent. Le meilleur moyen de préserver un site est de l'étudier en y touchant le moins possible.

## Les barques de Khéops

Ma première expérience d'utilisation de la télédétection dans ce but remonte à 1987 lors de travaux menés sur la Grande Pyramide de Gizeh. Construite par le pharaon Khéops il y a 4 600 ans, la pyramide a deux chambres scellées près de sa base. La première chambre, ouverte en 1954, contenait une barque démontée, longue de 43,4 mètres et large de 5,3 mètres. Il fallut 18 ans pour dégager et assembler cette embarcation royale, qui fut finalement accueillie par un «Musée nautique», construit à cet effet sur le site. Présentée au public depuis 1982, cette embarcation est très visitée.

Elle est toutefois menacée : sa longueur aurait diminué de 50 centimètres depuis qu'elle a été placée dans le musée, parce que les conditions atmosphériques à l'intérieur du musée diffèrent de celles qui régnaient dans la pyramide. Je fus alors sollicité pour étudier les conditions climatiques à l'intérieur de la seconde chambre scellée, qui contenait probablement une seconde barque, et faire des propositions pour la préservation de la première barque.



**2. LA GRANDE PYRAMIDE DE KHÉOPS** (en haut à gauche) contient deux chambres qui abritaient des barques royales démontées. La première a été ouverte en 1954, et la barque qu'elle contenait a été remontée, dans un musée construit près de la pyramide (ci-dessous). Toutefois, cette barque se dégrade lentement. La seconde barque a été laissée en place, et la chambre qui la contient a été étudiée de l'extérieur. En haut à droite, un ouvrier prépare un trou que l'on a recouvert d'un sas spécialement conçu pour éviter l'introduction d'air extérieur dans la chambre. Sur une plaque d'acier scellée à la pierre, un assemblage rotatif permettait soit d'aligner les trous de la plaque et de la pierre, pendant le forage et l'exploration, soit de boucher le trou lors du changement des mèches de forage ou des têtes des sondes. Une photographie prise à travers ce dispositif montre les éléments empilés de la barque.

Photographies : Farouk El-Baz. Dessin : Laurie

## SPOT et les cadastres romains

Selon Hérodote, les anciens Égyptiens seraient devenus géomètres afin de borner rigoureusement leurs champs, inondés chaque année par les crues du Nil. Le découpage régulier des terrains agricoles a été pratiqué à diverses époques, en différents points du Globe. Ainsi, au début de notre ère, l'administration romaine a étendu un réseau cadastral sur une partie du bassin méditerranéen. Dans le Sud de la France, des limites de parcelles actuelles conservent des traces de ce découpage, que la télédétection permet d'identifier.

Dès 1972, les images des satellites *Landsat* ont étendu les possibilités d'étude à des régions dont les photographies aériennes n'étaient pas disponibles, mais leur faible résolution au sol ne permettait qu'un repérage approximatif des directions, et seulement lorsqu'elles étaient régulières sur de grandes surfaces. Les satellites *SPOT*, dont les photographies ont une résolution de dix mètres, se rapprochent de l'outil idéal, qui aurait une résolution de quatre ou cinq mètres, la largeur moyenne des chemins limites et des haies.

L'utilisation des images *SPOT* facilite d'abord la photo-interprétation directe. L'orbite d'un satellite *SPOT* se referme sur elle-même : on peut obtenir plusieurs images, à partir du même point et sous le même angle, du secteur que l'on souhaite étudier, dans des conditions de végétation et d'humidité, donc de contraste, variées. Nous combinons ces images afin de faire ressortir les limites entre les parcelles, qui nous intéressent. En outre, on peut corriger géométriquement ces images et les orienter au Nord : on étudie alors directement les orientations des grands alignements de limites, traces des anciens axes du cadastre. La plupart du temps, ces

traces ne sont ni parfaitement rectilignes, ni parfaitement parallèles à grande distance. Ces distorsions proviennent-elles d'imprécisions du tracé originel ou de remaniements postérieurs? On distingue entre ces deux phénomènes en étudiant la régularité des tracés et l'aspect systématique ou non des distorsions.

Au-delà de l'étude visuelle des images, on étudie les régularités dans le tracé des limites de champs à l'aide de la transformation de Fourier. Cette opération mathématique transforme l'image en une distribution de points visible directement, mais qui permet de calculer les espacements les plus fréquents entre les limites de champs parallèles à une orientation donnée. On cherche alors s'il existe des couples de directions perpendiculaires pour lesquelles de nombreuses limites sont espacées des mêmes distances. Ces couples sont l'expression statistique de vestiges d'organisations à mailles périodiques orthogonales que l'on peut essayer de caractériser ensuite, par exemple par l'emploi d'une unité connue.

Ainsi, sur la transformée de Fourier d'une image *SPOT* de la région située à l'Ouest d'Orange, nous avons observé des concentrations de points correspondant à des distances de 139 à 144 mètres associées à deux directions perpendiculaires entre elles. Il en est de même pour les distances de 165 à 168 mètres, puis de 218 à 245 mètres. Ces distances ne sont pas quelconques : elles correspondent respectivement au cinquième, au quart et au tiers de centurie, unités utilisées, précisément, pour le découpage des cadastres romains.

Jean DELÉZIR, CNES  
Max GUY, IFP / GDTA

Afin de prélever un échantillon de l'air de la seconde chambre, que je pensais hermétiquement scellée, comme la première, j'ai fait appel à Bob Moores, ingénieur de la Société *Black et Decker* qui avait participé à la conception d'une perceuse lunaire utilisée par les astronautes. Celui-ci mit au point un sas qui permet de percer la pierre sans mélanger l'air de l'intérieur de la chambre avec l'air de l'extérieur. Nous avons utilisé un radar de sondage terrestre afin de déterminer la forme de la pièce et de choisir un site propice au forage.

Après deux jours et demi de forage, nous avons percé la pierre sur une épaisseur de 150 centimètres. Nous avons alors inséré une sonde et prélevé de l'air à trois hauteurs différentes. Ensuite, nous avons descendu une caméra dans le trou, découvrant des hiéroglyphes sur les murs, ainsi que la seconde barque attendue. L'analyse de

l'air, la détection de moisissures sur les murs et l'observation d'un scarabée du désert vivant dans la chambre prouvaient que cette dernière communiquait avec l'extérieur. Cependant, nous n'avons pas voulu endommager la barque qui s'y trouve : nous avons donc colmaté le trou et laissé le passé royal dans l'attente où nous l'avions trouvé.

L'archéologie non destructive va encore plus loin. Des archéologues anglais ont récemment localisé une cité romaine enfouie sous le village de Wroxeter sans endommager le village ni les champs qui l'entourent. Ils ont identifié des rues, des magasins et ce qui pourrait être une église. Une simulation informatique fondée sur les mesures offre une image de cette ville densément peuplée, aujourd'hui disparue. Dans notre recherche du passé enfoui sous terre, nous en apprendrons bientôt autant sans toucher aux objets qu'en les déterrants.

Farouk ELBAZ dirige le centre de télédétection de l'Université de Boston.

Diane EVANS, Ellen STOFAN, Thomas JONES et Linda GODWIN, *La Terre vue du ciel* in *Pour la Science*, février 1995.

D. GOODMAN, *Ground-Penetrating Radar Simulation in Engineering and Archaeology*, in *Geophysics*, vol. 59, n° 2, pp. 224-231, février 1994.

E. Pendleton BANKS, *Remote Sensing and the Archaeology of the Silk Road*, in *Current Anthropology*, vol. 36, n° 3, p. 520, juin 1995.

Martin J.F. POWERS, *High Resolution Satellite Imagery in Archaeological Application ; With a Photograph of the Stonehenge Region*, in *Antiquity*, vol. 70, n° 269, pp. 667-670, septembre 1996.

A.M. MONTUFO, *The Use of Satellite Imagery and Digital Image Processing in Landscape Archaeology : A Case Study from the Island of Mallorca, Spain*, in *Geoarchaeology*, vol. 12, n° 1, pp. 71-92, janvier 1997.

# Pourquoi certaines personnes résistent au SIDA

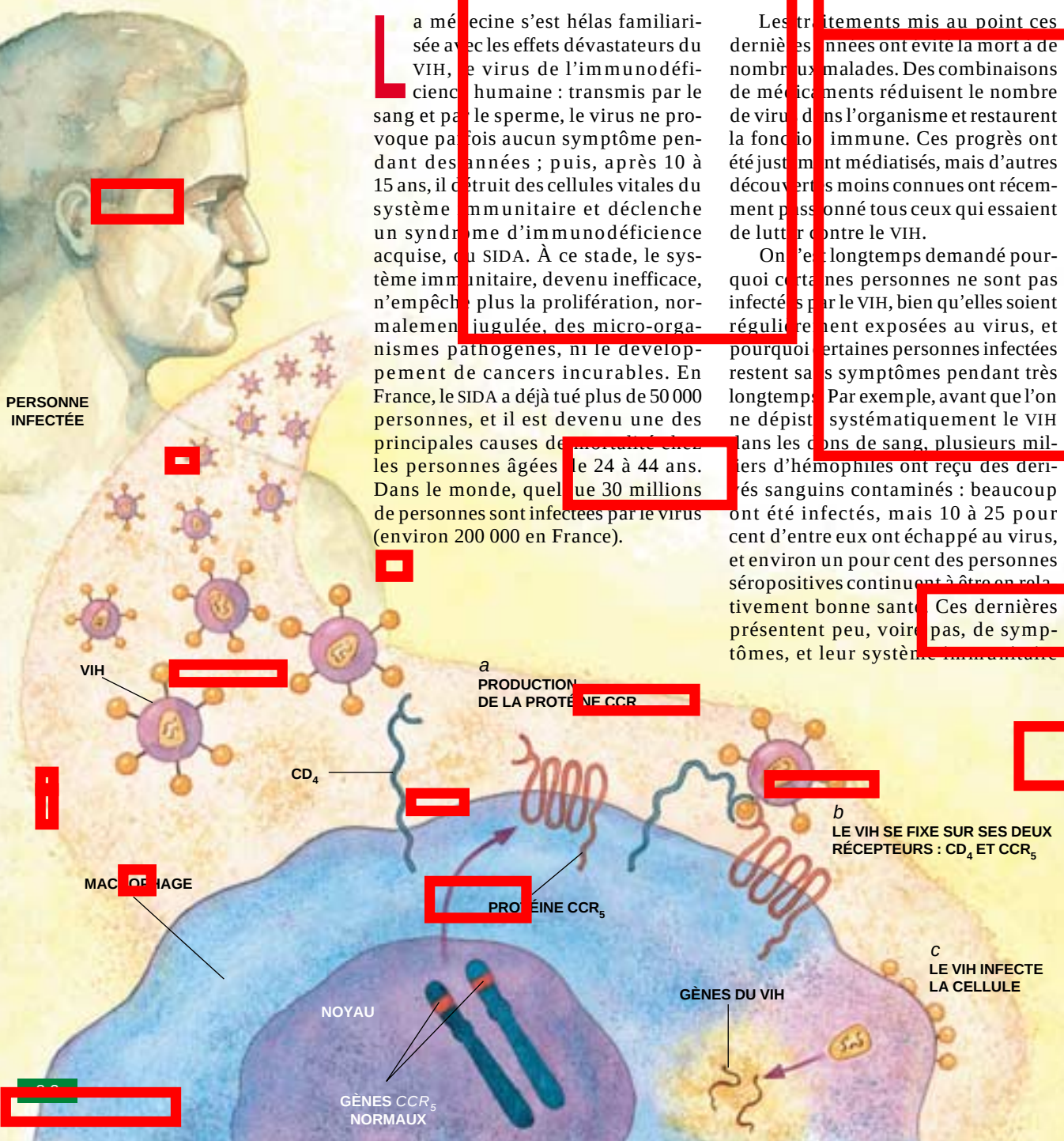
STEPHEN O'BRIEN • MICHAEL DEAN

*La découverte d'un gène qui protège contre le SIDA ouvre de nouvelles voies de recherche sur le traitement et sur la prévention.*

La médecine s'est hélas familiarisée avec les effets dévastateurs du VIH, le virus de l'immunodéficience humaine : transmis par le sang et par le sperme, le virus ne provoque parfois aucun symptôme pendant des années ; puis, après 10 à 15 ans, il détruit des cellules vitales du système immunitaire et déclenche un syndrome d'immunodéficience acquise, ou SIDA. À ce stade, le système immunitaire, devenu inefficace, n'empêche plus la prolifération, normalement jugulée, des micro-organismes pathogènes, ni le développement de cancers incurables. En France, le SIDA a déjà tué plus de 50 000 personnes, et il est devenu une des principales causes de mortalité chez les personnes âgées de 24 à 44 ans. Dans le monde, quelque 30 millions de personnes sont infectées par le virus (environ 200 000 en France).

Les traitements mis au point ces dernières années ont évité la mort à de nombreux malades. Des combinaisons de médicaments réduisent le nombre de virus dans l'organisme et restaurent la fonction immune. Ces progrès ont été justement médiatisés, mais d'autres découvertes moins connues ont récemment passionné tous ceux qui essaient de lutter contre le VIH.

On s'est longtemps demandé pourquoi certaines personnes ne sont pas infectées par le VIH, bien qu'elles soient régulièrement exposées au virus, et pourquoi certaines personnes infectées restent sans symptômes pendant très longtemps. Par exemple, avant que l'on ne dépiste systématiquement le VIH dans les dons de sang, plusieurs milliers d'hémophiles ont reçu des dérivés sanguins contaminés : beaucoup ont été infectés, mais 10 à 25 pour cent d'entre eux ont échappé au virus, et environ un pour cent des personnes séropositives continuent à être en relativement bonne santé. Ces dernières présentent peu, voire pas, de symptômes, et leur système immunitaire



fonctionnent correctement, malgré plus de 15 ans d'infection.

D'après les découvertes récentes, certaines personnes seraient partiellement ou totalement résistantes à l'infection parce qu'elles ont dans leur génome une forme particulière d'un gène du système immunitaire. Plusieurs équipes tentent d'appliquer ces découvertes à l'élaboration de nouvelles stratégies de prévention et de nouveaux traitements.

## Le paradoxe des animaux résistants

La découverte du premier gène de résistance au VIH a été un travail de longue haleine dont le rythme s'est soudain accéléré (nous utilisons ici le terme VIH pour désigner le VIH-1, le virus responsable de la plupart des cas de SIDA dans le monde ; une autre forme du virus, le VIH-2, provoque le SIDA plus lentement et il est cantonné dans certaines régions de l'Afrique ; la résistance génétique au VIH-2 n'a pas encore été étudiée). Avec nos collègues de l'Institut américain du cancer, nous avons entrepris la recherche de gènes de ce type dès 1984, tout juste un an après l'identification du VIH comme étant la cause du SIDA, et trois ans après la description de la maladie.

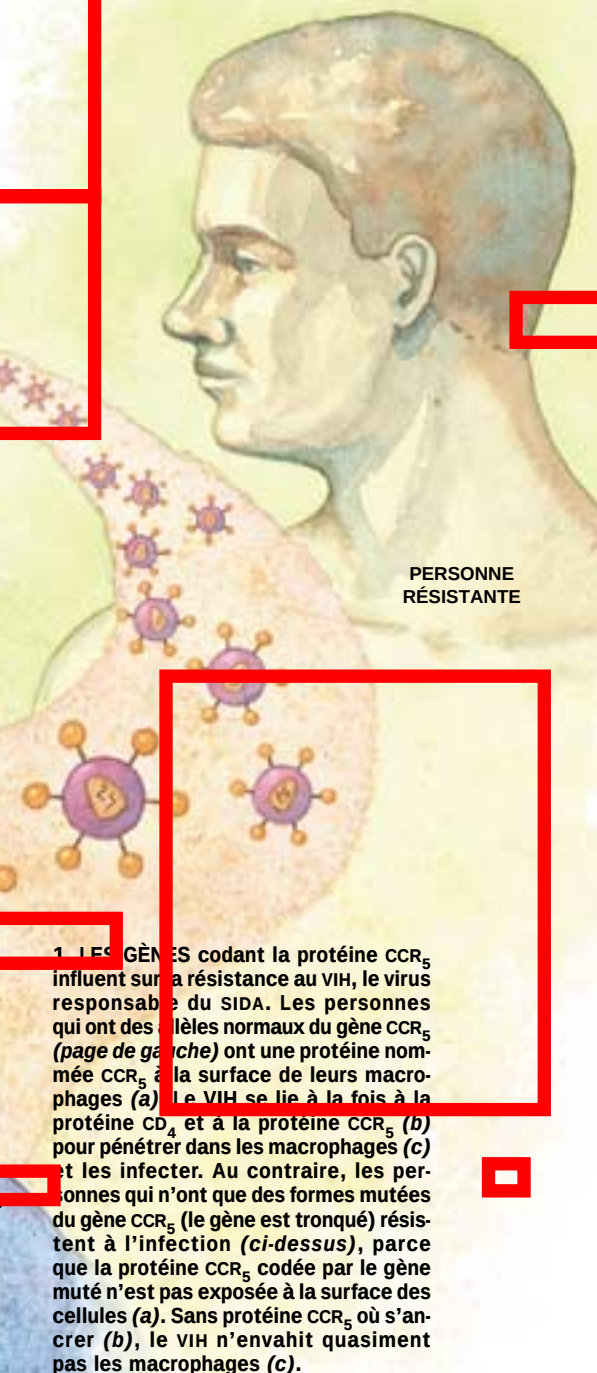
Dans les années 1980, pour comprendre pourquoi des personnes exposées de la même façon au VIH réagissaient différemment, la plupart des biologistes se sont intéressés aux caractéristiques génétiques du virus (par exemple, aux variations de virulence entre les souches) ou aux cofacteurs non génétiques qui peuvent modifier le pou-

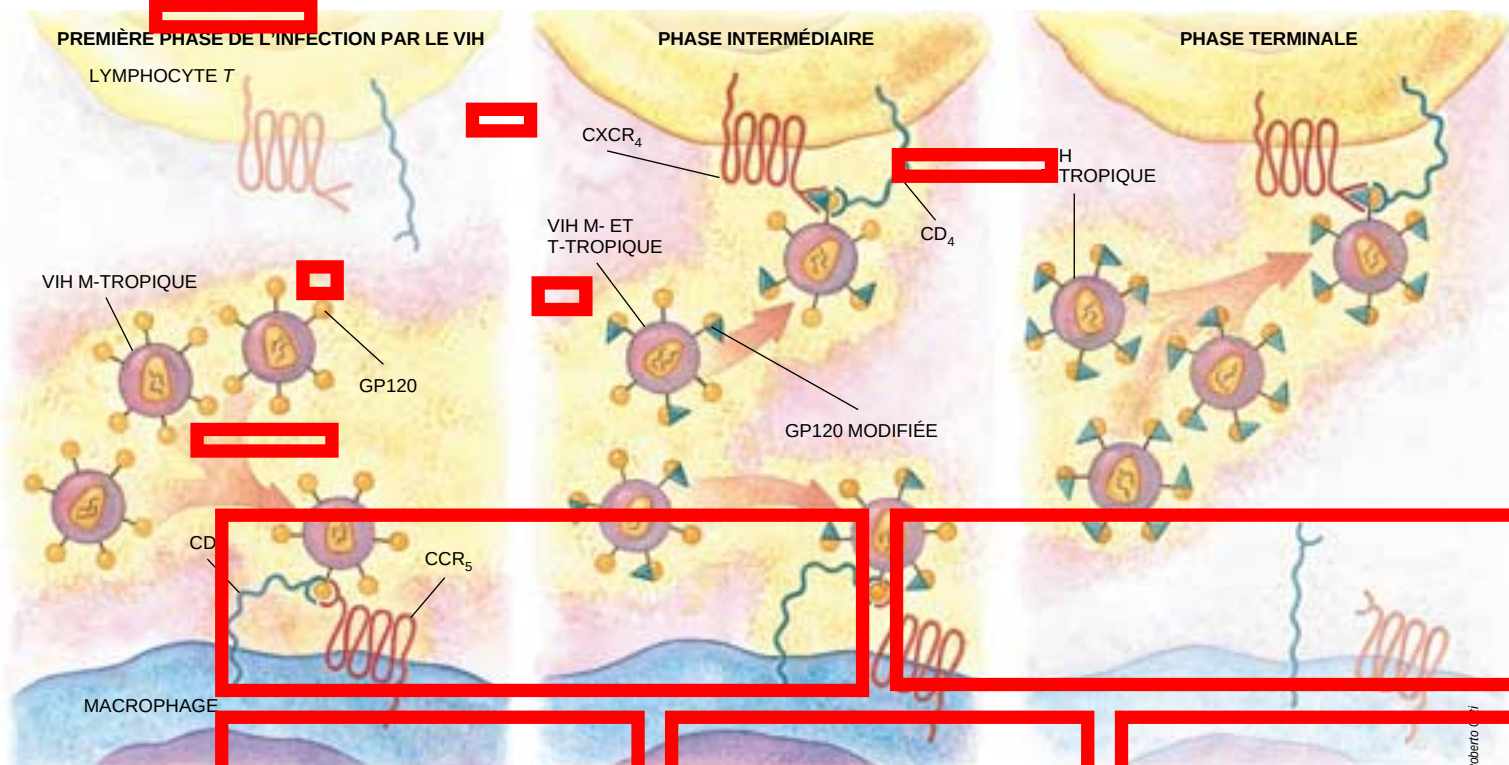
voir infectieux du virus (par exemple, l'infection de l'hôte par un autre micro-organisme). À l'époque, nous n'avions pas de données sur une éventuelle protection génétique contre le SIDA, de sorte que certains de nos collègues doutaient de notre démarche.

