

■ POUR LA

SCIENCE

Septembre 1996

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

LES DISQUES COMPACTS

LASERS BLEUS

LES MODÈLES
EN BIOLOGIE

LA BIÈRE LAMBIC

EXTINCTIONS
EN MASSE

INFORMATIQUE
ET DROIT D'AUTEUR

LA LOCOMOTION
DES INSECTES

LA NATURE

DE L'ESPACE-TEMPS

Canada : \$ 8,75

Bloc-notes de Didier Monod 5

Tribune des lecteurs 6

Les inattendus du transistor 8

par Pierre Aigrain



Présence de l'histoire 12

Les produits historiques

par Jean Jacques

Science et gastronomie 16

La longueur en bouche

Jeu-concours : L'art de transvaser 20

Perspectives scientifiques :

Résistance au VIH 22

Les dialectes des pinsons 23

Collision maritime 24

Création de liens 25

Trafic cellulaire 26

Les derniers hiéroglyphes 27

Expérience de cosmologie 28

La contraception dans le monde 29

Voir plus petit 30

L'invasion des moules zébrées 31

Les mesures pour l'emploi 32

Récepteur bronchique 33

Sentez-vous bien! 33

La vie sur Mars? 34

Savoir technique 35

Le velcro, par Martin Jacob

L'image du mois 94

Caïmans et piranhas



L'expérience du mois 96

Π en musique

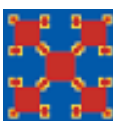
par Jean-Philippe Fontanille



Logique et calcul 100

Le monde agité de la coopération

par Jean-Paul Delahaye et Philippe Mathieu



Visions mathématiques 106

Vu? Pas vu? Réfléchissez!

par Ian Stewart



Analyses de livres 110

– *Histoire de l'agronomie en France*, par J. Boulaine