Toutefois, nous avions des raisons de croire en cette dernière : des études sur des animaux avaient montré que certains gènes modulent le développement des infections, notamment celles que provoquent les rétrovirus, la famille de virus à laquelle appartient le VIH. La plupart des gènes dirigent la synthèse des protéines, les molécules qui assurent la majorité des activités biochimiques, dans les cellules : quand un gène codant une protéine est activé, la séquence de ses sous-unités constitutives, les nucléotides de l'ADN, guide l'assemblage des acides aminés en une longue chaîne, la protéine. Aussi, quand un gène est polymorphe, c'est-à-dire qu'il en existe des formes légèrement différentes chez les divers individus d'une population, ses variants, ou allèles, codent des protéines qui n'ont pas toutes la même efficacité. Chez la souris, par exemple, des allèles d'une trentaine de gènes confèrent une résistance aux rétrovirus.

D'autres travaux chez l'animal avaient aussi montré qu'il existe une composante génétique dans les maladies infectieuses. Ainsi, on sait que les souris, les rats et le bétail consanguins sont plus sensibles aux maladies contagieuses, parce que la consanguinité limite leur répertoire des

allèles de résistance aux maladies. Dans les groupes non consanguins, une partie de la population a des chances d'avoir un allèle qui la protège contre un agent pathogène ; cet allèle permettra à ce petit groupe de survivre à une épidémie. Parce que l'espèce humaine est génétiquement très variée, nous pensions qu'elle devait, comme d'autres espèces non consanguines, avoir quelques puissants allèles de résistance aux maladies. Nous voulions découvrir ces allèles, parmi lesquels se trouvaient peut-être des défenses contre le VIH.





**2. L'AFFINITÉ DU VIH pour les cellules immunitaires change au cours du temps, chez les personnes infectées. Au début de l'infection, le virus est M-tropique (à gauche), c'est-à-dire qu'il infecte les macrophages en se liant (grâce à sa protéine gp120) aux récepteurs  $CD_4$  et  $CCR_5$ , présents à leur surface. Puis les nouvelles particules virales ont un double tropisme (au centre) : elles produisent des molécules gp120 capables de reconnaître la protéine  $CXCR_4$**

**des lymphocytes T portant la protéine  $CD_4$ , de sorte qu'elles infectent à la fois les macrophages et les lymphocytes T. Au cours de la phase finale, la majorité de la population virale devient T-tropique : les virus se lient de préférence au récepteur  $CXCR_4$  des lymphocytes T portant le récepteur  $CD_4$  (à droite). Les virus T-tropiques détruisent rapidement les lymphocytes T infectés et contribuent ainsi à l'effondrement du système immunitaire et à l'apparition du SIDA.**

De plus, bien que seul un petit nombre d'allèles de résistance aux agents pathogènes aient été identifiés avec certitude chez l'homme, plusieurs études épidémiologiques avaient montré que la sensibilité humaine aux maladies a une composante génétique : quand un parent biologique d'un enfant adopté meurt d'une maladie infectieuse avant 50 ans, la personne adoptée a notablement plus de risques de mourir aussi d'une maladie infectieuse que la normale.

Comment découvrir les allèles de résistance au VIH chez l'homme ? Nous avons combiné les connaissances et les méthodes de trois disciplines : l'épidémiologie du SIDA, la génétique moléculaire humaine et la génétique des populations.

## Chasseurs de gènes

Nous avons commencé par chercher les gènes de personnes à haut risque en comparant des personnes qui avaient été contaminées après avoir été exposées au virus et des personnes qui étaient restées indemnes. En déterminant les allèles spécifiques de chaque

groupe, nous espérions trouver les gènes polymorphes qui déterminent la résistance au VIH.

Nous nous sommes associés à des épidémiologistes qui tentaient de comprendre l'évolution de cette nouvelle épidémie. Ils enrôlaient des groupes de plusieurs centaines de personnes à risque, notamment des homosexuels, des toxicomanes et des hémophiles auxquels on avait administré des dérivés sanguins contaminés, et ils suivaient ces personnes pendant plusieurs années : avec la permission des personnes des «cohortes», des médecins transmettaient du sang et des échantillons de tissus aux chercheurs. À mesure que le sang était collecté, notre équipe de biologie cellulaire produisait des lignées de cellules immortalisées capables de fournir des quantités illimitées d'ADN pour les tests génétiques.

Pour sélectionner les gènes à comparer, nous avons utilisé les techniques récentes de la cartographie génétique, qui permettent de localiser les gènes sur les chromosomes et de déterminer leur séquence nucléotidique. Sur les 50 000 à 100 000 gènes que contiennent les chromosomes humains, plus de 6 000 ont été

ainsi cartographiés, alors que moins de 1 000 l'étaient en 1984. Néanmoins, il était impossible de tester ne serait-ce que 1 000 gènes sur nos échantillons.

Nous avons pu focaliser notre étude sur un nombre inférieur de gènes, car nous savions que les rétrovirus utilisent les organismes qu'ils infectent pour favoriser l'infection et se disséminer dans les tissus. Pour pénétrer dans une cellule, les virus doivent se lier à des protéines codées par les gènes de cette cellule et exposées à la surface cellulaire. Ces protéines sont normalement les récepteurs de molécules libérées par les autres cellules de l'organisme, mais les virus les détournent de leur fonction normale. Une fois introduits, les rétrovirus insèrent insidieusement leurs gènes dans les chromosomes cellulaires : les gènes viraux, qui codent la synthèse des particules virales, sont transmis lors des divisions des cellules infectées d'une génération de cellules à la suivante. Des enzymes cellulaires épissent les gènes viraux dans les chromosomes et produisent de nouvelles particules virales qui échappent aux défenses immunitaires de l'organisme infecté.

Nous avons ainsi limité notre étude à une cinquantaine de gènes qui codent des protéines susceptibles d'agir sur le cycle de vie du VIH. Nous avons également examiné 250 segments d'ADN polymorphes qui avaient été identifiés dans les parties des chromosomes situées entre les gènes : les différences indiquaient que les allèles des gènes voisins varient également. Nous voulions identifier quelques gènes polymorphes afin d'en déterminer la fonction cellulaire et leur rôle dans l'infection par le VIH.

Enfin, pour identifier des gènes de résistance au VIH, nous avons employé une technique de la génétique des populations humaines : nous avons divisé chaque cohorte en deux groupes, en fonction de caractéristiques de leur santé – par exemple, ceux qui étaient infectés par le VIH par opposition à ceux qui ne l'étaient pas après une exposition répétée ; les patients infectés qui étaient rapidement atteints du SIDA par opposition à ceux qui tombaient malades lentement, voire pas du tout ; ou encore les personnes infectées qui contractaient une maladie opportuniste spécifique du SIDA (notamment une pneumonie à *Pneumocystis carinii* ou un sarcome de Kaposi) et ceux qui n'en contractaient pas.

Après avoir fait ces subdivisions, nous avons comparé la fréquence des allèles retenus ou des segments polymorphes dans les sous-groupes. Nous avons aussi comparé leurs génotypes : chaque individu hérite de deux copies (une copie provenant de la mère et l'autre du père) de tous les gènes parentaux, à l'exception des gènes localisés sur les chromosomes sexuels. La paire d'allèles d'un endroit particulier d'un chromosome détermine le génotype : quand deux allèles d'un gène donné sont identiques, la personne est homozygote ; quand les deux allèles sont différents, la personne est hété-

rozygote. Au cours de nos tests de dépistage nous avons noté la proportion des personnes de chaque groupe qui étaient homozygotes ou hétérozygotes pour un allèle donné. Des différences dans la fréquence des allèles entre les deux groupes indiqueraient que le gène étudié influe sur le devenir des patients séropositifs.

Pendant des années, nous avons amassé des données, recruté de nouveaux volontaires pour nos groupes, étudié leurs gènes, leurs segments polymorphes, et analysé ces données avec des programmes informatiques plus en plus perfectionnés. Parfois, nous pensions avoir détecté des différences génétiques mais elles s'évanouissaient presque toujours, après un examen plus minutieux. Simultanément, nous suivions les progrès accomplis en immunologie et dans la compréhension du comportement du VIH dans l'organisme, cherchant toujours de nouvelles pistes génétiques. Enfin, vers la fin de 1995, soit plus de dix ans après avoir commencé notre étude, des lueurs d'espoir commencèrent à briller.

### Enfin de bons indices

Quand des biologistes identifièrent les interactions moléculaires du VIH avec les cellules, nous eûmes des renseignements intéressants pour notre recherche des gènes de la résistance au VIH.

Vers le milieu des années 1990, on savait bien que le VIH provoque une défaillance immunitaire par épuisement du nombre des cellules T aux nom-

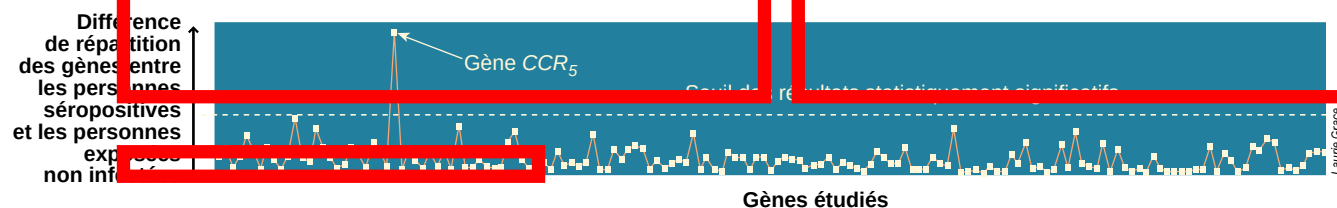
mes lymphocytes T, qui portent à leur surface la protéine CD<sub>4</sub>. Ces lymphocytes T orchestrent les réactions immunitaires contre les virus. On savait aussi que le VIH infecte une autre classe de cellules immunitaires présentant des molécules CD<sub>4</sub>, les macrophages, et qu'il persiste pendant des années dans ces cellules. Le VIH ne détruit pas les macrophages, mais il s'y terre.

Les molécules CD<sub>4</sub> des lymphocytes T et des macrophages participent aux communications entre les cellules immunitaires. Le VIH les utilise quand il infecte l'organisme : une des protéines virales (gp120), qui fait saillie sur l'enveloppe externe du virus, se lie à la protéine CD<sub>4</sub>, et le virus traverse alors la membrane cellulaire. Toutefois, diverses expériences avaient montré que si le récepteur CD<sub>4</sub> est nécessaire à la pénétration du VIH dans les cellules, il n'est pas suffisant : les cellules doivent porter au moins une autre protéine de surface à laquelle le virus se lie. Plus de dix ans après la découverte du VIH, les chercheurs ignoraient encore tout de la nature de ce deuxième récepteur.

De surcroît, en 1986, à l'Université de San Francisco, Jay Levy avait découvert que d'autres lymphocytes T, portant une protéine différente (CD<sub>8</sub>), sécrètent des molécules nommées facteurs de suppression, qui empêchent le virus d'entrer dans des cultures de cellules normalement susceptibles d'être infectées. On avait isolé de tels facteurs de suppression chez les personnes qui restent très longtemps séropositives sans avoir de SIDA et chez des

singes africains qui, même infectés par le VIS (la forme simienne du VIH), n'ont jamais de SIDA. Toutefois, on ignorait la nature de ces divers facteurs de suppression.

En décembre 1995, Robert Gallo et ses collègues identifièrent trois facteurs de suppression capables de bloquer



**3. DES DIFFÉRENCES DE PROFIL GÉNÉTIQUE** entre deux populations ont montré le rôle du gène CCR<sub>5</sub> dans la résistance à l'infection par le VIH. Les auteurs ont commencé par identifier les combinaisons d'allèles de 170 gènes dans un groupe de personnes infectées par le VIH et dans un groupe de personnes non infectées, mais exposées. Ils ont, par exemple, mesuré la proportion de personnes qui ont

deux allèles CCR<sub>5</sub> normaux, deux allèles CCR<sub>5</sub> délévés (tronqués), ou une copie de chaque allèle (tableau). Ensuite, pour chaque gène, ils ont calculé la différence statistique (petits carrés blancs) dans la répartition des génotypes des deux populations. Sur les 170 gènes analysés, seule la différence pour le gène CCR<sub>5</sub> était statistiquement significative.

l'infection par un variant du VIH qui colonise les macrophages (les souches virales dites M-tropiques). Ces trois facteurs étaient des chimiokines : de courtes chaînes d'acides aminés qui attirent les cellules immunitaires vers les tissus lésés ou malades.

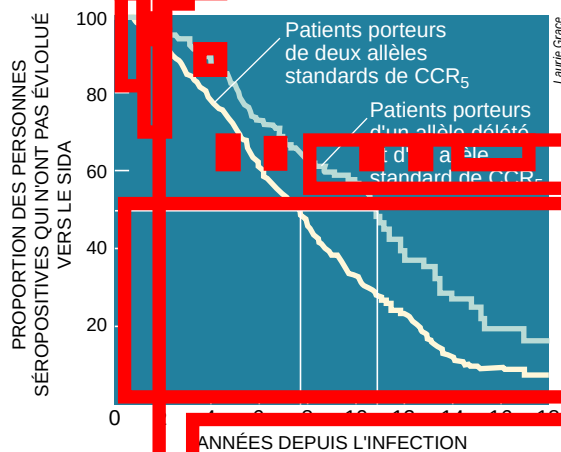
Les biologistes qui tentaient toujours d'identifier le second récepteur du VIH comprirent que les chimiokines agissent en se liant aux protéines de surface des cellules de défense. On supposa alors que les chimiokines isolées par le groupe de R. Gallo, nommées RANTES, MIP-1 $\alpha$ , et MIP-1 $\beta$ , empêchent le VIH de pénétrer dans les cellules immunitaires, parce qu'elles masquent certaines protéines de la surface des cellules indispensables à sa pénétration. Autrement dit, les récepteurs de surface de ces chimiokines étaient peut-être le second récepteur nécessaire au VIH pour infecter les macrophages et, peut-être, d'autres cellules qui portent des récepteurs CD<sub>4</sub>.

On n'a pu tester cette hypothèse rapidement, parce que l'on n'avait pas encore identifié les récepteurs de la chimiokine RANTES et de ses cousines. Toutefois, des résultats publiés en avril 1996 rendirent ces tests possibles et fournirent des gènes potentiels de résistance.

Tout d'abord, Edward Berger et ses collègues de l'Institut américain des maladies allergiques et infectieuses isolèrent le second récepteur des variants de VIH qui colonisent les lymphocytes T (les souches virales T-tropiques). C'est un récepteur de chimiokine, nommé CXCR<sub>4</sub>, qui se lie à une molécule qui n'est ni RANTES, ni MIP-1 $\alpha$ , ni MIP-1 $\beta$ . Si les résultats de R. Gallo n'avaient pas encore convaincu les spécialistes du SIDA que les récepteurs des chimiokines ont un rôle essentiel dans l'infection par le VIH, ceux de E. Berger ont dû les persuader.

Simultanément, Michael Samson, Marc Parmentier et leurs collaborateurs de l'Université de Bruxelles isolèrent le gène d'un récepteur auquel RANTES, MIP-1 $\alpha$  et MIP-1 $\beta$  se lient lorsqu'ils attirent des cellules immunitaires vers des tissus lésés. Dans les deux mois qui suivirent, cinq groupes différents montrèrent que la protéine qui est aujourd'hui nommée CCR<sub>5</sub> est aussi un récepteur du VIH sur les lymphocytes T.

Tous les nouveaux résultats sur les récepteurs des chimiokines préci-



**4. L'ÉTUDE** du temps écoulé entre l'infection par le VIH et l'apparition du SIDA a révélé que les personnes portant un allèle CCR<sub>5</sub> muté (ligne verte) échappent au SIDA plus longtemps que les personnes ayant deux allèles CCR<sub>5</sub> standards (ligne rose). Par exemple, la moitié des personnes du premier groupe ont vécu douze ans sans SIDA, tandis que le SIDA s'est déclaré chez la moitié des personnes du deuxième groupe en seulement neuf ans.

sèrent les mécanismes de l'infection par le VIH et de son évolution. Initialement, le VIH s'installe surtout dans les macrophages. Il y pénètre en se liant, par l'intermédiaire de sa protéine gp120, à deux récepteurs des macrophages : les protéines CD<sub>4</sub> et CCR<sub>5</sub>. Une fois dans les macrophages, le virus fabrique de grandes quantités de particules virales (on estime que plus d'un milliard de copies sont fabriquées chaque jour, au moins au début de l'infection), commençant à épuiser le système immunitaire.

Pendant la phase de séropositivité, le virus évolue sans cesse par mutations génétiques. Quelques années après le début de l'infection, le gène codant la gp120 mute, de sorte que la protéine virale gp120 change de second récepteur (voir la figure 2). À cause de cette modification génétique, la région qui reconnaît le récepteur CCR<sub>5</sub> se lie désormais avec plus d'affinité au récepteur CXCR<sub>4</sub> des lymphocytes T. À partir de cet instant, la population des VIH infecte plutôt les lymphocytes T.

Cette modification de l'affinité est rapidement mortelle, car les virus tuent les lymphocytes T qu'ils infectent. Le nombre de lymphocytes T CD<sub>4</sub> chute notablement chez les patients et, simultanément, les infections opportunistes et les cancers apparaissent. Pendant longtemps, l'apparition de ces maladies a signifié que la phase de SIDA était commencée. Aujourd'hui, on dit qu'une personne a un SIDA soit quand les maladies caractéristiques apparaissent, soit quand le sang contient moins de 200

lymphocytes T CD<sub>4</sub> par millimètre cube (on en dénombre, normalement, environ 1 000 par millimètre cube).

## Le succès de l'antirétrovirothérapie

Dès que nous avons su que les protéines CCR<sub>5</sub> et CXCR<sub>4</sub> sont des corécepteurs du VIH, nous avons cherché les gènes codant ces protéines influent sur la résistance au VIH dans nos cohortes.

Il nous fallut d'abord déterminer si les gènes CCR<sub>5</sub> et CXCR<sub>4</sub> sont polymorphes : si ces gènes étaient identiques dans la population générale, ils ne pouvaient être responsables de différences de sensibilité face au VIH.

Nous avons d'abord observé que toutes les copies du gène CXCR<sub>4</sub> que nous avons examinées étaient identiques ; puis, en juillet 1996, Mary Carrington découvrit qu'une personne sur cinq possède un gène CCR<sub>5</sub> où manquent 32 nucléotides ! Cette deletion entraîne la synthèse d'une protéine CCR<sub>5</sub> raccourcie.

Nous avons alors comparé les génotypes CCR<sub>5</sub> d'environ 2 000 personnes à haut risque, séparées en deux groupes selon qu'elles étaient infectées ou non, et nous avons trouvé des différences génétiques telles que nous les cherchions. Trois pour cent des personnes non infectées avaient les deux allèles du gène CCR<sub>5</sub> délévés (c'est-à-dire qu'elles étaient homozygotes pour le mutant), tandis qu'aucune des 1 343 personnes infectées n'était homozygote pour le mutant délévé. Ainsi, la possession de deux allèles délévés du gène CCR<sub>5</sub> semblait protéger contre le VIH.

De plus, l'apparente protection conférée par les allèles mutants de CCR<sub>5</sub> ne dépendait pas de la voie d'infection : aucun hémophile, homosexuel ou toxicomane homozygote pour ce gène mutant infecté. Nous pensions que le gène délévé protège les patients parce qu'ils ne fabriquent qu'une protéine CCR<sub>5</sub> tronquée, qui n'atteint pas la surface de la cellule ou qui est si déformée que le VIH ne peut s'y lier.

D'autres groupes recherchaient des polymorphismes des récepteurs des chimiokines. Nathaniel Landau, Richard Koup et leurs collègues du Centre de recherche sur le SIDA de New York avaient découvert indépendam-

ment le même allèle raccourci de 32 paires de bases. Pour ce faire, ils avaient étudié un groupe d'homosexuels à haut risque, mais qui n'avaient jamais été infectés. L'analyse des globules blancs de deux de ces hommes avait montré que la protéine CCR<sub>5</sub> n'est pas présente à la surface de ces cellules. Les deux hommes étaient homozygotes pour le gène délété CCR<sub>5</sub>. Inversement, M. Samson et M. Parmentier avaient étudié un groupe de 743 personnes infectées par le VIH : aucune n'était homozygote pour le gène délété.

Les études ultérieures n'ont trouvé aucun homozygote dans les populations africaines, asiatiques ou afro-américaines, tandis qu'un à deux pour cent des Caucasiens sont homozygotes pour la mutation (les populations européennes et d'Amérique du Nord). De plus, nous avons constaté que 20 pour cent des personnes infectées sont très exposées au VIH (au cours de fréquents rapports sexuels non protégés ou par l'administration de fortes doses de facteurs de coagulation humaine) par le VIH, au cours d'un traitement de

l'hémo-philie) étaient homozygotes pour le mutant délété. D'autres facteurs (génétiques ou non) expliquent vraisemblablement la résistance à l'infection de 80 pour cent des personnes exposées, mais non infectées.

Si deux allèles CCR<sub>5</sub> mutés protègent contre le VIH, un seul allèle muté associé à un allèle normal devrait protéger partiellement, en diminuant le nombre de protéines CCR<sub>5</sub> fonctionnelles fabriquées par la cellule. Quand nous avons examiné le temps qui sépare l'infection de l'apparition

## Epidémie au Néolithique

L'allèle de résistance au VIH, ou allèle muté par délétion, du gène CCR<sub>5</sub> n'est pas réparti uniformément dans le monde. On ne le trouve ni en Afrique, ni en Extrême Orient, ni chez les Indiens d'Amérique ; il est rare chez les Américains d'origine africaine (voir la deuxième colonne du tableau). Au contraire, il est relativement fréquent chez les Caucasiens (en Europe, en Amérique du Nord) et en Asie de l'Ouest.

Même chez les Caucasiens, sa répartition varie. La carte de la fréquence des allèles chez les Blancs d'Eurasie (voir ci-dessous) montre que la fréquence du gène muté, élevée dans le Nord, s'annule quasiment en Arabie saoudite (on calcule la fréquence en dénombrant les allèles mutés dans une population, et en divisant par la somme de toutes les copies de CCR<sub>5</sub>, standards et mutées).

Ces études de répartition des allèles apportent quelques réponses, mais soulèvent d'autres questions sur les origines et la prévalence du mutant qui code une protéine CCR<sub>5</sub> défectueuse. L'absence apparente de la mutation en Afrique indique que la délétion serait apparue après le départ des premiers hommes de l'Afrique et le début de la colonisation de l'Europe (il y a 150 000 à 200 000 ans). Pour quelle raison le mutant délété est-il devenu si fréquent dans la race blanche ? Quand s'est-il propagé ?

Comme l'allèle muté est fréquent dans certaines régions de l'Europe et de l'Asie, nous supposons qu'une épidémie s'y est produite et que les rares individus porteurs de la mutation en auraient été avantagés. Ces personnes qui auraient survécu se seraient reproduites, propageant la mutation, dont la fréquence aurait augmenté en raison de la disparition de l'allèle normal.

Nous supposons que la catastrophe était une épidémie grave due à un agent qui, comme le VIH, utilise la protéine CCR<sub>5</sub> normale pour infecter les cellules. Nous savons que, chez l'humain, des virus

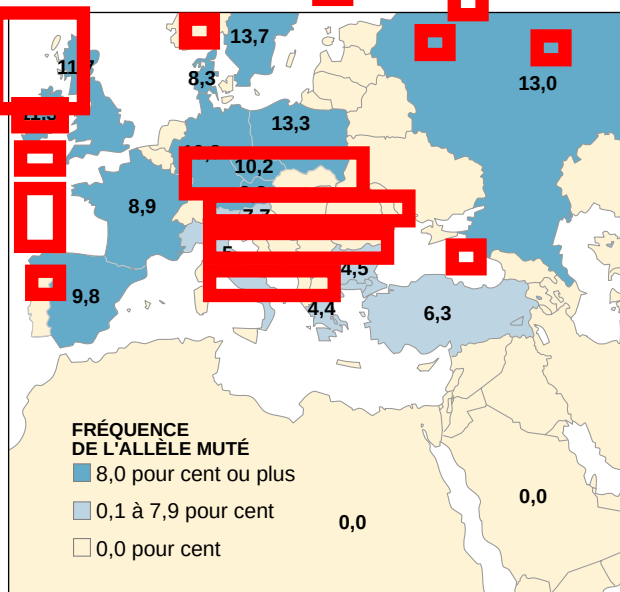
rares deviennent souvent plus fréquents lorsqu'ils confèrent une résistance contre un agent pathogène nouveau. Plus l'épidémie persiste, plus la fréquence de l'allèle, initialement rare, augmente.

Grâce à ces méthodes de datation génétique, nous avons estimé que l'épidémie eurasienne a eu lieu il y a environ 4 300 ans. Si le mutant est moins fréquent en Eurasie du Sud que dans le Nord, c'est peut-être que le foyer de l'épidémie était septentrional.

Beaucoup d'Américains descendent d'Européens ou d'émigrants d'Asie de l'Ouest, ce qui explique pourquoi une proportion assez élevée des Américains de race blanche ont l'allèle muté : leurs ancêtres se l'ont transmis. Certains Américains d'origine africaine ont aussi l'allèle, bien que la plupart des Africains en soient dépourvus. Les mariages entre Africains et Blancs expliqueraient cette présence de l'allèle muté.

Que était cet agent pathogène ? Peut-être s'agissait-il d'un agent qui, tel le VIH, tue plus de 90 pour cent des personnes infectées. Il ne s'agit pas du VIH actuel, apparu dans la population humaine au cours des 20 dernières années, bien qu'une épidémie d'un VIH ancien, non répertoriée, ait pu se produire. Peut-être s'agissait-il des micro-organismes du choléra, de la tuberculose ou de la grippe. La peste bubonique, d'abord considérée comme plausible, n'est probablement pas en cause. Elle a causé de vastes épidémies bien après la date de l'épidémie qui nous intéresse ici.

| Population                                               | Fréquence de l'allèle muté (en pour cent) | Fréquence du génotype (en pour cent) |                           |                                                          |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------|
|                                                          |                                           | 2 copies de l'allèle standard        | 2 copies de l'allèle muté | 1 copie de l'allèle standard et 1 copie de l'allèle muté |
| Caucasiens d'Europe                                      | 10,0                                      | 81,0                                 | 1,0                       | 18,0                                                     |
| Caucasien d'Amérique                                     | 11,1                                      | 79,0                                 | 1,2                       | 19,7                                                     |
| Afro-américain                                           | 1,7                                       | 96,6                                 | 0,0                       | 3,3                                                      |
| Natifs d'Amérique, Africains, Asiatiques (Asie de l'Est) | 0,0                                       | 100,0                                | 0,0                       | 0,0                                                      |



des maladies opportunistes du SIDA, nous avons trouvé que le déclenchement du SIDA est retardé de deux à trois ans chez les porteurs d'un allèle délété, aussi bien chez les homosexuels que chez les hémophiles. Ce génotype hétérozygote (que l'on trouve chez environ 20 pour cent des Caucasiens) retarde aussi le moment où le nombre de lymphocytes  $T\ CD_4$  par millimètre cube de sang devient inférieur à 200.

Puisque le mutant délété protège contre le VIH, même après des expositions répétées, pourrait-on mettre au point des traitements, qui bloqueraient les interactions du VIH et de la protéine  $CCR_5$  normale, et protégeraient les personnes saines d'une infection ou ralentiraient l'apparition du SIDA chez les personnes séropositives?

Pendant des années, les laboratoires pharmaceutiques ont centré leur recherche d'un traitement contre le VIH sur le virus lui-même, se préoccupant peu de la façon dont la machinerie cellulaire de l'organisme infecté participe à l'établissement de la maladie chronique. Ainsi, dans la trithérapie notamment, on administre des molécules qui bloquent diverses

enzymes virales, ce qui empêche le virus de se reproduire. Les résultats de la génétique montraient qu'en supprimant l'aide apportée par l'organisme infecté au virus, on pourrait maîtriser la réplication virale, voire prévenir l'infection.

## Conséquences thérapeutiques

De nombreux biologistes se mirent immédiatement à chercher comment empêcher le VIH d'interagir avec  $CCR_5$ . Pourrait-on masquer la molécule gp120? C'est une voie de recherche théoriquement envisageable, mais la plupart des chercheurs tentent surtout de bloquer le site de liaison du VIH sur le récepteur  $CCR_5$ .

Initialement, on craignait que le blocage de la protéine  $CCR_5$  ne soit dangereux pour l'organisme, qu'il perturberait les réactions immunitaires : les macrophages, ne détectant plus RANTES ni les chimiochines apparentées, ne fonctionneraient plus. Toutefois cette crainte disparaît rapidement : les personnes qui ont deux allèles mutés ont un système immunitaire qui fonctionne bien,

n'ont pas de pathologie tissulaire particulière, et sont en bonne santé. De toute évidence, d'autres récepteurs des chimiochines compensent l'absence de récepteur  $CCR_5$  fonctionnel. Deux de ces récepteurs ( $CCR_{2B}$  et  $CCR_3$ ) sont aussi des récepteurs du VIH, mais ils sont moins efficaces que  $CCR_5$ .

On espère ainsi protéger contre le VIH en administrant directement des molécules qui bloqueraient le récepteur  $CCR_5$  auquel se lie le VIH. Ces molécules seraient des chimiochines ou des dérivés synthétiques mimant ces chimiochines. Ainsi, une équipe internationale a mis au point une molécule dérivée de RANTES dont les effets *in vitro* sont prometteurs. On pourrait aussi bloquer les récepteurs par des anticorps synthétiques, c'est-à-dire de grosses molécules qui se lieraient à  $CCR_5$ , empêchant le VIH de s'y fixer.

En injectant des fragments de  $CCR_5$ , on pourrait également déclencher la production d'anticorps anti- $CCR_5$  par le système immunitaire de la personne ainsi vaccinée. Les chercheurs pourraient modifier génétiquement des macrophages en y insérant de nouveaux gènes dont les produits préviendraient la production de la protéine  $CCR_5$  ou éviteraient que la protéine ne serve de point d'ancrage au VIH.

Pour certains malades dont la mort est imminente, parce qu'ils sont en phase terminale de SIDA et qu'ils souffrent de lymphomes, nous pensons adapter un traitement de plus en plus utilisé dans les cas de cancers évolués du sein ou du sang. Pour lutter contre ces cancers, on administre de fortes doses de molécules cytotoxiques ou de rayonnements afin d'éliminer toutes les cellules cancéreuses. Comme ce traitement détruit les cellules productrices du sang localisées dans la moelle osseuse (notamment les cellules du système immunitaire), les médecins reconstituent ensuite le système immunitaire des malades en leur administrant de la moelle osseuse saine, histocompatible.

Dans le cas des malades du SIDA, nous pourrions détruire toutes les cellules sanguines infectées par le VIH et greffer ensuite de la moelle osseuse provenant de donneurs homozygotes pour le gène  $CCR_5$  délété. Nous espérons que cette méthode protégerait contre de nouvelles infections par le VIH et préviendrait la dissémination du VIH d'une cellule infectée à une autre, si quelques-

## D'autres facteurs de la progression du VIH

Nous l'avons montré, certains gènes protègent les personnes exposées au VIH contre l'infection et ralentissent l'évolution vers le SIDA. D'autres facteurs, par exemple diverses caractéristiques de l'hôte et du virus, joueraient également un rôle.

Certaines personnes réagissent vigoureusement contre le VIH dès le début de l'infection, peut-être parce qu'elles ont été exposées antérieurement à un virus dont la structure était proche de celle du VIH. Une puissante réaction précoce limite efficacement le nombre de particules virales et pourrait vraisemblablement éliminer le virus dans certains cas. La puissance des réactions immunitaires influencerait aussi sur la vitesse à laquelle les personnes infectées progressent vers le SIDA.

L'infection simultanée par d'autres virus agirait sur

la sensibilité au VIH et sur la vitesse d'apparition du SIDA. Les micro-organismes pathogènes déjà présents déclenchent la production de substances nommées cytokines, dont certaines favoriseraient la pénétration du VIH dans les cellules et sa réplication.

Enfin, selon la souche virale elle-même, la vitesse de progression de l'infection varie notablement. Les souches qui «choisissent» le type des cellules qu'elles infectent (celles qui se répliquent et mutent assez lentement et celles qui ne tuent pas les cel-

lules hôtes) sont vraisemblablement moins dévastatrices pour le système immunitaire – du moins au début de l'infection. Toutefois, même des souches initialement peu virulentes mutent et donnent souvent des formes très agressives.



Des particules de VIH bourgeonnent d'une cellule infectée. Certaines souches sont particulièrement agressives.

unes avaient échappé à la chimiothérapie et à la radiothérapie.

L'idée de traiter les malades et de les protéger contre les VIH résiduels ou séquestrés est attrayante, mais ce traitement nécessite des précautions. D'une part, les transplantations de moelle osseuse sont risquées : les différences immunitaires entre le donneur et le receveur provoquent parfois un rejet de la greffe ou, pire, une attaque des tissus du receveur par les cellules immunitaires de la moelle du donneur, entraînant la mort du patient.

De surcroît, on a récemment identifié des personnes qui étaient homozygotes pour le mutant délété, mais qui étaient infectées par le VIH. Nous ignorons comment l'infection s'est établie, mais ces patients semblent avoir contracté une souche T-tropique extrêmement virulente, qui n'apparaît que dans les stades tardifs de l'infection. Jusqu'à présent, on pensait que les virus T-tropiques ne transmettent pas l'infection d'une personne à une autre : ils semblaient être reconnus et détruits par le système immunitaire sain des sujets exposés. Seuls des virus M-tropiques, qui se multiplient discrètement en grand nombre dans les macrophages sans les tuer, semblaient capables de provoquer l'infection. Les patients homozygotes qui ont été infectés auraient été particulièrement malchanceux : ils auraient été exposés à des souches T-tropiques inhabituelles, capables de déjouer les défenses immunitaires et d'établir une infection sans que des souches M-tropiques assurent les premières étapes de l'infection. Il est également possible que la résistance innée des patients aux souches M-tropiques ait accéléré, d'une façon ou d'une autre, la transition des souches M-tropiques vers des souches T-tropiques agressives, capables d'établir elles-mêmes l'infection.

S'il se confirme que la résistance vis-à-vis des souches M-tropiques

conférée par les allèles CCR<sub>5</sub> mutés a stimulé l'évolution du VIH et l'apparition d'une forme très agressive, on devra admettre que les greffes de moelle osseuse et toute action préventive ou thérapeutique destinée à bloquer la liaison du VIH sur le récepteur CCR<sub>5</sub> risque d'avoir des conséquences néfastes, en stimulant l'infection au lieu de la bloquer. Heureusement, la plupart des personnes qui sont homozygotes pour l'allèle délété évitent l'infection et ne succombent pas à un dangereux virus T-tropique. Toutefois, avant que les médecins ne traitent les patients par des antagonistes de CCR<sub>5</sub>, les biologistes devront démontrer que ces drogues améliorent réellement les chances de survie.

Tout en cherchant à appliquer les résultats récents, les biologistes continuent de chercher d'autres facteurs génétiques de protection contre le SIDA. Nous avons récemment identifié un variant du gène CCR<sub>2B</sub>, dont un seul allèle suffit pour retarder la phase SIDA de deux à trois ans (comme c'est le cas pour les porteurs d'un allèle CCR<sub>5</sub> délété). Au début de 1997, Jianglin Han et ses collègues de l'Institut de cancérologie Dana Farber ont trouvé que la protéine CCR<sub>3</sub> facilite la pénétration du VIH dans les cellules microgliales (les cellules immunitaires du cerveau) et que le blocage de ce récepteur empêche l'infection de ces cellules par le VIH.

Ainsi que nous cherchons des gènes de protection contre le SIDA depuis plus de dix ans, nous constatons avec satisfaction que les découvertes se multiplient. On réduira-t-on des traitements préventifs contre un virus suffisamment « intelligent » pour s'attaquer aux cellules destinées à l'éliminer ? Nous n'avons que des espoirs de traitement, mais nous observons que les collaborations pluridisciplinaires sont fructueuses.

Stephen O'BRIEN dirige le Laboratoire d'étude de la diversité génomique de l'Institut américain du cancer. Michael DEAN dirige le Département de génétique humaine de cet institut.

Y. FENG, C. C. BRODER, P. E. KENNEDY et E. A. BERGER, *HIV-1 Entry Cofactor: Functional cDNA Cloning of Seven-Transmembrane, G Protein-Coupled Receptor*, in *Science*, vol. 272, pp. 872-877, 10 mai 1996.

Rong LIU et al., *Homozygous Defect in HIV-1 Coreceptor Accounts for Resistance*

*of Some Multiply-Exposed Individuals to HIV-1 Infection*, in *Cell*, vol. 86, n° 3, pp. 367-371, 19 août 1996.

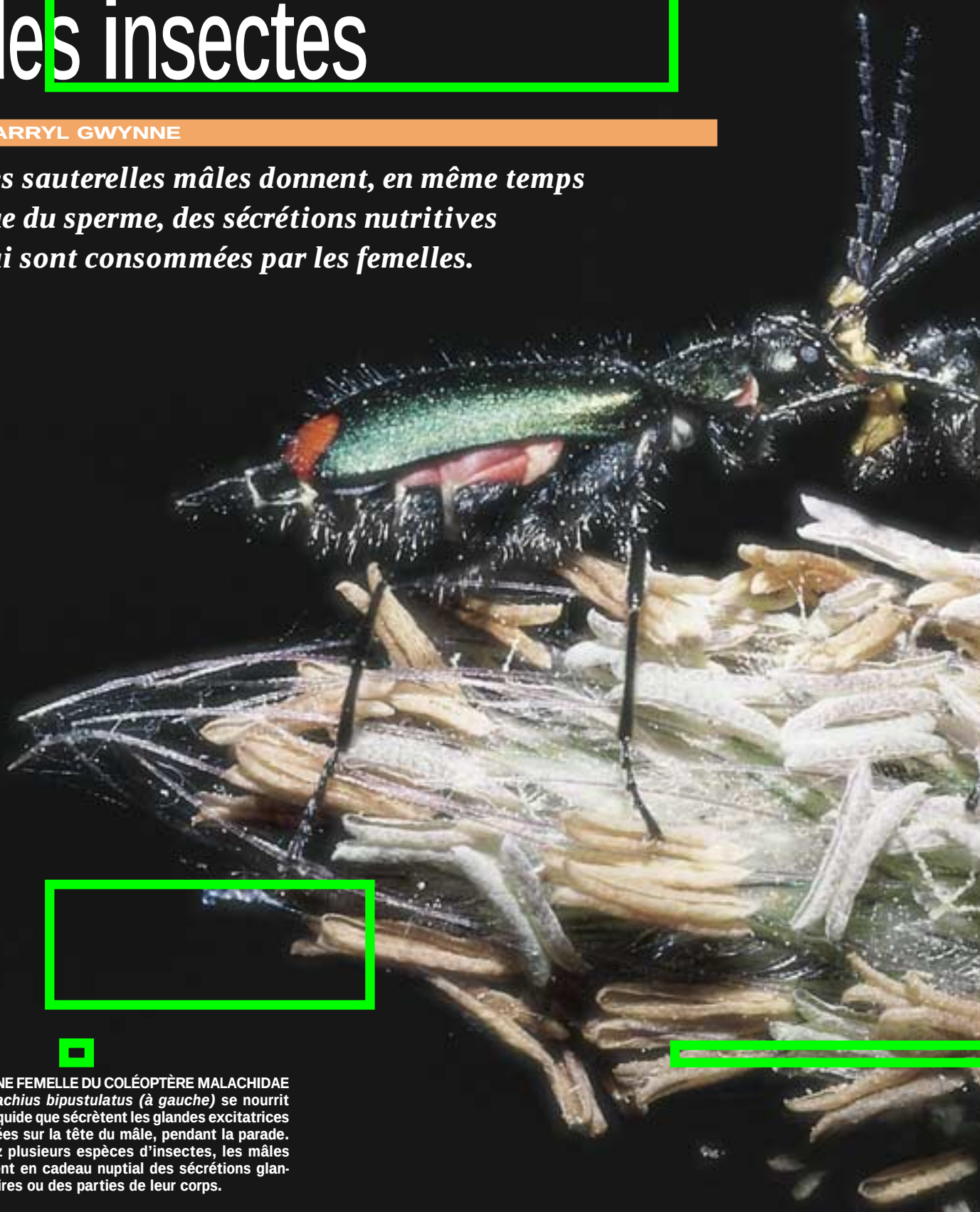
Michael DEAN et al., *Genetic Restriction of HIV-1 Infection and Progression to AIDS by a Deletion Allele of the CCR5 Structural Gene*, in *Science*, vol. 273, pp. 1856-1862, 27 septembre 1996.

Michael W. SMITH et al., *Contrasting Genetic Influence of CCR<sub>2</sub> and CCR<sub>5</sub> Variants on HIV-1 Infection and Disease Progression*, in *Science*, à paraître.

# Les offrandes nuptiales des insectes

DARRYL GWYNNE

*Les sauterelles mâles donnent, en même temps que du sperme, des sécrétions nutritives qui sont consommées par les femelles.*



1. UNE FEMELLE DU COLÉOPTÈRE MALACHIDAE *Malachius bipustulatus* (à gauche) se nourrit du liquide que sécrètent les glandes excitatrices situées sur la tête du mâle, pendant la parade. Chez plusieurs espèces d'insectes, les mâles offrent en cadeau nuptial des sécrétions glandulaires ou des parties de leur corps.

En 1859, alors que Charles Darwin expose sa théorie de l'évolution dans *De l'origine des espèces*, le capitaine de cavalerie John Feilner explore la Californie du Nord. Avant d'être tué par les Indiens, il transmet au Muséum américain d'histoire naturelle ses observations sur les mœurs des sauterelles. Il note en particulier : «Après l'accouplement, un petit sac – manifestement l'ovaire – est fixé au corps de la femelle, près de la queue.»

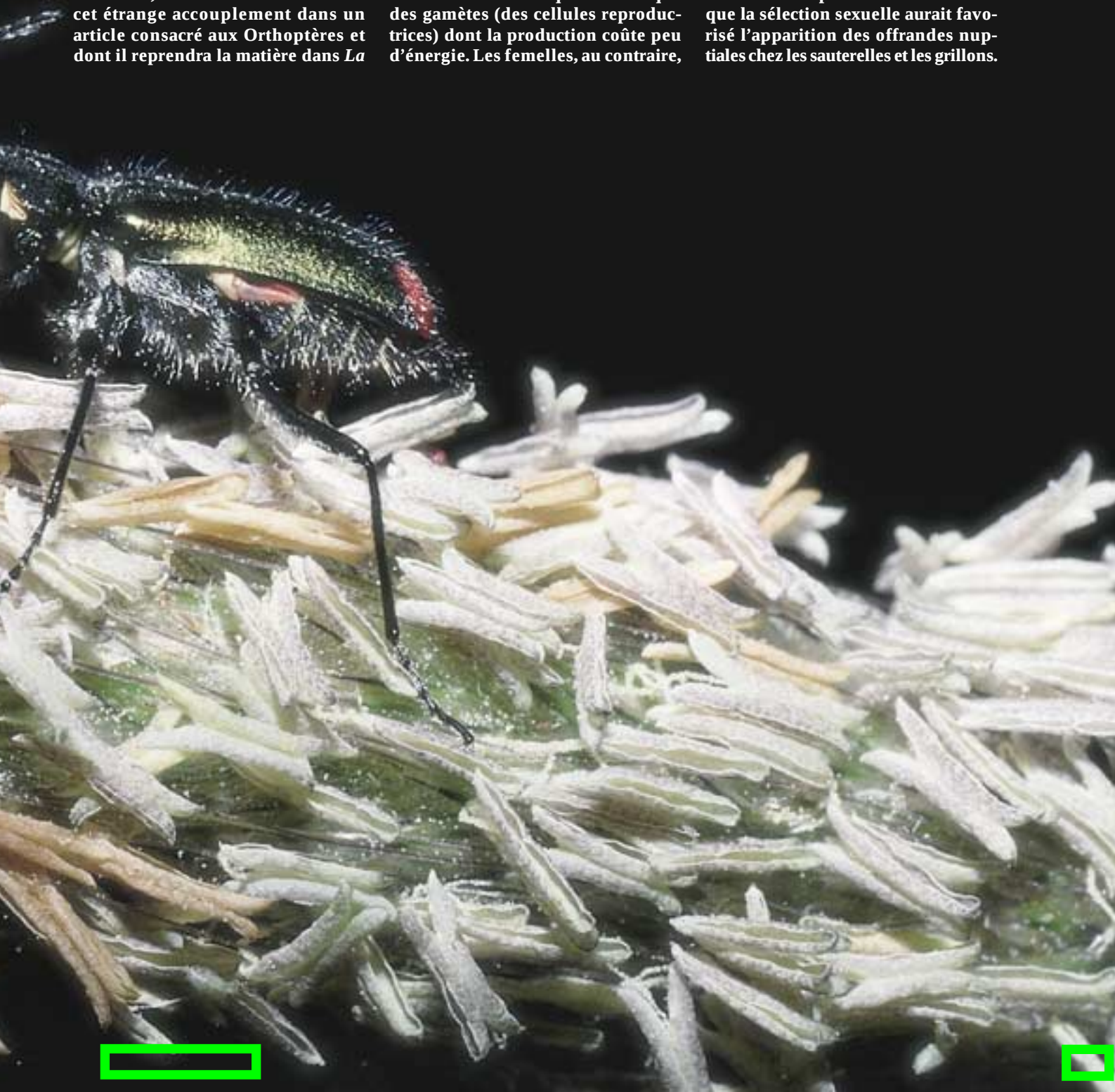
Une trentaine d'années plus tard, en France, Jean-Henri Fabre détaille cet étrange accouplement dans un article consacré aux Orthoptères et dont il reprendra la matière dans *La*

*vie de la sauterelle*, volume de ses *Souvenirs entomologiques*. Il démontre que ce sac provient du mâle, et il note qu'une structure opalescente, «semblable par sa taille et sa couleur à une baie de gui», est fixée au spermatophore, autre sac qui contient le sperm, et est dévorée par la femelle en un banquet final, paroxysme de l'accouplement.

Cette «générosité» masculine est paradoxale, car les mâles augmentent généralement leur succès reproductif en s'accouplant fréquemment, mais en ne donnant à chaque femelle que des gamètes (des cellules reproductrices) dont la production coûte peu d'énergie. Les femelles, au contraire,

produisent des cellules reproductrices rares et précieuses, qui contiennent à la fois des gènes et des substances nutritives et elles s'efforcent de ne se livrer qu'à des accouplements efficaces, choisissant soigneusement leurs partenaires.

Ces comportements découlent de la sélection naturelle ; les gènes qui favorisent la survie et la reproduction sont conservés au cours de l'évolution. En outre, la sélection sexuelle résulte de la lutte pour les partenaires sexuels ou pour les accouplements efficaces au sein de l'espèce. Nous allons voir que la sélection sexuelle aurait favorisé l'apparition des offrandes nuptiales chez les sauterelles et les grillons.



## Un repas distrayant

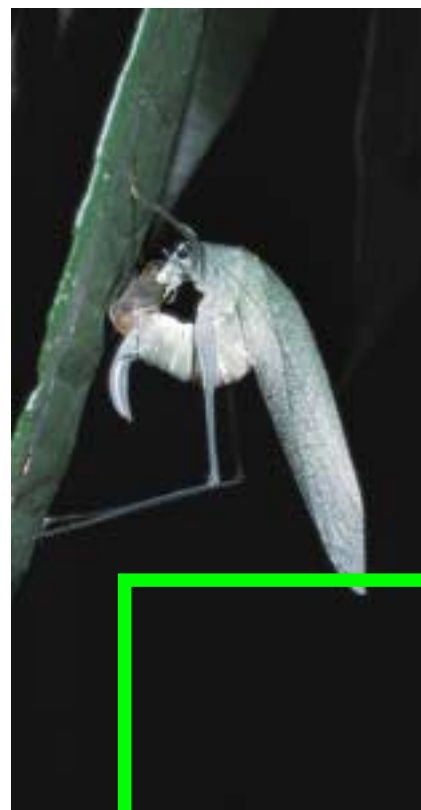
Chez de nombreux grillons et sauterelles, les femelles dévorent, après l'accouplement, des sécrétions émises par le mâle, tandis que le spermatophore, fixé à l'extérieur des voies sexuelles, injecte les gamètes du mâle. Le biologiste russe B. Boldyrev observa

en 1915 la coïncidence de ce repas nuptial et de l'injection du sperme ; il proposa alors que le sac dévoré, qu'il appela spermatophylax, détourne la femelle du spermatophore, qui est aussi une source de nourriture. Plus longtemps le spermatophore reste en place, plus la femelle reçoit de gamètes du mâle, et plus nombreux sont les œufs fertili-

ses ; or l'émission d'un grand nombre de gamètes est une garantie de succès reproductif pour le mâle, car celui-ci est en compétition avec ses prédécesseurs, dont le sperme est déjà emmagasiné à l'intérieur de la femelle (le stockage du sperme par les femelles est courant chez les insectes ; il s'effectue dans un organe nommé spermathèque).



David H. Funk, Stroud Water Research Center



K.G. Preston-Mafham, Pteronophorus Wildii



Darryl T. Gwynne

2. UN SAC NUTRITIF, le spermatophylax, est fréquemment transféré à la femelle en même temps que le sperme, chez les sauterelles (Tettigoniidae) et les grillons qui leur sont apparentés. Trois espèces s'en rassasient sur ces images : la sauterelle conocéphale des champs d'Amérique du Nord (*Conocephalus strictus*), une sauterelle «feuille» du Brésil, et la sauterelle d'Australie *Kawanaphile nartee*.



David H. Funk



3. PENDANT L'ACCOUPLEMENT, l'haglide *Cyphoderris strepitans* offre à la femelle (au-dessus) ses ailes postérieures charnues. Sur cette séquence, la femelle détruit aussi les ailes antérieures du mâle (à droite).

Selon Nina Wedell, de l'Université de Stockholm, les mâles et les femelles se sont livrés à une sorte de «course aux armements», au cours de l'évolution. Le spermatophylax, qui évite que les femelles ne mangent le sperme, se fait d'abord apparû. Puis les femelles se seraient accouplées plus souvent, peut-être pour profiter de repas supplémentaires. En retour, les mâles auraient augmenté leur production de sperme pour féconder un nombre supérieur d'œufs en une seule fois et supplanter ainsi leurs rivaux... mais ils ont alors dû déposer un sac nutritif plus grand, afin de mieux protéger celui qui contenait le sperme, lui-même devenu plus grand.

Robert Trivers, de l'Université Rutgers, a une autre hypothèse : les cadeaux nuptiaux seraient une forme indirecte de soin paternel : ils contiendraient des substances nutritives qui, incorporés aux œufs, bénéficieraient à leur progéniture. Cette hypothèse n'est pas incompatible avec la précédente : le don nuptial des mâles peut avoir plusieurs fonctions.

Comment déterminer les origines de ce comportement ? Quand tous les organismes situés aux extrémités d'un arbre phylogénétique (qui montre les relations de parenté entre différents organismes) présentent une même caractéristique, on peut supposer que leur ancêtre commun possédait aussi cette caractéristique. Chez la plupart des insectes, le mâle dépose le spermatophore à l'intérieur de la femelle. Ainsi, si le don du mâle a été sélectionné parce qu'il favorisait

le transfert de sperme, cela ne s'est produit qu'après l'apparition d'un spermatophore situé à l'extérieur et son absorption par la femelle. C'est ce que l'on observe sur l'arbre phylogénétique que j'ai proposé (voir la figure 6). Dans presque tous les groupes de grillons et de sauterelles, le spermatophore reste à l'extérieur de la femelle, et celle-ci le mange : l'ancêtre commun, à la base de l'arbre, en faisait probablement autant. En outre, les mâles de presque tous les groupes de la branche gauche de l'arbre et de quelques-uns de la branche droite offrent un spermatophylax : cela indique que ce raffinement est postérieur à l'apparition du spermatophore. Les comparaisons détaillées des diverses espèces révèlent environ une dizaine d'origines indépendantes pour ces repas à base de sécrétions ou d'organes, avec trois origines différentes pour le spermatophylax (étrangement, l'offrande nuptiale la plus courante dans le règne animal est une proie ou un autre morceau de nourriture ramené par le mâle, n'existant pas chez les Orthoptères).

## Un repas compté

Des expérimentations de laboratoire confirment l'efficacité des dons nuptiaux. Les mâles ne fournissent généralement que la quantité de nourriture juste nécessaire pour que tout le sperme soit transféré, le temps que la femelle consomme la nourriture offerte : leurs dons ont donc toujours une fonction de protection du

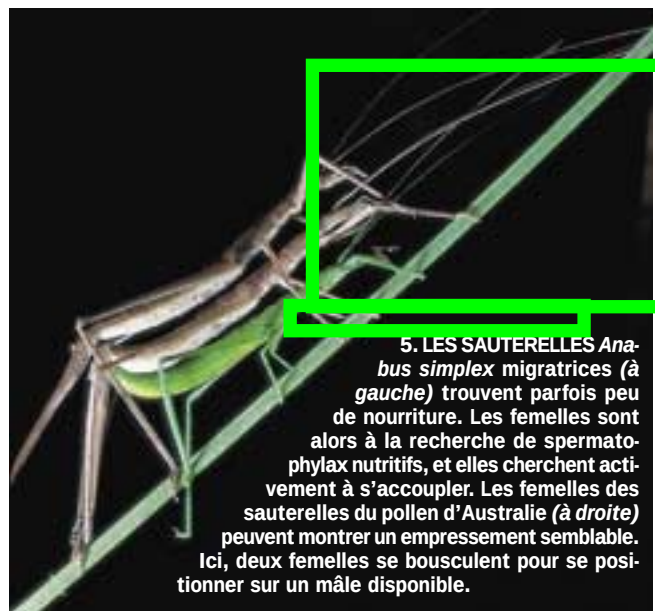
sperme. En outre, le transfert de sperme efficace que permet un repas copieux est récompensé par une descendance plus nombreuse : en accouplant deux mâles de sauterelle verruciforme (*Decticus verrucivorus*, littéralement, la sauterelle «mangeuse de verrues») avec la même femelle, N. Wedell a constaté que la part d'un mâle dans la descendance est proportionnelle à l'abondance relative du repas offert. En revanche, la valeur nutritive de ce repas est faible.

On observe un phénomène analogue chez un arthropode très différent. Le minuscule mâle de l'araignée à dos rouge d'Australie offre un repas à sa compagne... mais ce repas est un



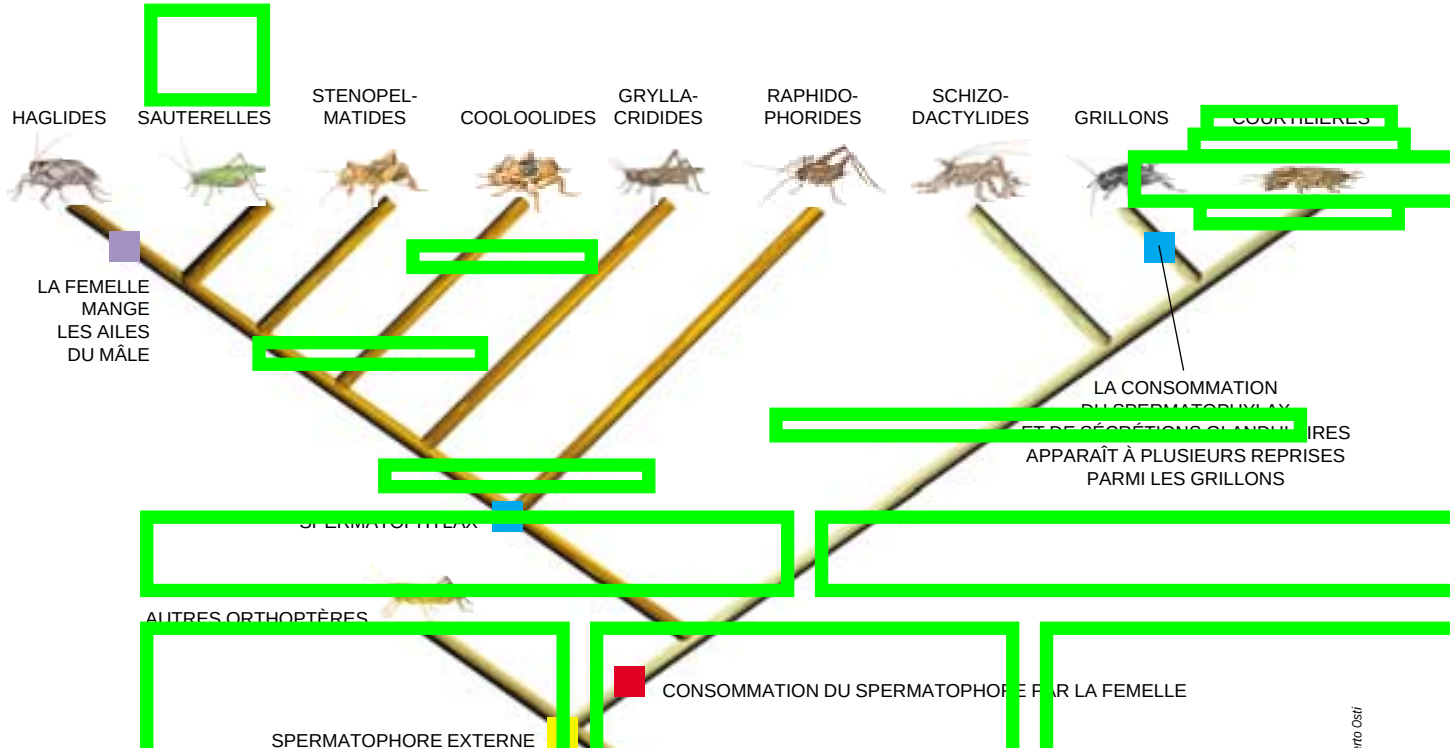
André C. Mason, Cornell University

**4. LE MÂLE DE L'ARAIGNÉE australienne à dos rouge offre tout son corps à sa partenaire. Après avoir inséré l'extrémité de ses organes sexuels, il bascule dans la mâchoire de la femelle, qui le mange, tandis que s'effectue le transfert du sperme. Ce sacrifice, d'un apport nutritif négligeable, accroît la durée de l'accouplement et donc le nombre d'œufs fertilisés.**



**5. LES SAUTERELLES *Anabus simplex migratrices* (à gauche) trouvent parfois peu de nourriture. Les femelles sont alors à la recherche de spermatophylax nutritifs, et elles cherchent activement à s'accoupler. Les femelles des sauterelles du pollen d'Australie (à droite) peuvent montrer un empressement semblable. Ici, deux femelles se bousculent pour se positionner sur un mâle disponible.**

Darryl T. Gwynne



Roberto Ossi

**6. L'ARBRE PHYLOGÉNÉTIQUE DES GRILLONS ET DES SAUTERELLES** (Orthoptères, sous-ordre des Ensifères) proposé par l'auteur indique que le spermatophore externe, vulnérable, est apparu avant les dons nuptiaux de mâles. Ceux-ci, sous la forme de spermatophylax, détournent la femelle de la consommation du sperme.

sacrifice : il est lui-même dévoré dans environ deux tiers des accouplements, car il bascule entre les mâchoires de sa partenaire pendant qu'il l'insémine. Là encore, l'objectif du mâle n'est pas de nourrir ni de mourir, mais de prolonger la fécondation : ce casse-croûte sacrificiel distrait la femelle, ce qui allonge la période de transfert du sperme et permet la fécondation ultérieure d'un nombre supérieur d'œufs.

L'araignée à dos rouge d'Australie appartient à la famille des veuves noires (genre *Latrodectus*). Les femelles d'autres veuves noires dévorent parfois le mâle après l'accouplement, mais, dans la majorité des cas, ce cannibalisme ne s'apparente pas à un don, les mâles n'attendant aucune volonté de se faire manger. Il en est de même pour de nombreux autres accouplements périlleux, tels ceux des mantres religieuses, où les mâles tentent désespérément d'échapper à l'emprise de leur partenaire.

## Aphrodisiaques d'insectes

Dans certaines espèces, l'ingestion de sécrétions du mâle améliore le succès reproductif des femelles, peut-être parce que les femelles ancestrales préféraient des dons plus nutritifs. Les repas nuptiaux de certaines sauterelles vertes accroissent non seulement la quantité des œufs, mais aussi leur taille ; or plus un œuf est gros, plus il

a de chances de survivre pendant l'hiver. D'une part, William Brown, de l'Université de Toronto, a montré que la fécondité de la femelle est augmentée par l'absorption des sécrétions d'une minuscule glande située sur le dos du mâle.

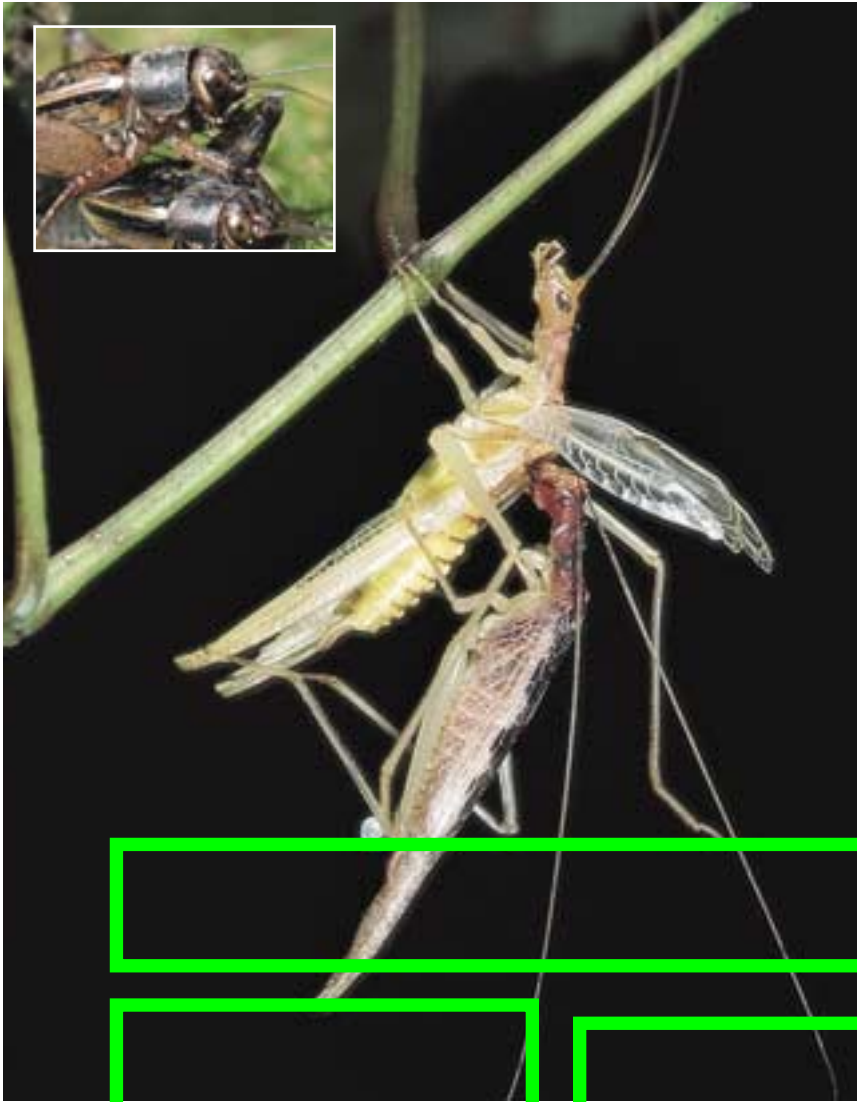
L'émission de telles sécrétions par les mâles et leur consommation par la femelle ont-elles été sélectionnées par l'évolution ? On pourrait l'affirmer si l'on démontrait que ces comportements accroissent à coup sûr la descendance des mâles sécréteurs, plutôt que celle des rivaux. C'est le cas pour deux espèces de sauterelles australiennes : les œufs sont déposés avant que la femelle ne s'accouple une seconde fois ; ces œufs sont en outre plus volumineux lorsque le repas nuptial est plus substantiel.

Thomas Eisner et ses collègues de l'Université Cornell ont aussi observé en laboratoire que, chez le coléoptère *Neopynochroa flabellata*, le mâle prendrait soin de sa descendance, en ingérant de la cantharidine (principe actif de la cantharide, autrefois utilisé comme aphrodisiaque). Il en conserve un peu dans une glande située dans la tête, tandis que la plus grande partie s'accumule dans des glandes abdominales spécialisées. Pendant la parade sexuelle, la femelle lèche la glande de la tête, puis ne s'accouple que si le mâle a mangé de la cantharidine. Le mâle éjacule alors sa réserve de cantharidine

dans la femelle, qui l'incorpore à ses œufs. Il livre en une seule fois toute sa réserve de cantharidine, sans en conserver pour attirer d'autres femelles. La fonction de ce repas chimique semble davantage nourricière et paternelle que sexuelle.

L'une des deux sauterelles où le spermatophylax semble également avoir une fonction plus nutritive est la sauterelle australienne des jardins *Requena verticalis*, que l'on trouve en Australie occidentale. Un mâle *Requena* procure un repas plus copieux que ce qui serait nécessaire pour distraire son partenaire et assurer une insémination totale. Cependant, même alors, l'expression de la sélection sexuelle ne cesse pas tout à fait : les mâles réservent les meilleurs festins aux femelles les plus jeunes, adultes depuis moins d'une semaine ; comme les femelles plus âgées, qui ont déjà trois semaines de vie adulte, ont probablement emmagasiné du sperme de mâles rivaux (elles le conservent pendant toute leur vie), il y a une incertitude sur la paternité, et les mâles font une discrimination subtile en ne proposant comme repas qu'un spermatophylax plus petit.

L'évolution a doté de nombreuses espèces d'un spermatophylax volumineux et nutritif, ce qui, paradoxalement, a totalement inversé le déroulement habituel de la sélection sexuelle, où les mâles rivalisent pour



David H. Funk

**7. LA FEMELLE DU GRILLON À DEUX TACHES (*Neoxabius biunctata*) consomme, après la copulation, les sécrétions des glandes situées sur le dos du mâle. La fragile poche de sperme, le spermatophore, pend près de l'extrémité de son abdomen (à droite). La femelle du grillon d'Allard (*Allanemobius allardi*) se nourrit d'une sécrétion glandulaire provenant d'un ergot tibial modifié situé sur la patte du mâle (en haut).**

s'accoupler, tandis que les femelles choisissent. Chez la sauterelle *Anabrus simplex*, fléau de l'Ouest américain, que le capitaine Feilner observa «en si grand nombre qu'elles en couvraient le sol», en période de famine, faute de pouvoir produire des aliments, les mâles s'accouplent moins souvent ; inversement, les femelles ont un besoin accru de se nourrir de repas nuptiaux, et cherchent à s'accoupler le plus possible. Si Feilner avait poursuivi ses observations de sauterelle, il aurait peut-être découvert que ce sont les femelles, et non les mâles, qui sont en concurrence pour trouver un partenaire. Les mâles sont alors très sélectifs dans le choix de la femelle qui consommera leur sac précieux et savoureux.



Darryl GWYNNE est professeur de zoologie à l'Université de Toronto.

*Orthopteran Mating Systems: Sexual Competition in a Diverse Group of Insects*, sous la direction de D.T. Gwynne et G.K. Morris, Westview Press, 1983.

RANDY T. TORNHILL et Darryl T. GWYNNE, *The Evolution of Sexual Differences in Insects*, in *American Scientist*, vol. 74 n° 4 pp. 382-389 juillet-août 1986.

DAVID H. FUNK, *L'accouplement de grillons arboricoles*, in *Pour la Science*, octobre 1989.

D.T. GWYNNE et L.W. SIMMONS, *Experimental Reversal of Courtship Roles in an Insect*, in *Nature*, vol. 346, pp. 172-174, 12 juillet 1990.

Georges PASTEUR, *Jean-Henri Fabre*, in *Pour la Science*, septembre 1994.



Roger-Viollet

# La quadrature du carré

IAN STEWART

*Comment paver un carré avec des carrés plus petits, tous de tailles différentes ?*

Le problème de la quadrature du cercle, apparu dans la Grèce antique, s'est révélé si difficile que le langage courant utilise son nom pour signifier une impossibilité. Le problème de la quadrature du carré, récent, subira-t-il le même sort ? Il s'agit de paver un carré avec des pavés carrés plus petits. Avec des pavés tous de la même taille, le problème est facile : un carré de côté  $n$  peut être pavé avec  $n^2$  petits carrés. Complicons alors le problème, et imposons d'utiliser des pavés carrés de tailles différentes.

En 1903, Max Dehn prouva que si un rectangle était pavable par des carrés, alors les côtés de ces carrés et ceux du rectangle formaient deux à deux des rapports rationnels (un nombre rationnel est le quotient de deux nombres

entiers). De ce fait, par un choix judicieux de l'unité de longueur, tous les côtés pouvaient être mesurés par des nombres entiers. Depuis, ce théorème a été démontré d'une dizaine de manières différentes.

Nous convenons qu'un rectangle est « quadrable » s'il existe un pavage par des carrés tous différents. En 1909, Z. Moron découvrit le premier rectangle  $32 \times 33$  quadrable par neuf pavés carrés de côtés respectifs égaux à 1, 4, 7, 8, 9, 10, 14, 15 et 18. Je vous invite à réaliser ces pavés en carton et à chercher l'assemblage en rectangle. La réponse se trouve dans *Unsolved Problems in Geometry*, par Hallard Croft, Kenneth Falconer et Richard Guy, éditions Springer-Verlag, New York, 1991). Moron quadra également un rectangle  $44 \times 65$  avec dix carrés (voir la figure 2).

Puis, en 1939, R. Sprague résolut la quadrature du carré par 55 pavés différents. Toutefois sa solution manquait de pureté : il quadrerait le carré à l'aide de son côté et d'un rectangle dont il donnait une quadrature, mais qui utilisait des pavés carrés déjà utilisés. Les quadratures sans aucun pavé rectangle sont aujourd'hui nommées simples, bien qu'elles soient plus difficiles à trouver.

Vers 1940, R. Brooks, C. Smith, A. Stone et W. Tutte découvrirent la première quadrature simple d'un carré : Martin Gardner, qui fut longtemps l'auteur des articles de *Visions mathématiques* dans cette même revue, a aussitôt expliqué leur méthode au grand public : ils partirent de la représentation d'un rectangle quadrable quelconque par un graphe nommé diagramme de Smith. Toute ligne horizontale du rectangle quadré correspond à un sommet de ce diagramme, et chaque pavé correspond à un arc. Cet arc lie les deux sommets correspondant aux droites horizontales qui rencontrent les côtés horizontaux du pavé, et il est indexé par la taille du pavé qu'il décrit.

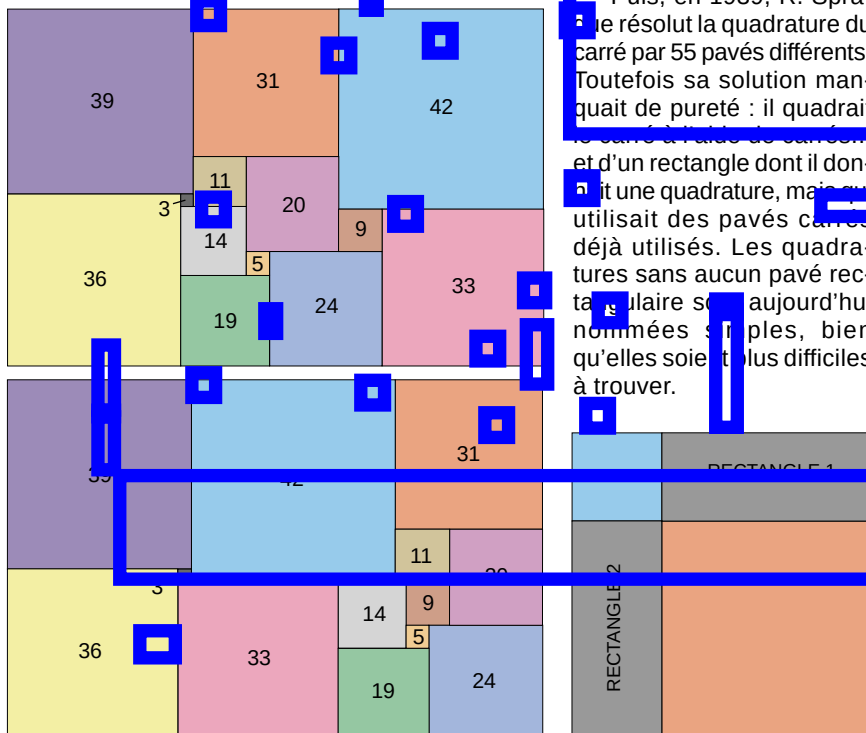
Si chaque arc du diagramme de Smith était un fil électrique de résistance égale à un ohm et si les indices étaient l'intensité (en ampère) des courants électriques passant par le fil, alors le diagramme total formerait un circuit électrique obéissant aux lois du courant qui admettent les circuits réels. En donnant des signes opposés aux courants qui ont des sens opposés, ces lois sont :

1. L'intensité totale dans un sommet est nulle, sauf pour les sommets où le courant entre dans le circuit et pour ceux d'où il sort.

2. La somme algébrique des intensités le long d'un circuit fermé est nulle.

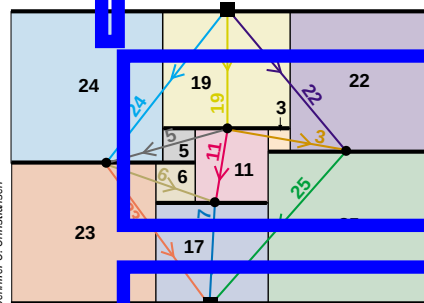
La validité de ces lois pour les rectangles quadrés résulte des propriétés géométriques de la quadrature. Par exemple, la seconde loi est vérifiée parce que la somme des côtés des carrés, le long du côté vertical gauche, est égale à la somme des côtés des carrés pour le côté droit. Utilisant les principes de la théorie des circuits électriques, les quatre mathématiciens mirent au point des méthodes systématiques pour construire ou analyser des rectangles quadrables, dans le dessein d'obtenir un carré simplement quadrable.

Le premier résultat fut inattendu : R. Brooks avait trouvé un rectangle  $75 \times 112$  quadré par 13 pavés, et il avait construit le puzzle correspondant. Sa



1. Avec un même ensemble de pavés carrés, on peut paver un rectangle  $112 \times 75$  de deux manières (à gauche). Quand des pavés tous différents permettent de paver de deux façons un même rectangle, on peut associer ces deux pavages à deux carrés pour paver un carré plus grand (à droite).

Jennifer C. Christiansen



**2. Un rectangle carré peut être représenté par un circuit électrique. Chaque ligne horizontale correspond à un nœud. Le courant entre par le nœud supérieur. Son intensité, sur chaque fil conducteur (ou arête du graphe) est égale à la longueur du côté du carré.**

mère joua avec... et reconstitua le rectangle, mais sa solution différait de celle de son fils. C'était la première fois que l'on trouvait ainsi un même rectangle quadrable de deux façons différentes.

On avait espéré trouver deux rectangles de même dimension, quadrables par des pavés différents, car, en ajoutant deux carrés, on aurait obtenu une quadrature de carré. Le rectangle de R. Brooks ne conduisait pas à une telle solution, car le même ensemble de pavés est utilisé dans les deux solutions. En examinant les deux diagrammes de Smith des deux pavages, les mathématiciens comprirent qu'en court-circuitant deux sommets d'un diagramme, ils obtenaient l'autre diagramme. Les deux points ainsi « identifiés » (le terme mathématique qui correspond au court-circuit) étaient au même potentiel électrique, de sorte que les courants électriques n'étaient pas modifiés.

Partant de cette observation, ils trouvèrent d'autres moyens d'utiliser les diagrammes de Smith et, finalement, trouvèrent un carré simplement quadrable par 69 pavés. R. Brooks trouva ensuite un carré simplement quadrable par seulement 39 pavés.

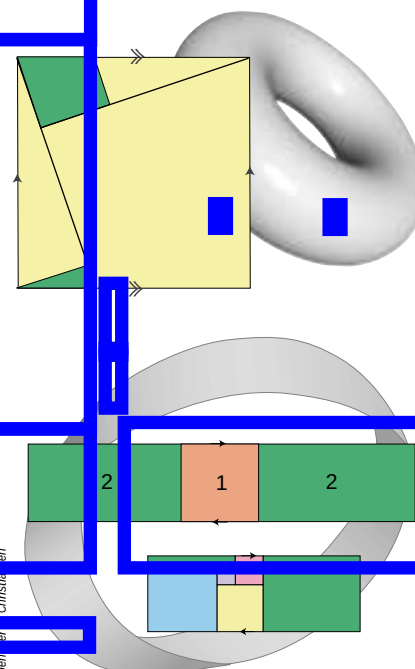
En 1943, T. Wilcocks trouva un carré quadrable par 24 pavés, mais le pavage n'était pas simple. Vers la même époque, J. Bouwkamp et ses collègues cataloguèrent tous les rectangles quadrables avec moins de 25 pavés : il en existe 3 663. En 1962, A. Duivestijn démontra que tout carré simplement quadrable doit contenir au moins 21 pavés ; puis, vers 1978, il trouva un tel carré et prouva qu'il était le seul à 21 pavés. En 1992, J. Bouwkamp et A. Duivestijn publièrent les 201 carrés simplement quadrables avec 21 à 25 pavés : leur liste est exhaustive.

Bien que ces résultats résolvent presque la quadrature du carré, bien des variantes du problème demeurent ouvertes. Comment quadrer les dominos, ou rectangles deux fois plus longs que larges ?

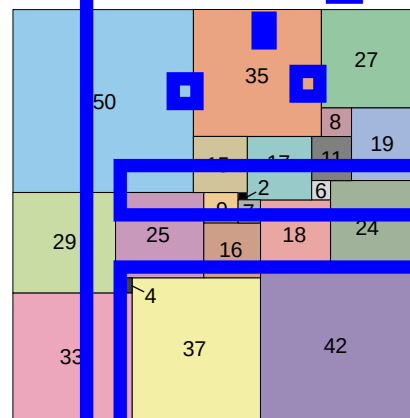
Il existe une quadrature évidente, avec deux carrés, mais en existe-t-il d'autres ?

Une autre possibilité consiste à paver d'autres surfaces que des rectangles : c'est ce qu'a tenté David Gale. Les topologistes savent que des surfaces intéressantes apparaissent quand on recolle (que l'on « identifie ») les côtés opposés d'un rectangle, avec ou sans torsion. Le recollage sans torsion des deux premiers côtés d'un rectangle conduit à un cylindre. Si l'on recolle les deux côtés opposés après avoir tordu le bord d'un demi-tour, on forme un ruban de Möbius (voir la figure 3). Quand on recolle les quatre côtés par paire de côtés opposés et sans torsion, on obtient un tore. Quand une paire de côtés est recollée après une torsion d'un demi-tour et que l'autre paire est recollée sans torsion, on obtient une bouteille de Klein, sans intérieur ni extérieur. Enfin, quand on recolle les côtés deux à deux, en tordant d'un demi-tour dans les deux cas, on obtient un plan projectif, impossible à représenter dans notre espace à trois dimensions.

Évidemment tout pavage du rectangle conduit à un pavage de la surface formée après un de ces recollages, mais cette surface peut posséder d'autres pavages que ceux du rectangle initial, parce que ses pavés peuvent déborder des bords du rectangle. La partie inférieure de la figure 3 montre un ruban de Möbius pavé avec deux carrés seulement, de côtés respectivement égaux à 1 et à 2. Les flèches indiquent les recolllements. Bien



**3. Tore (en haut) et ruban de Möbius (en bas) peuvent être pavés. Les côtés marqués de flèches similaires doivent être recollés, de sorte que les flèches coïncident. Les zones vertes forment alors un pavé, de même que les zones jaunes.**



**4. L'unique carré quadré par le nombre minimal de pavés : 21.**

qu'un carré semble être coupé en deux rectangles, ces deux parties sont réunies lorsque les côtés sont identifiés. Cependant le lavage du ruban de Möbius a une propriété remarquable : il peut servir à une frontière commune avec lui-même. Deux de ses côtés opposés sont collés ensemble, de sorte qu'il devient lui-même un ruban de Möbius, et non un carré. En 1993, S. Chapman découvrit un pavage du ruban de Möbius sans cette particularité, avec cinq pavés (bande inférieure de la figure 3). Aucun pavage ne comporte moins de cinq pavés.

Un cylindre peut également être quadré, mais avec au moins neuf pavés, comme pour les rectangles. Des pavages « triviaux » proviennent simplement des rectangles de Moron, avec un recollage des deux côtés, mais il existe également d'autres pavages non triviaux à neuf pavés. Ces derniers ont la même taille que les pavés de Moron.

Pour le cylindre comme pour le ruban de Möbius, les côtés des carrés doivent être parallèles aux bords des surfaces. Cependant ni le tore, ni la bouteille de Klein, ni le plan projectif n'ont de bords, de sorte que les pavés peuvent être également en biais. De fait, on peut ainsi paver un tore avec seulement deux carrés, pourvu que l'on accepte que deux côtés d'un même carré se touchent (en prime, une preuve du théorème de Pythagore est cachée dans cette figure : la voyez-vous ?).

On peut aussi paver d'une bouteille de Klein. Tout pavage d'un ruban de Möbius longe celui de la bouteille de Klein par recollage du ruban le long de son unique bord, et il n'existe pas d'autre manière de paver une telle bouteille avec au plus six pavés carrés. On ignore si la propriété reste vraie pour sept ou huit pavés, et l'on sait qu'elle est fautive pour neuf pavés.

Enfin le pavage du plan projectif est un problème ouvert, tout comme le pavage du cube : à vous !

Jennifer C. Christiansen

# L'art du tri

JEAN-PAUL DELAHAYE

*La loi du moindre effort dans les méthodes de tri de données ou de cartes. Gagnez un temps précieux !*

Pour vérifier qu'un jeu est complet ou identifier les cartes absentes, pour préparer certains tours de prestidigitation ou un tournoi de bridge, il faut trier les cartes. Les problèmes posés par ces tris ressemblent à ceux qu'on doit traiter les informaticiens pour classer des données. Pour les résoudre, une science inattendue de l'économie des gestes et du travail a été mise en œuvre.

Les mathématiciens ont compris il y a 40 ans que trier n'était pas si simple et, depuis, ils ont étudié comment préserver le précieux temps de calcul des ordinateurs. Parmi les différentes méthodes proposées, certains algorithmes remarquables de tri informatique s'adaptent au classement des cartes et illustrent que le plus rapide n'est pas le plus simple. Mais, comme on le verra aussi, le classement des cartes a ses propres subtilités.

## LE TRI PAR INSERTION

Le tri *par insertion* est sans doute le plus naturel de tous les tris à la main, et c'est d'ailleurs celui que la plupart des gens utilisent pour classer leurs cartes quand ils ramassent leur main au bridge ou quand ils doivent trier alphabétiquement des noms, des titres, ou des livres.

L'algorithme de tri par insertion est le suivant : on prend les cartes une à une, et l'on compose un nouveau paquet en plaçant chaque carte qu'on introduit à la place qu'elle doit avoir parmi celles qui sont déjà placées. À chaque instant du tri par insertion, une partie du paquet est parfaitement classée et l'autre encore désordonnée.

On mesure la complexité d'un tri en comptant le nombre de comparaisons entre deux cartes (ou deux nombres s'il s'agit de nombres) qu'on doit faire pour classer l'ensemble. Plus ce nombre est grand, moins bon est le tri ; plus il est petit, meilleur il est.

Étudions ce qui se passe pour le tri par insertion. Quand on place la première carte, on n'effectue aucune comparaison. Quand on place la seconde carte, on effectue une comparaison : il faut savoir si la carte qu'on introduit est plus faible ou plus forte que celle qui est déjà placée. Quand on place la troisième carte, on effectue deux comparaisons : la carte nouvelle est comparée avec chacune des deux cartes déjà en place pour savoir si elle doit se placer devant les deux, au milieu ou derrière. Et ainsi de suite : le placement de la carte numéro  $p$  peut nécessiter  $p - 1$  comparaisons. Au total donc, on aura effectué au plus  $1 + 2 + \dots + (n - 1) = n(n - 1)/2$  comparaisons quand la  $n$ -ième carte aura été placée. J'ai bien précisé « au plus », car, quand vous placez la carte numéro  $p$ , vous n'avez vraiment besoin d'effectuer  $p - 1$  comparaisons que si sa place est en dernier (vous pouvez placer la carte  $p$  dès que vous rencontrez une carte plus forte).

Pour 10 données, cela fait au plus 45 comparaisons ; pour 100 données, au plus 4 950 ; pour 1 000 données, au plus 499 500. Car, enfin, le nombre moyen de comparaisons, il faut diviser ces nombres par 2.

L'augmentation du travail à faire (dans le pire cas, ou en moyenne) est une fonction polynôme de degré deux du nombre de cartes. On dit que l'algorithme est quadratique et en pratique cela signifie qu'il devient rapidement inutilisable.

## LE TRI RAPIDE

Le tri-rapide est plus difficile à effectuer, mais le jeu en vaut la chandelle, car il nécessite, au total, bien moins de comparaisons. Son avantage par rapport au tri par insertion est très net quand le nombre de cartes à trier augmente. Nous décrivons cet algorithme par étapes.

**Étape 1.** On prend la première carte (qu'on appellera carte pivot), on la place sur la table au milieu et en haut. La carte pivot constitue la ligne 1. On forme alors deux paquets en comparant toutes les cartes restantes avec la carte pivot : les cartes plus faibles sont mises en paquet à gauche sur la ligne 2, les plus fortes sont mises à droite sur la ligne 2 (voir la figure 2).

**Étape 2.** On prend toutes les cartes du paquet de gauche de la ligne 2, sauf la première qui sert comme précédemment la carte pivot et qu'on laisse sur la ligne 2. On sépare comme précédemment ce paquet en deux nouveaux paquets plus petits qu'on place sur la troisième ligne. Le paquet de droite de la ligne 2 est traité de la même manière. Il y a donc maintenant une carte sur la ligne 1, deux sur la ligne 2, et quatre petits paquets sur la ligne 3.

**Étape 3.** On retire une carte de chaque paquet de la ligne 3 qui y reste et l'on sépare le reste de chaque paquet comme précédemment en deux, ce qui donne en tout 8 paquets qu'on place sur la ligne 4.

On continue de même jusqu'à n'avoir plus que des cartes seules, chaque paquet ayant été totalement fractionné. Les cartes sont alors disposées en une structure ressemblant à un arbre à l'envers. À chaque carte de l'arbre sur la ligne  $n$  sont associées deux cartes au plus de la ligne  $n + 1$ , qu'on appellera ses fils gauche et droit ; la carte sera bien sûr appelée la carte père de ses deux fils (le mouvement *Politically Correct*, aux États-Unis, oblige les informaticiens à parler de cartes filles et de cartes mères, mais en France nous pouvons garder une certaine liberté de langage).

Quand toutes les cartes sont ainsi disposées en un arbre à l'envers, on les ramasse en « repliant l'arbre » jusqu'à n'avoir plus qu'un seul paquet (qui est alors classé) : on repère un paquet sur une ligne  $n$  n'ayant aucun paquet asso-

cié sur la ligne  $n + 1$  (le paquet n'a pas de fils), on le place sur le paquet correspondant (son père) de la ligne  $n - 1$  s'il s'agit d'un fils gauche, et en dessous s'il s'agit d'un fils droit.

La complication de ce tri inventé en 1962 par C. Hoare en vaut vraiment la peine, car le nombre de comparaisons qu'on doit réaliser pour classer  $n$  cartes (ou données) est cette fois en moyenne à peu près  $n \log_2(n)$ . Dans cette formule, il faut arrondir le logarithme en base 2 de  $n$  à l'entier supérieur (rappelons que  $\log_2(2) = 1$ ,  $\log_2(4) = 2$ ,  $\log_2(8) = 3$ , etc.) En définitive, pour 10 données, il faut environ 40 comparaisons, pour 100 données, environ 700, et pour 1 000, environ 10 000, ce qui est sensiblement moins qu'avec le tri par insertion.

La justification de ce  $n \log_2(n)$  est la suivante. D'une part, pour construire chaque ligne, il faut comparer chaque carte restante à une carte de la ligne précédente. Il faut donc faire environ  $n$  comparaisons à chaque position de ligne. D'autre part, le nombre de lignes est environ  $\log_2(n)$ , car il y a 1 carte au niveau 1, 2 au niveau 2, 4 au niveau 3,  $2^{n-1}$  au niveau  $n$ . Ce

calcul n'est qu'une évaluation, car certains paquets s'épuisent plus vite que d'autres, mais l'idée expliquée peut être rendue parfaitement rigoureuse.

Dans le tri-rapide, la séparation par le pivot est systématiquement déséquilibrée, le tri-rapide a exactement une complexité de  $n(n-1)/2$  comparaisons, c'est-à-dire la complexité du tri par insertion : ce qui distingue les deux cas, c'est le comportement en moyenne, qui est toujours quadratique pour le tri par insertion, alors qu'il est en  $n \log_2(n)$  pour le tri-rapide.

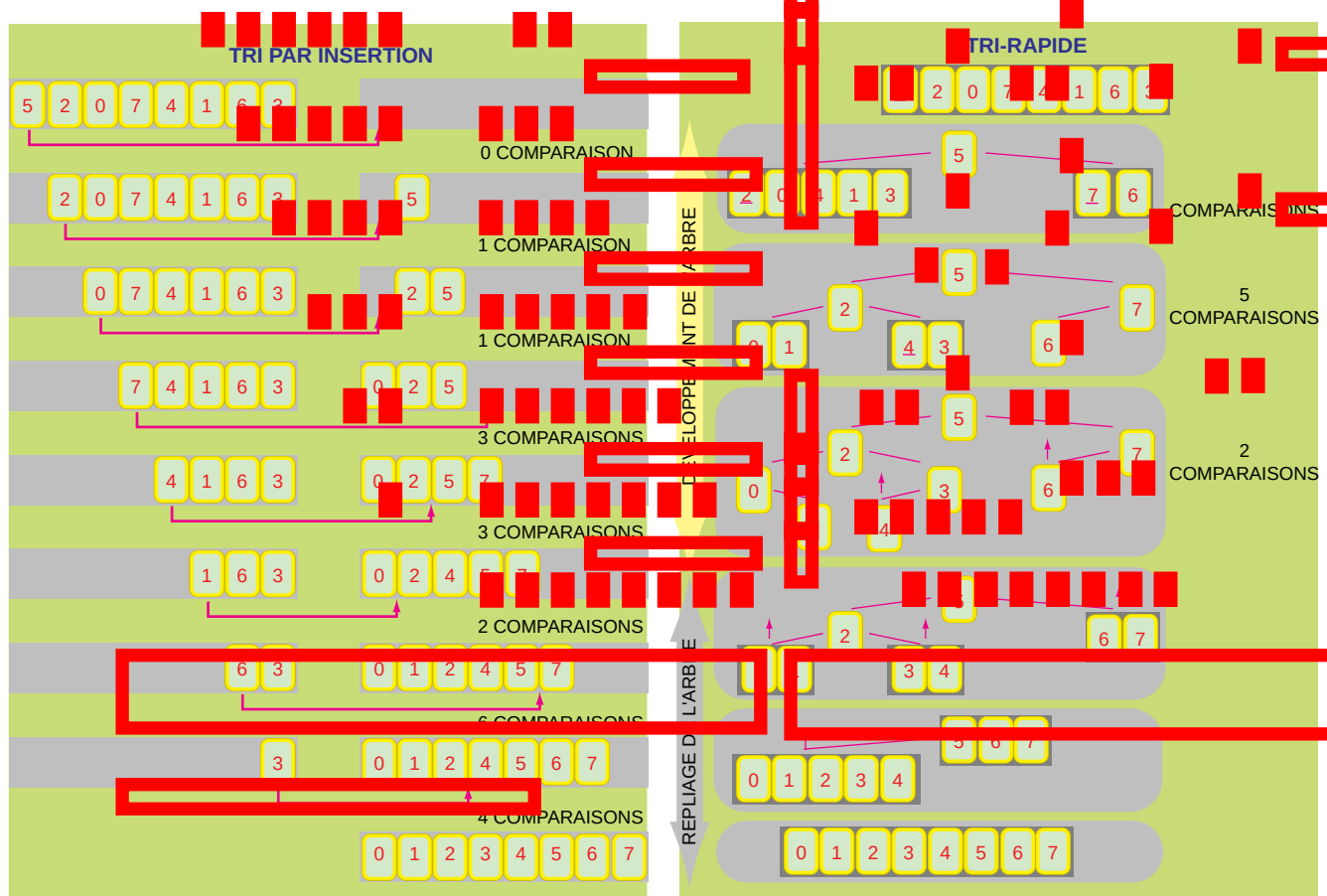
Assez paradoxalement, les cas où le tri-rapide est le plus lent se présentent quand le paquet initial est déjà totalement ou partiellement trié. Statistiquement, ces mauvais cas se présentent très rarement (d'où la moyenne en  $n \log_2(n)$ ). Cependant il se trouve que les données qu'on doit trier ne sont bien souvent pas statistiquement quelconques et qu'en pratique elles sont au contraire souvent partiellement ou totalement triées : se reposer sur la rareté statistique (très différente de la rareté pratique) des mauvais cas est donc un mauvais calcul (que certains programmeurs mal informés font pourtant).

Il existe maintenant un moyen simple d'arranger les choses et qui permet de conclure en fait que le tri-rapide est un algorithme qui faut

C'est aujourd'hui ce qu'on recommande à ceux qui en informatique, veulent utiliser le tri-rapide. Avec cette précaution, le tri-rapide est alors très efficace, et bien meilleur que le tri par insertion.

## LE MIEUX QUE L'ON PUISSE FAIRE

C'est même un algorithme qu'on ne peut pas espérer améliorer, car  $n \log_2(n)$  est la borne la meilleure qu'on puisse atteindre : aucun algorithme de tri de données n'utilisant que des comparaisons ne peut en faire moins de  $n \log_2(n)$  en moyenne. La justification de ce résultat est intéressante. Notons qu'il y a  $n!$  classements différents des cartes et que pour les distinguer il faut nécessairement les classer en  $n!$  groupes. Avec une comparaison, on ne peut discriminer que 2 classements ; avec 2 comparaisons, on ne peut discriminer que 4 classements, etc. Pour discriminer les  $n!$  classements possibles



1. Le tri par insertion est naturel et simple à programmer. Malheureusement, ce n'est pas un tri efficace, car, pour trier  $n$  données, il lui faut en moyenne effectuer  $n^2/4$  comparaisons.

2. Le tri-rapide est beaucoup plus efficace, même s'il est plus complexe à programmer : pour trier  $n$  données, il lui faut, en moyenne, effectuer  $n \log_2 n$  comparaisons.

n cartes, il faut un nombre de comparaisons  $m$  tel que  $2^m \geq n$ . Le résultat annoncé s'obtient en utilisant la célèbre formule de Stirling :  $n! \approx \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$ , qui donne  $\log_2(n!) \approx n \log_2(n)$ . Pour discriminer tous les classements possibles de cartes (ce qui est nécessaire pour trier les cartes), il faut donc au moins effectuer  $n \cdot \log_2(n)$  comparaisons.

### TRI DE CARTES PERFORÉES

Pour les cartes, le tri-rapide n'est pas agréable, et encombrant. De plus, le tri-rapide n'utilise pas l'information que, dans un jeu normal, il y a une carte de chaque sorte ni plus, ni moins.

En informatique, bien souvent, on ne sait pas si les données qu'on doit trier appartiennent à un ensemble de valeurs réduit, mais si c'est le cas il existe d'autres algorithmes qui peuvent être préférés au tri-rapide.

Lorsqu'on doit trier des nombres dont on sait qu'ils forment une suite complète (ou seulement contenue dans un intervalle assez petit), il existe un algorithme amusant qui fut utilisé à l'époque des cartes perforées,

puvant s'effectuer mécaniquement avec une grande rapidité.

Je vais présenter l'idée de ce tri, appelé tri par base sur un exemple. Imaginons que nous voulions trier les nombres suivants, tous inférieurs à 16 : 2 ; 7 ; 4 ; 1 ; 15 ; 3 ; 13 ; 6 ; 12 ; 5. On les écrit en base 2, ce qui donne cette liste de nombres binaires de quatre chiffres binaires au plus chacun : 10 ; 111 ; 100 ; 1001 ; 1 ; 1111 ; 11 ; 1101 ; 10 ; 1100 ; 101.

On les classe selon le dernier chiffre binaire : ceux dont ce dernier chiffre binaire est 0 sont amenés en tête : 10 ; 100 ; 1000 ; 1111 ; 1100 ; 101 ; 1101 ; 101.

On les classe selon l'avant-dernier chiffre binaire : ceux dont cet avant-dernier chiffre binaire est 0 sont amenés en tête en respectant l'ordre qu'ils ont les uns par rapport aux autres (c'est important) :

100 ; 1100 ; 1001 ; 1 ; 1101 ; 101 ; 10 ; 1111 ; 1101 ; 1111 ; 11.

On continue ainsi en les classant selon l'avant-avant-dernier chiffre binaire, puis l'avant-avant-avant-dernier chiffre binaire.

1001 ; 1 ; 10 ; 1111 ; 1100 ; 1101 ; 101 ; 110 ; 111 ; 1111 ; 11.

1 ; 10 ; 1111 ; 100 ; 101 ; 110 ; 111 ; 1001 ; 1100 ; 101 ; 1111.

Et voilà, c'est bon :

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

Avec des cartes perforées, il suffisait d'inscrire sur chaque carte son numéro en notation binaire, de sélectionner mécaniquement toutes les cartes dont le dernier chiffre est un zéro, de les extraire d'un coup et de les faire passer devant, etc. Une méthode d'encoche permet (voir la figure 3) de faire l'opération de sélection instantanément avec une tige métallique.

Ce tri appartient à l'histoire de l'informatique, et d'ailleurs sa première description est due à L. J. Comrie qui, en 1921, l'a introduite en présentant des équipements pour cartes perforées. Du matériel de bureau dans les années 1960 était fondé sur cette méthode.

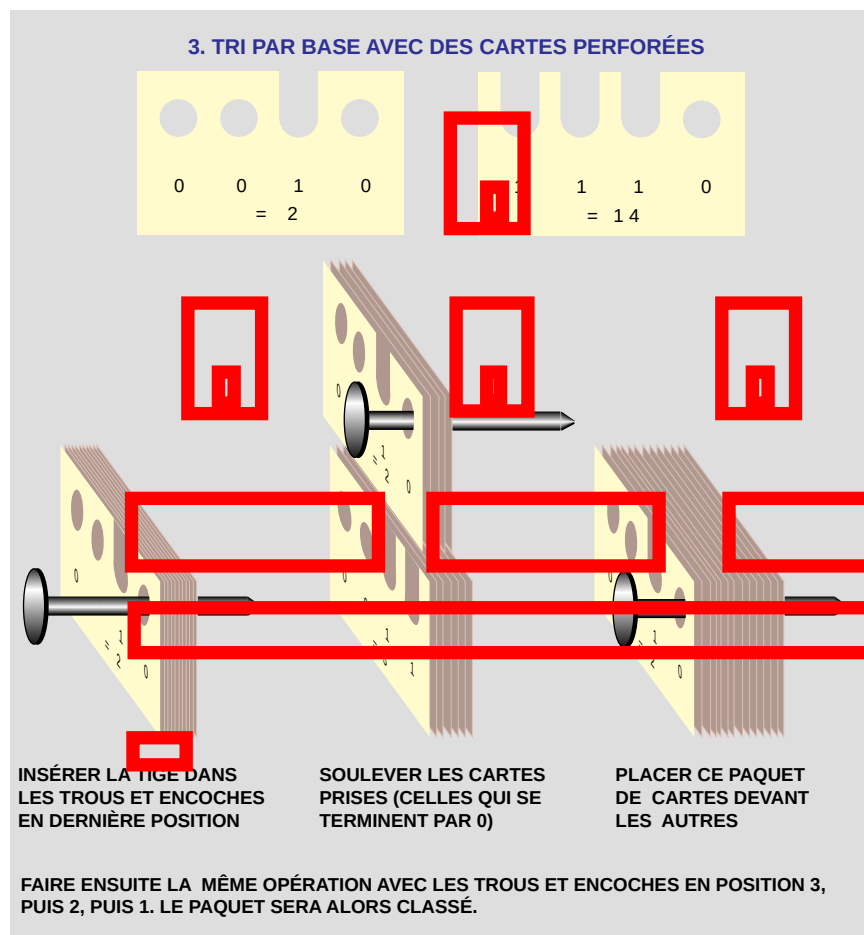
Le classement de fiches étant maintenant fait dans la mémoire des ordinateurs, le tri est moins pratiqué. Cependant, Thomas Cormen fait remarquer que pour trier un million de nombres de 64 chiffres binaires, un tel tri (programmé et non plus bien sûr effectué avec des cartes perforées) supporte bien la comparaison en temps de calcul avec le tri-rapide. Il ne faut donc pas l'oublier.

La comparaison sur critère mathématique (comme nous l'avons faite entre le tri par insertion et le tri-rapide) n'est pas facile car le tri par base utilise la décomposition en base 2 des nombres (l'obtenir est bien sûr un travail). De plus, on ne compare que des chiffres binaires et non plus des nombres. On ne peut donc pas évaluer le tri par base par la méthode utilisée précédemment, il faut mener des analyses plus fines. On montre cependant qu'une fois que la taille maximale des nombres à trier est fixée, le temps de calcul du tri par base est proportionnel au nombre de données à trier : il faut  $kn$  étapes de calcul pour trier  $n$  données,  $k$  étant une constante qui dépend de la taille maximale des données à trier.

En apparence, cela semble signifier qu'il faut toujours préférer cet algorithme aux deux précédents. Mais la constante de proportionnalité  $k$  étant assez grande, cette conclusion n'est vraie que pour des grandes valeurs de  $n$ .

En définitive, si vous devez réaliser un tri de données, choisissez le bon algorithme n'est pas simple et demande une analyse préalable. Néanmoins la règle suivante devrait suffire dans presque toutes les situations :

– (a) s'il y a peu de données à trier (moins de 100), utilisez le tri par inser-



in, facile à écrire et pas si mauvais que cela ;  
 – (b) si on utilise le tri rapide (avec mélange préalable), sauf si vous avez une très grande quantité de nombres à traiter et qu'ils restent dans un petit intervalle, auquel cas vous devez tester le tri par base.

## TRI PAR SÉPARATIONS ET RETOURNEMENTS

Avec des cartes à jouer, le tri par base s'adapte très bien pour le jeu de 32 cartes. On considère qu'on veut arriver à un jeu classé comme suit : 7, 8, 9, 10, valet, dame, roi et as, en plaçant d'abord les ♥, puis les ♦, puis les ♠ et enfin les ♣. La carte numéro 0 est donc le 7♥ et la carte numéro 31 l'as ♣.

En pratique, le tri par base conduit au procédé suivant. On prend le jeu face en dessous. On retourne les cartes une par une en plaçant face au-dessus à gauche les cartes 7, 8, 9, valet et roi (ce sont les cartes dont le numéro écrit en binaire se termine par 0) et à droite les autres. Une fois ce premier passage de toutes les cartes, on place le paquet de gauche sur celui de droite, on retourne le tout et l'on effectue un

second passage en mettant cette fois les 7, 8, 9, valet et dame à gauche, et les autres cartes à droite. Pour le troisième passage, on place les 7, 8, 9 et 10 à gauche, pour le quatrième les couleurs cœur et pique à gauche et pour le cinquième et dernier passage les rouges à gauche. Le jeu est alors trié du 7♥ à l'as ♣.

## LE TRI PAR SÉPARATIONS SANS RETOURNEMENT

L'adaptation directe du tri par base au jeu de 32 cartes que nous venons de décrire présente un défaut qui en ralentit la pratique : il faut retourner les cartes une à une, ce qui retarde la décision qu'on doit prendre de la placer à droite ou à gauche. À bien y réfléchir donc, un tri de cartes basé fondé sur un principe de séparations successives évitant cet inconvénient doit être possible.

Voilà une telle méthode en 5 passages que j'ai trouvée par tâtonnements et dont je ne connais pas l'adaptation au jeu de 52 cartes. On prend le jeu face vers soi et on le partage cinq fois de suite en deux paquets en faisant simplement glisser les cartes, une à une, à droite ou à gauche.

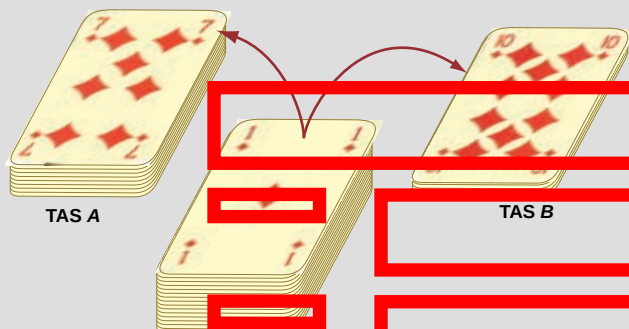
premier passage : mettre les cartes 7, 8, 9, V et D à gauche et les autres (10, A, R) à droite ;  
 deuxième passage : mettre les cartes 7, 8, 9, 10, R à gauche et les autres (V, D, A) à droite ;  
 – troisième passage : mettre les cartes 7, 8, 9, 10 à gauche et les autres (V, D, A) à droite ;  
 – quatrième passage : mettre les cartes ♥, ♦ à gauche et les autres ♥, ♠ à droite ;  
 – cinquième passage : mettre les rouges à gauche et les noires à droite.

## LE TRI PAR SÉPARATIONS SANS TABLE

Voici une autre adaptation du tri par base pour les cartes (que j'ai encore trouvée par tâtonnements) ; il permet de trier sans table les cartes d'un jeu de 32 cartes en faisant simplement passer les cartes plusieurs fois de suite d'une main à l'autre et en plaçant la carte qu'on déplace en dessous ou au-dessus du paquet. Voici les séparations à effectuer :

– premier passage : mettre les cartes 8, 9, dame et roi au-dessus et 7, 10, valet et as en dessous ;

### 4. TRI D'UN JEU DE 32 CARTES SANS RETOURNEMENT



**PASSAGE 1** 7 9 V R À GAUCHE (A)  
 8 10 D As À DROITE (B)  
 PLACER LE TAS A SUR LE TAS B

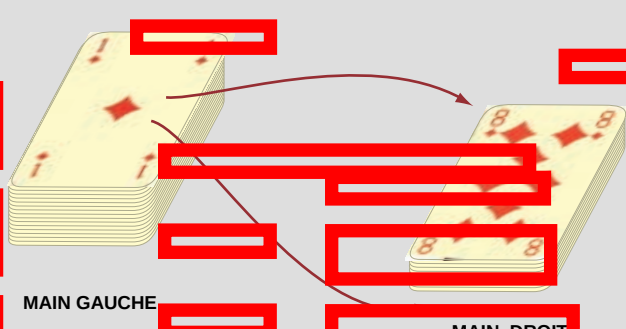
**PASSAGE 2** 9 10 R As À GAUCHE (A)  
 7 8 V D À DROITE (B)  
 PLACER LE TAS A SUR LE TAS B

**PASSAGE 3** 7 8 9 10 À GAUCHE (A)  
 V D R As À DROITE (B)  
 PLACER LE TAS A SUR LE TAS B

**PASSAGE 4** ♣ ♦ À GAUCHE (A)  
 ♥ ♠ À DROITE (B)  
 PLACER LE TAS A SUR LE TAS B

**PASSAGE 5** ROUGES À GAUCHE (A)  
 NOIRES À DROITE (B)  
 PLACER LE TAS A SUR LE TAS B

### 5. TRI D'UN JEU DE 32 CARTES SANS TABLE



**PASSAGE 1** 8 9 D R AU-DESSUS  
 7 10 As EN DESSOUS

**PASSAGE 2** 9 10 V D AU-DESSUS  
 7 8 As EN DESSOUS

**PASSAGE 3** 7 8 9 10 DE ♦ ET DE ♣  
 V D R As DE ♥ ET DE ♠ AU-DESSUS  
 7 8 9 10 DE ♥ ET DE ♠  
 V D R As DE ♦ ET DE ♣ EN DESSOUS

**PASSAGE 4** ♠ ET ♦ AU-DESSUS  
 ♣ ET ♥ EN DESSOUS

**PASSAGE 5** ROUGES AU-DESSUS  
 NOIRES EN DESSOUS

– deuxième passage : mettre les cartes 9, 10, valet, dame au-dessus et 7, 8, roi et as en dessous ;

– troisième passage : 1, 6, 8 et 10 de carreau et trèfle et valet, dame, roi et as de cœur et pique au-dessus, et les autres en dessous ;

– quatrième passage : mettre les ♠ et les ♦ en dessous, les ♥ et ♣ au-dessus ;

– cinquième passage : mettre les rouges au-dessus et les noires en dessous.

Avec un peu d'attention, vous classerez un jeu en moins de deux minutes, et avec un peu d'entraînement vous y arriverez même en une minute (l'exercice de concentration est assez amusant).

Un lecteur me donnera-t-il l'algorithme équivalent pour le jeu de 52 cartes ?

Peut-on faire ces classements en quatre séparations binaires seulement, au lieu des cinq proposées ? La réponse est non. Une démonstration par décompte des discriminations (comme pour  $n \cdot \log_2(n)$ ) permet d'établir que 4 séparations sont nécessaires pour un jeu de 32 cartes, mais ne permet pas d'aller plus loin. Pour prouver que 5 séparations sont nécessaires, un raisonnement plus difficile doit être élaboré, que m'a communiqué mon collègue Max Bachelier.

Ainsi la simple mise en ordre d'un jeu de cartes ou de données introduit des mathématiques si peu évidentes qu'elles n'ont été développées qu'au  $xx^e$  siècle. Dans le cas des tris informatiques, cette connaissance mathématique se traduit en millions de francs économisés. Les mathématiques font gagner de l'argent.

**Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.**  
e-mail : delahaye@lil.fr

**J.-C. ROUTIER et Eric WEGRZYNSKI, *Débuter la programmation avec SCHEME*, Thomson Publishing, 1997.**

**T. CORMEN, C. LEISERSON et R. RIVEST, *Introduction à l'algorithmique*, Editions Dunod, 1994. Traduction de : *Introduction to Algorithms*, MIT Press.**

**C. FROIDEVAUX, M. ST. GABRIEL et M. SORIA, *Type de données et algorithmes*, McGraw-Hill, 1990.**

**D. KNUTH, *The Art of Computer Programming*, volume 3 : *Sorting and Searching*, Addison-Wesley, 1973.**

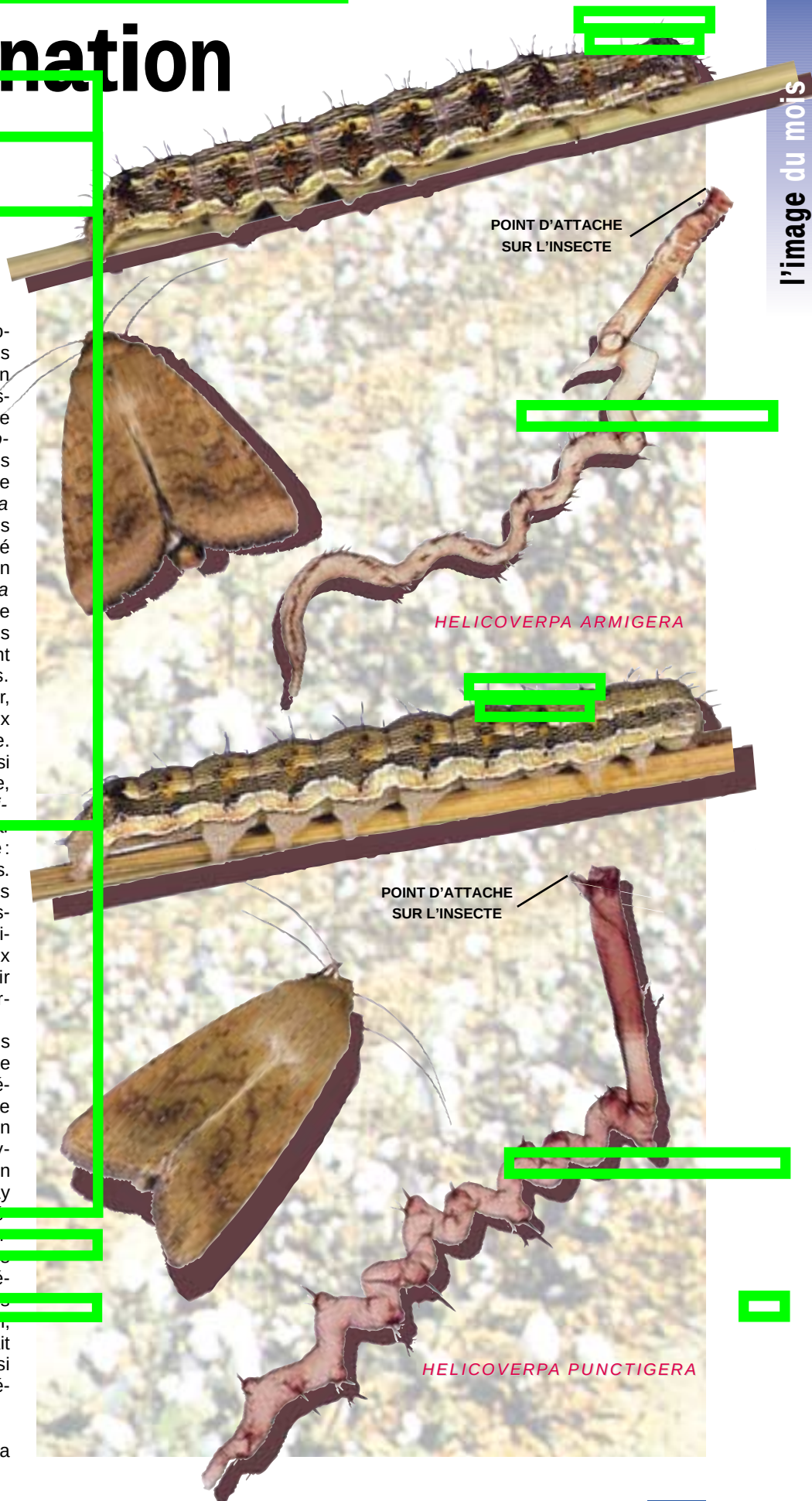
# Discrimination sexuelle

**H**elicoverpa armigera, un lépidoptère, parasite de nombreuses cultures, du coton à la luzerne en passant par les tomates. En Australie, *Helicoverpa armigera* coexiste avec une espèce endémique, *Helicoverpa punctigera*. Ces deux insectes ravagent également les plantations de coton. Les populations d'*Helicoverpa armigera*, qui vivent toute l'année dans les zones de culture, ont développé des résistances aux insecticides. En revanche, les populations d'*Helicoverpa punctigera*, renouvelées chaque année par des migrations en provenance des régions sèches du centre du pays, sont plus sensibles aux produits chimiques.

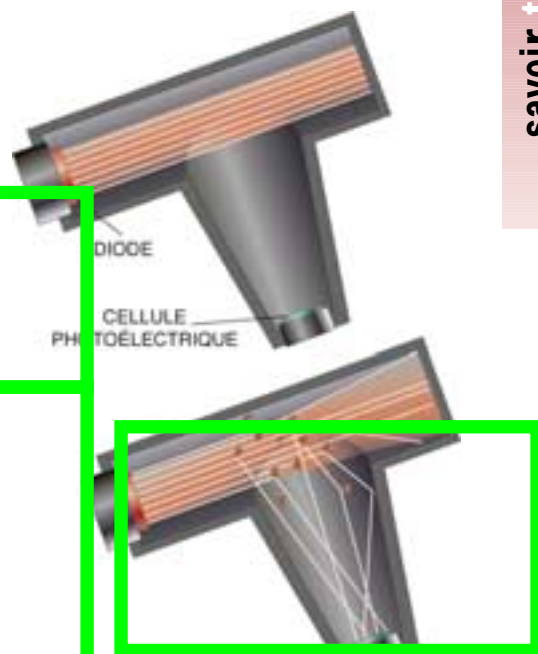
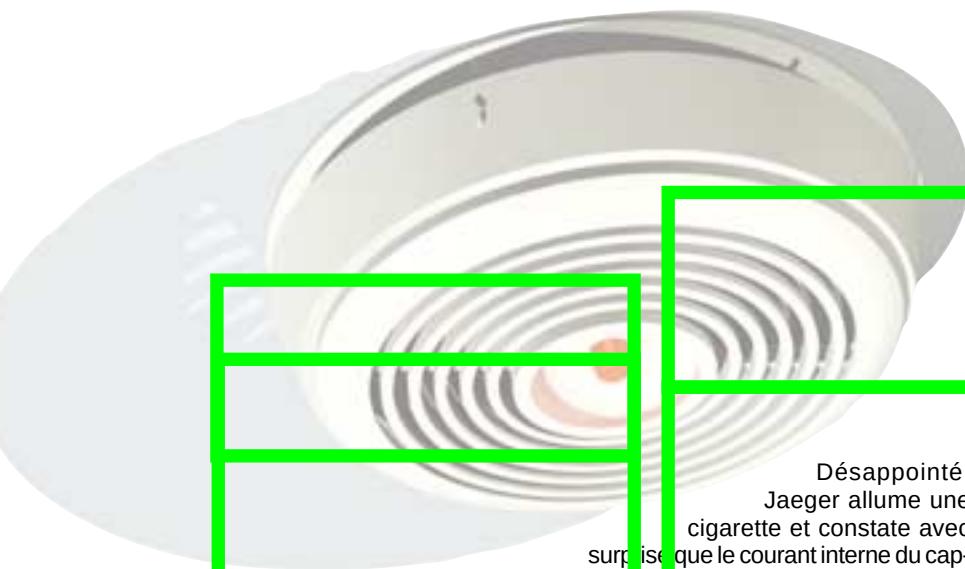
Pour adapter la lutte à l'agresseur, les planteurs doivent distinguer les deux espèces rapidement et avec certitude. Malgré leur étroite ressemblance, aussi bien au stade larvaire qu'au stade adulte, *Helicoverpa armigera* (en haut) et *Helicoverpa punctigera* (en bas) diffèrent par une caractéristique physique essentielle : la forme de leurs organes génitaux mâles. L'accouplement de deux de ces insectes étant physiquement impossible, la distinction morphologique rejoint la définition biologique des espèces : les deux populations qui ne peuvent pas avoir de descendance commune fertile forment deux espèces différentes.

L'observation au microscope des organes génitaux d'un insecte nécessite qu'ils conservent leur forme. On les prépare en injectant, avec une seringue hypodermique, de l'alcool sous pression dans les tissus, qui sont ainsi déshydratés et durcis, sans être déformés. Un nouvel outil, mis au point par Lindsay Drabsch et ses collègues, facilite cette opération délicate : le spécimen est maintenu sur la seringue avec de minuscules pinces trouées à leur extrémité. Différentes tailles de pinces sont adaptées à différents groupes d'insectes. Cet outil, nommé phalloblasteur (que l'on pourrait traduire par «phallopompe»), est ainsi précieux pour la classification phylogénétique des insectes.

Marcus MATTHEWS, CSIRO, Canberra



# Les détecteurs de fumée



**À** la fin des années 1930, le physicien suisse Walter Jaeger tente de mettre au point un détecteur de gaz toxique. Il charge électriquement des molécules d'air, créant des ions qui transportent un courant électrique entre deux électrodes. Il pense que lorsque des molécules de gaz pénétreront dans le capteur, elles se lieront aux ions, modifiant ainsi le courant électrique dans le capteur. Toutefois, son appareil ne fonctionne pas : l'introduction de petites quantités de gaz dans le capteur ne modifie pas la conductivité de l'air ionisé.

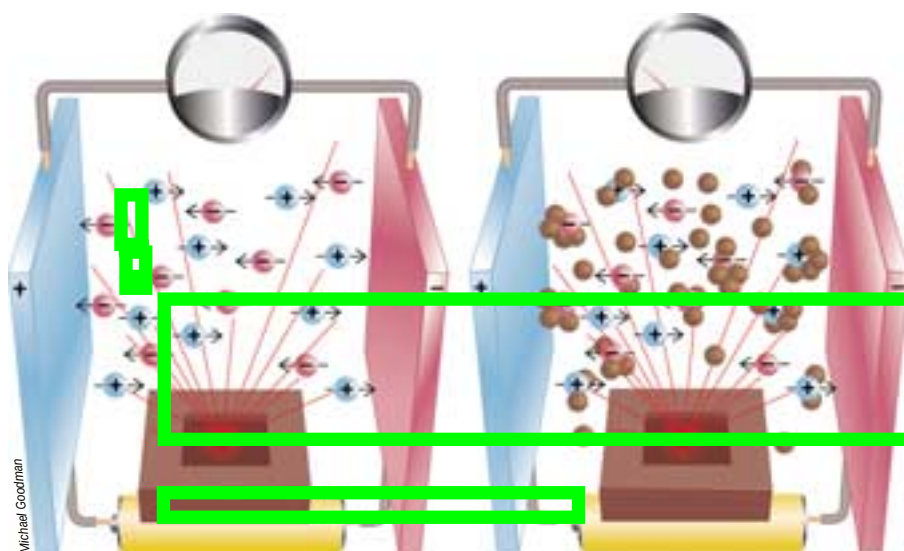
Désappointé, Jaeger allume une cigarette et constate avec surprise que le courant interne du capteur diminue. Il a obtenu avec des particules de fumée ce qu'il recherchait avec des molécules de gaz.

Dans les 30 ans qui ont suivi cette découverte, le progrès des connaissances en chimie nucléaire et en électronique a abouti à la mise au point de détecteurs de fumée peu coûteux reposant sur le principe imaginé par Jaeger. La commercialisation de ces appareils a commencé en 1969. Aujourd'hui, aux États-Unis, 93 pour cent des habitations en sont équipées, ce qui a divisé par deux le risque de périr dans un incendie domestique.

**UN DÉTECTEUR OPTIQUE** contient une diode électroluminescente qui émet un faisceau lumineux (*en haut*). Lorsque de la fumée pénètre dans le faisceau, la lumière est diffusée dans toutes les directions. Une cellule photoélectrique disposée latéralement reçoit alors de la lumière et déclenche l'alarme (*en bas*).

Certains détecteurs de fumée fonctionnent grâce à une cellule photoélectrique. Dans les détecteurs à diffusion de lumière, un faisceau lumineux est diffusé par la fumée vers une cellule photoélectrique. Dans les opacimètres, au contraire, c'est la réduction de l'éclairement d'une cellule photoélectrique, due à l'interposition de fumée sur le parcours du faisceau lumineux, qui déclenche l'alarme.

Les détecteurs ioniques sont plus sensibles aux feux couverts (avec production de flammes) que les détecteurs optiques, qui sont en revanche plus sensibles aux feux à évolution lente (feux couverts). Certains détecteurs contiennent les deux types de capteurs. Pour des pièces telles que la cuisine, où les fumées de cuisson déclencheraient de fausses alarmes, des détecteurs de chaleur sont mieux adaptés.



**UN DÉTECTEUR IONIQUE** contient un matériau radioactif, de l'américium 241, qui émet des particules alpha (*lignes rouges*). Celles-ci ionisent les molécules d'air (*sphères roses et bleues*). Les ions transportent alors un faible courant entre deux électrodes (*à gauche*). Les particules de fumée (*sphères marrons*) se lient aux ions (*à droite*) et réduisent l'intensité du courant, ce qui déclenche une alarme.

**Merton BUNKER, Association américaine de protection anti-incendie.**

# Epistémologie

## La revanche des sorcières. L'irrationnel et la pensée scientifique

Pierre Thuillier.

Éditions Belin (158 pages, 132F).

Depuis 25 ans, Pierre Thuillier nous gêne et nous ravit. Philosophe et historien des sciences, enseignant bien au fait du fonctionnement de la recherche depuis le temps où il travaillait à la DGRST, il nous donne, à nous scientifiques, des images dérangeantes, mais fidèles, de notre métier.

Le thème qu'il développe ici surprendra. Il veut montrer que la rationalité scientifique, ou plutôt la rationalité des scientifiques, côtoie sans la remplacer l'irrationalité de la religion, de la magie, de la parascience. On est bien loin des thèmes développés dans des livres aux titres apparemment voisins, comme *La revanche de Dieu*, où M. Keppel décrivait la montée universelle des fondamentalismes religieux, en cette fin de millénaire, ou *The Demon-haunted World*, où Carl Sagan démolissait les pseudo-sciences et les superstitions modernes.

À peine ouvert, ce petit livre se distingue par son iconographie, surprenante



Jean-Loup Charrier

**Newton se préoccupa beaucoup d'alchimie : est-ce la preuve que l'irrationnel affleure parfois en sciences ?**

et irrésistible, tant par sa variété que par sa qualité, et par les légendes détaillées qui l'accompagnent (attention : ne vous contentez quand même pas de ce qui est qu'un ajout au texte!).

La pensée de P. Thuillier est multiforme. D'une part, et comment s'en étonner quand on connaît un peu le monde scientifique, composé d'humains comme les autres, il veut montrer que beaucoup de scientifiques ont des aspirations philosophiques, mystiques, religieuses, magiques, et que la face irrationnelle de leur personnalité se reflète parfois jusque dans leur travail expérimental ou dans leurs interprétations théoriques. Que Newton ait été l'auteur de nombreux écrits alchimistes («J'ai fait voler Jupiter sur son aigle...») est bien connu, mais remarquablement documenté ici. En revanche, on sait sans doute moins (en tout cas, je ne savais pas) qu'Ørsted, le découvreur de l'action à distance d'un courant électrique sur une aiguille aimantée, fut puissamment influencé par la philosophie de la nature des romantiques allemands, notamment par Schelling, et par Kant. La chimie rappelle aussi que les théories atomiques ont longtemps été teintées de philosophie et de mysticisme, faute d'expérimentation possible, et il montre, dans un chapitre hétérogène et passionnant, les relations étroites entre physique quantique et mysticismes divers.

Un long chapitre étudie «les mythes de l'eau». J'avoue y avoir pris plaisir, mais ne pas y avoir trouvé de relation évidente avec les sciences, ni avec les scientifiques de l'eau. En revanche, le dernier chapitre sur «Le retour du Dieu Chaos» renoue avec le thème essentiel de l'ouvrage. Une citation étonnante de Henri Poincaré, dont on connaît le rôle dans la définition des fonctions bizarres à la base des fractales et autres fonctions à la mode, montre comment il introduisait dans la froide logique des mathématiques des jugements de valeur sur ces «monstres». Sur un air des thèmes essentiels de ce chapitre est la description de la recherche des lois de l'ordre statistique, de l'ordre des moyennes d'effets désordonnés, qui caractérise la théorie cinétique des gaz, accessible, que la théorie darwinienne de l'évolution. Encore une fois, très intéressant, très érudit, mais, à mon avis, sans grand rapport avec le titre du livre.

On l'aura compris, je pense que le livre de P. Thuillier ne tient pas ses promesses initiales, mais que nous aurions tort de nous en plaindre. Sa lecture est passionnante de bout en bout.

Guy OURISSON

# Chimie

## La chimie exocharmique

Paul Debye, 2<sup>e</sup> édition.

Éditions De Boek (137 pages).

## Chemical Curiosities

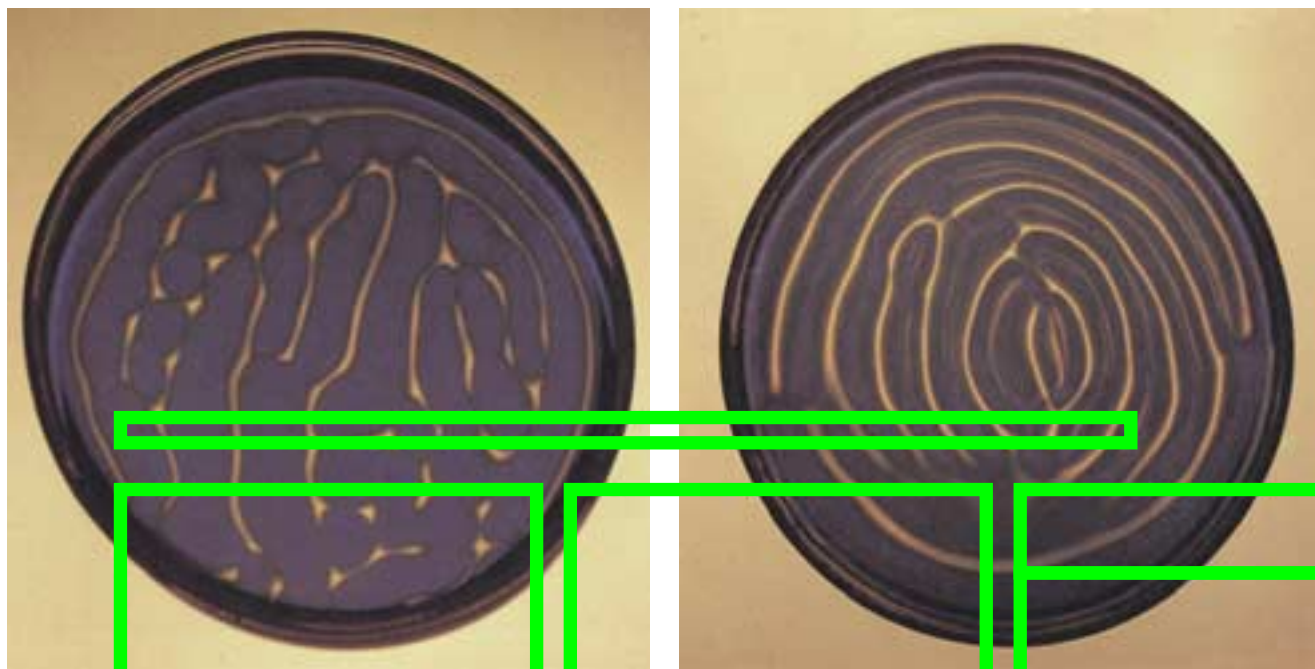
H.W. Foelky et W. Möckel.

Éditions V.C.H. (339 pages).

Il a existé, au siècle dernier, un genre de diffusion de la chimie qui a été illustré par de nombreux ouvrages à succès. Je veux parler des livres d'expériences, récréations et amusements à base de chimie, dont il est difficile de dire où finit l'enseignement et où commence la vulgarisation. Et cela, en particulier, pour une raison historique : l'enseignement de la chimie au niveau des collèges n'a eu que tardivement un statut officiel.

Dans les *Manipulations chimiques* de Michael Faraday, traduites de l'anglais en 1827, enseignement et vulgarisation se confondent largement. «La chimie est une science essentiellement expérimentale», déclare d'emblée le célèbre physico-chimiste, car les faits étant à la fois la base de ses résultats et la démonstration de ses principes, c'est à eux qu'il est constamment nécessaire d'appeler. Faraday avait «l'intention de faire un livre purement élémentaire et à la portée des personnes les plus étrangères aux manipulations chimiques... avant tout, de se faire connaître dans des développements minutieux et s'exposant à des redites fréquentes». L'édition française les fit sauter puisque, selon le préfacier, dans notre pays, le livre s'adressait à des étudiants dont «en général l'intelligence est déjà exercée par l'étude des sciences». Les deux livres modernes dont je parlerai plus loin font le même pari.

Les *Nouvelles manipulations chimiques simplifiées* de H. Violette datent de 1830 : «La chimie est une science pleine d'anecdotes ; son importance croît tous les jours par le secours puissant qu'elle apporte à l'industrie. Cependant, on n'étudie peu, parce qu'elle demande un attirail coûteux et embarrassant [...] Aussi se contente-t-on de quelques expériences dans les cours et d'étudier ensuite dans les livres.» Et pourtant «Il est aussi impossible d'apprendre la chimie sans manier ou manipuler les corps, que d'apprendre la minéralogie sans les minéraux, la botanique sans les plantes et l'anatomie



Formation de structures spiralées dans un mélange contenant un acide, une base et un indicateur coloré.

sans le cahavre.» Les soucis et les précautions de l'auteur sont déjà modernes : «Nous avons l'habitude de n'opérer que sur de petites quantités de matière ; nous reconnaissons à ce mode de manipuler plusieurs avantages : les préparations sont plus faciles, n'offrent pas de dangers et présentent une grande économie d'argent et de temps.» Des préoccupations qui nous deviendront familières.

Cependant la seconde partie du siècle dernier a vu paraître des ouvrages qui se veulent moins austères, moins utilitaires, moins sérieux (du moins en apparence), faisant la part plus belle à la distraction et au jeu. Souvent distribués comme «prix» aux meilleurs élèves des lycées et collèges, ils constituent une récompense : l'instruction y devient un plaisir. *La chimie amusante : Expériences à la portée de tous*, de Ferdinand Faïeau, professeur à l'école municipale J.B. Say, est typique à cet égard.

«Ce livre n'est pas un Traité de chimie, avertit l'auteur, il s'adresse aux personnes que des études trop exclusivement littéraires ont, dans leur jeunesse, éloignées de l'enseignement scientifique [...] aux élèves des lycées, des collèges et des écoles municipales qui, après la sortie du cours ou les jours de sortie, repètent volontiers chez eux, au grand désespoir de la maman, les expériences faites par le professeur. [...] Il sera donc nécessaire, non pas d'avoir un laboratoire, sans quoi le but de ce travail serait manqué, mais d'acheter quelques produits en

dehors de ceux que chacun possède, tels que : carbonate de soude, eau de Javel, alcool volatil, glycérine, alcool, teinture d'iode, camphre, etc. qui suffiront, à eux seuls, dans un grand nombre de cas... Tout ce qui peut présenter quelque danger a été écarté avec soin. Pour réussir les expériences d'une exécution délicate, nous indiquons, avec beaucoup de détails, les précautions qu'il est nécessaire de prendre...»

Les *Expériences de chimie amusante* de François Cherrier, parues chez Hachette en 1974, représentent, à ma connaissance, tout au moins en ce qui concerne l'édition française, une des dernières tentatives de vulgarisation héritière de ces *albums exemplaires* du siècle précédent. On nous y parle, images à l'appui, de cristaux géants, de pierres précieuses, de dessins magiques et d'encres secrètes, de petits feux d'artifice, etc. Le tout sans danger, évidemment. Le succès de cet album épuisé de sa réédition de 25 000 exemplaires démontre sans conteste l'attrait et l'efficacité de cette approche.

De la même façon que les chômeurs sont devenus des demandeurs d'emploi et les «hommes» des employées de maison, la chimie amusante s'appelle maintenant chimie exocharmique. Entendez par là «qui dégage du charme», comme une réaction exothermique dégage de la chaleur. Le mot est évidemment d'origine américaine et a été inventé, si je ne m'abuse, par R.W. Ramette, en 1980 (*Journal of Chemical Education*, p. 68, 1980). Comme nous le verrons, la panoplie du chimiste exocharmeur contem-

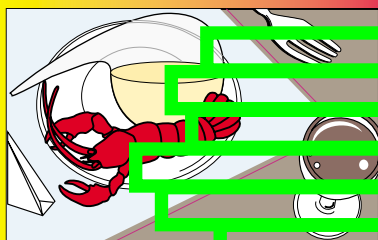
porain est considérablement plus riche que celle dont disposaient ses collègues du siècle dernier.

La deuxième édition du petit livre de Paul Depovere, professeur à l'Université de Louvain, *La chimie exocharmique*, vient de paraître. Cette parution coïncide avec celle des *Chemical Curiosities* de H.W. Roelky et K. Möckel, traduction anglaise de *Chemische Kuriositäten* datées de 1994. Les deux ouvrages procèdent *grasso modo*, du même esprit. Ils sont chacun dans un genre différent, des réussites qui méritent des applaudissements ; mais ils me posent une même question que j'hésite à vous soumettre étant moi-même incapable d'y répondre d'une façon définitive : à quel public s'adressent-ils ?

Parlons d'abord du livre de P. Depovere. On y trouve de tout, qui se rapporte de plus ou moins loin à la chimie qui nous est chère : «quiz, tours de magie et autres anecdotes ou démonstrations chimiques extraordinaires». L'auteur n'recule devant aucun moyen pour exercer sa séduction de talentueux amuseur. Son livre a le charme (on y revient) d'un marché aux puces, où l'on promène sa curiosité aux aguets.

Cependant, dans ce *supharmakum*, tous les articles sont soigneusement étiquetés : une bibliographie de 1 044 articles nous permet de retrouver l'origine du renseignement insolite qui a attiré notre attention. Dès le premier chapitre, en neuf pages, P. Depovere vous parlera d'orbitales, de l'explosion de la première bombe H à l'hydrure de lithium, de la façon de faire entrer

FRANCE INFO

et  
POUR LA SCIENCEvous invitent  
à écouter la chronique  
de Marie-Odile MonchicourtInfo  
SciencesTous les jours  
sur **France Info**  
à 15 heures 41,  
17 heures 10,  
20 heures 12,  
22 heures 12,  
et 23 heures 42Les prochains  
résultats présentés  
dans la rubrique  
Science et Gastronomie  
seront annoncés sur  
**France Info**  
le 23 octobre 1997.

FRANCE

info

un œuf dur dans une bouteille, tout en nous rappelant au passage qu'une rame de papier contient 500 feuilles. Ailleurs, vous apprendrez pourquoi, quand il fait chaud, les poules pondent des œufs à la coquille fragile : conséquence inévitable du principe de Le Chatelier. Plus loin, vous trouverez connaissances, formules à l'appui, avec des molécules organiques qui jouent au bilboquet ou sautent à la corde. C'est à ce stade que se précise la question que je me posais plus haut sur le public qui peut apprécier ce genre d'humour d'initiés : des étudiants de troisième cycle ? Leurs professeurs, s'ils ont le temps de ne pas trop se prendre au sérieux ?

Les *Chemical Curiosities* de H.W. Roesky et K. Möckel me posent le même problème. Le sous-titre de l'ouvrage, *Spectacular Experiments, Inspired Quotations*, en annonce et résume bien le contenu et les intentions, plus ambitieuses que celles de P. Depovere. Chaque court chapitre du livre (il y en a 24), qui relate une expérience curieuse ou surprenante, est précédé d'une (parfois très longue) citation censée enrichir d'une auréole «culturelle» valorisante une «recette» nécessairement toujours très prosaïque – trop peut-être. La relation entre les deux «faces» de l'opération décrite n'est pas toujours évidente et, pour ne retenir qu'un seul exemple (pp. 210 et 214), malgré le renfort de Goethe, de Schiller, d'Alfred et de Léonard de Vinci, l'explication des deux jolies expériences de réactions colorées mettant en jeu la réduction photochimique d'ions ferriques n'en est pas plus... lumineuse. Je pourrais aussi chipoter sur l'opportunité de la citation *ad hoc* de Jean-Marie Lehn à propos d'une expérience de «Self-organization in Solution (?)».

Dois-je avouer que j'ai préféré le livre de P. Depovere, dans sa rusticité rigolarde et son désordre sans prétentions, au remarquable travail de H.W. Roesky et K. Möckel, un peu snob, très BCBG, impeccablement présenté, d'une impression soignée et, de surcroît, préfacé (j'allais l'oublier) par le prix Nobel Roald Hoffmann.

Deux éditions pour le livre de P. Depovere, 9 000 exemplaires vendus pour l'édition allemande de ses «Curiosités chimiques» germano-anglaises : à la réflexion, ma question de savoir pour qui ces livres ont été écrits n'a vraiment aucune importance. De toute façon, il n'est plus question, comme au siècle dernier, de faire des expériences de chimie amusante dans une cuisine, sous l'œil inquiet et admiratif des parents.

Jean JACQUES

## Métrologie

## Scientific Unit Conversion

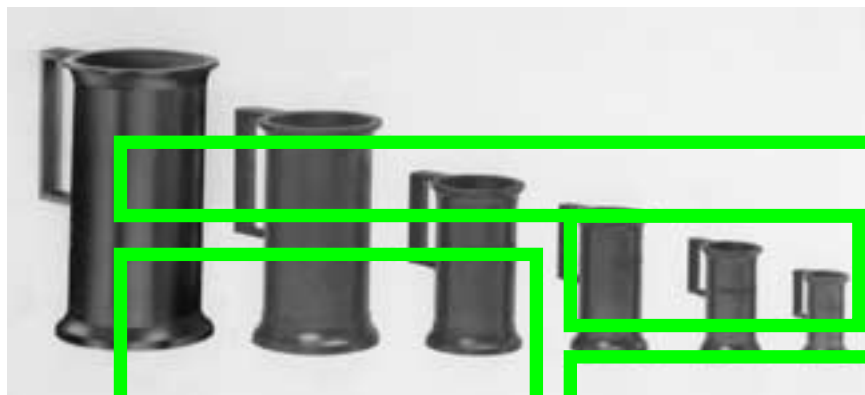
François Cardarelli.

Editions Springer, 1997 (456 pages).

Je lis la recette suivante, à la page 14 du deuxième tome du *Nouvel Art du cuisinier royal et bourgeois*, publié à Paris chez Paul Prud'homme en 1721 : «Pâte blanche pour les gros Fâteaux qui se mangent froids. Mettez un demi-boisseau de fleur de farine de froment sur une table bien nette ; faites une fosse dans le milieu, & mettez-y deux livres de beurre frais & trois onces de sel bien menu, & un demi-setier ou environ d'eau tiède...» Je peux m'efforcer de reconstituer cette recette au jugé, par essais et erreurs, jusqu'à ce que les quantités des divers ingrédients apparaissent à peu près correctes ; ou bien je peux chercher à me donner une traduction de ces mesures d'Ancien Régime, qui, pour la plupart, nous sont devenues opaque. Le guide analysé ici, et qu'on doit à un chercheur du Laboratoire de chimie clinique et d'électrochimie de l'université Paul Sabatier, à Toulouse, est tout à fait précieux pour ce but. Il ne fournit aisément la traduction des instructions précédentes : «Mettez 6,3 litres de fleur de farine de froment sur une table bien nette ; faites une fosse au milieu et mettez-y 980 grammes de beurre frais et 90 grammes de sel fin, et environ un demi-litre d'eau tiède...»

En effet, le boisseau (p. 65), unité de capacité pour les denrées sèches, équivalait à quatre quarts, ou à 16 litrons, c'est-à-dire 12,7 décimètres cubes. La livre (de Paris) correspondait (p. 67) à 489,51 de nos grammes. Il y avait 16 onces par livre, soit 30,6 grammes l'once. Le demi-setier, qui était une mesure de volume des liquides, était (p. 66) lui-même une demi-pinte, c'est-à-dire 0,466 litres.

Le *Cardarelli*, au format proche de celui du *Guide Michelin*, s'ouvre par la présentation du Système international d'unités ou système SI. Il rappelle ensuite d'autres systèmes, tels le système cgs (centimètre, gramme, seconde) ou les unités anglaises. L'essentiel du livre, plus de la moitié, est un dictionnaire alphabétique regroupant plus de 10 000 unités de mesure, de tous les pays, regroupées ensuite en 25 tables d'interconversion des unités de différents types : masse, longueur, aire, volume, etc. Viennent enfin un tableau des constantes fondamentales et divers appendices.



Les sciences et les techniques françaises progressèrent, et, à la Révolution, quand s'imposa le système métrique, avec notamment le mètre-étalon (celui du haut se trouve rue de Valenciennes, à Paris) et des unités dérivées, comme celles du volume (le litre).

On peut analyser aussi cette mine d'informations en biais, pour lui faire exprimer d'autres renseignements précieux ou seulement curieux. Par exemple, les unités françaises d'Ancien Régime sont pour beaucoup à base 16 (une velte = 16 chopines, un pot = 16 possons, une chopine = 16 requilles), de même que notre manière de compter aujourd'hui encore (quatorze, quinze, seize, dix-sept, dix-huit...). Si l'on se tourne vers le système britannique de longueurs, on y retrouve d'ailleurs la base 12 (un yard = 12 paumes, un pied = 12 pouces, un pouce = 12 lignes), qui caractérise aussi la manière de compter outre-Manche (eleven, twelve, thirteen, fourteen...).

Cet ouvrage de référence se voulant évolutif, je suggère qu'une prochaine édition inclue les monnaies, ce qui aidera tant les lecteurs de livres d'histoire que ceux du *Dictionnaire* : à combien de nos francs d'aujourd'hui peut-on évaluer les 200 florins d'or que Gulliver emporta à Guasparruol dans la première nouvelle de la huitième journée du chef-d'œuvre de Boccaccio ?

Ce n'est certes pas un livre de chevet, mais il sera utile, du chef cuisinier à l'interprète, du bibliothécaire au chercheur scientifique, du touriste au patron d'entreprise, de l'enseignant du primaire à celui du supérieur.

Pierre Laszlo

## Agronomie

### La révolution alimentaire

Philippe Vasseur. Éditions Hachette (collection Librement), 1997

**L**a façon de se nourrir, un sujet toujours à l'ordre du jour : hier la pénurie nous concernait, et elle concerne encore une grande partie de l'humanité. Aujourd'hui nous sommes préoccupés par la dégradation de la qualité, par la sécurité sanitaire et, toujours, par le prix des denrées. Les changements ont été si importants, depuis la fin de la dernière Guerre mondiale, que Philippe Vasseur parle de révolution. Et cette révolution est accompagnée, précédée même, par une révolution dans la production des denrées alimentaires.

L'ouvrage de Ph. Vasseur est clair et facile à lire. Il recommande le talent de l'ancien journaliste qu'il fut. Il est documenté, même si, sur le plan scientifique, on en reste à une vulgarisation assez superficielle. C'est aussi l'œuvre d'un homme politique, qui montre complaisamment l'efficacité des services de l'État en France et ne se prive pas de critiquer plus ou moins sévèrement la politique de certains pays étrangers.

## ARCH!MEDE

Le magazine scientifique d'ARTE



### AU MOIS D'OCTOBRE :

Mardi 7 octobre à 20 h :

Les oscillations chimiques.  
Les accélérations de particules.  
Qu'est-ce que la science ?  
Benoît Mandelbrot : mon métier.  
Marcher sur l'eau.

Mardi 14 octobre à 20 h :

Au cœur du lait.  
Cuisine préhistorique.  
La physique du cœur.  
L.M. Houdobine :  
les manipulations génétiques.  
L'altruisme.

Mardi 21 octobre à 20 h :

Alu cœur de l'aluminium.  
L'«intelligence» des perroquets.  
La vie extraterrestre.  
Georges Tuzet : la culture  
des forêts.  
La chiralité.

Mardi 28 octobre à 20 h :

Élochimie de l'ivresse.  
Drogues et dépendance.

36 15 ARTE (1,29 F/mn)  
<http://www.arte-tv.com>

arte

# POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06  
Tél : 01-46-34-21-42  
<http://www.pourlascience.com>

**POUR LA SCIENCE** Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de rédaction : Annie Tanguy. Responsable de la diffusion : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : M. Berger, M. Bonamy, Bettina Debu, Paul Decaix, Christian Glattli, Philippe Grandcolas, Evelyne Host-Platret, My Hanh Launois-Luong, Anne Masé, Claude Olivier, Marc Parmentier, Guy Paulus, Agnès Rötig.

**SCIENTIFIC AMERICAN** Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Lautwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemcek, 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.

## PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06  
Tél. : 01 46 34 09 12.  
Télex : LIBELN 202978F.  
Télécopieur : 01 43 25 18 29.



**Étranger** : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

## 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** : G.M.

1027 Lonay

**Autres pays** : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 05.

**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 adressés 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, de réimpression 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.

Au programme, un tableau sombre : surproduction et effondrement des cours, dépeuplement rural en France et désertification en Afrique, faim dans le monde, acheteurs peu préoccupés de la qualité des produits. Après une description de la révolution alimentaire, et plus exactement des révolutions passées et futures dans la production agro-alimentaire et dans la façon de se nourrir, l'épilogue est résolument optimiste : la recherche de la qualité a permis de régler les problèmes de la surproduction, la campagne sensibilise le consommateur conscient et organisé à acheter les meilleurs produits au meilleur prix.

Une première révolution agricole, durant le dernier demi-siècle, nous a fait passer de la pénurie à l'excédent. Miracles de la productivité agricole, qui ont multiplié les productions animales et végétales par trois ou quatre. Cet excès a provoqué une extraordinaire baisse des prix, en même temps que les progrès des transports mettaient les produits de partout à la disposition du consommateur, en toute saison.

Simultanément, l'art de se nourrir a été bouleversé : on consomme moins de pain, de viande, de vin, on passe moins de temps à table, les menus doivent être préparés rapidement, on se tourne vers des plats tout préparés. Cette dernière tendance provoque une nouvelle révolution de l'agriculture, mais aussi, et surtout, de la transformation des produits agricoles.

Toutefois ces bouleversements ont des inconvénients. D'abord, la faim persiste dans de nombreux pays en développement ; ensuite les populations en viennent à reconnaître et à craindre les dangers, réels ou supposés, que peuvent présenter les produits nouveaux ou les produits provenant d'une culture extraordinairement intensive.

Certes le nombre des affamés n'augmente pas, c'est-à-dire que la famine régresse en pourcentage. Cependant elle demeure, et cela que l'évolution démographique provoquera inéluctablement un accroissement des besoins en produits alimentaires. Et les experts s'opposent : certains pensent que l'on pourra les couvrir, les autres doutent que l'on trouve les moyens pratiques d'y parvenir ; le problème, s'il est soluble sur le plan quantitatif, ne l'est pas forcément sur le plan économique.

La biomédecine nous informe que la conscience des risques de la productivité. La crise de l'encéphalite spongieuse bovine, la maladie dite de la vache folle, a été un facteur déclenchant, même si seulement le dixième de la population s'est réellement inquiété, même si l'in-

quiétude, trop médiatisée, est apparue alors que le danger diminuait. On a soudain compris qu'il n'était pas sans risque de disposer de tout, venant de partout et à bas prix.

Cette inquiétude s'est nourrie de nouveaux acquis techno-scientifiques qu'il était facile de présenter comme le résultat d'un emballement non contrôlé de l'évolution des sciences agronomiques. Ainsi on a franchi un échelon dans le recours au génie génétique et «l'ubriquant» des plantes transgéniques, colza, maïs, soja résistant aux herbicides, riz, manioc ou pommes de terre indemnes des attaques d'insectes. On parle même d'aliments à vertus thérapeutiques : ce n'est pas nouveau, mais quand on envisage la banane apportant le vaccin contre une hépatite, ou une margarine qui soignerait les troubles du rythme cardiaque, on voit bien que ces «nutraceutiques», ou autres «calicaments», représentent un nouveau saut dans l'inconnu, dangereux pour certains.

De nouveaux produits s'élaborent dans les industries agro-alimentaires, on met au point de nouveaux procédés de conservation, par irradiation, par haute pression, de nouveaux emballages, comestibles ou assimilables ou supportant le passage au four à micro-ondes. Le consommateur s'inquiète, il exige des explications, il devient vigilant, il se préoccupe de qualité. Ce faisant, il encourage la production agricole qui doit, certes, continuer à produire beaucoup, mais qui doit aussi fournir des produits de bonne qualité à une clientèle dont le goût s'internationalise tout en restant, au moins en France, attachée aux traditions.

Le consommateur est également devenu attentif à la protection de l'environnement : il demande une agriculture non polluante, des agriculteurs responsables du paysage, une agriculture variée. La production alimentaire, commencée, c'est la qualité, la qualité et le souci du risque, risque à la production et à la transformation des produits alimentaires.

Il vaudrait peut-être mieux parler d'une évolution accélérée que d'une révolution. C'est à cette évolution, à ses conditions, à ses dangers que le livre de l'éditeur nous fait réfléchir.

Georges TOUZET

**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>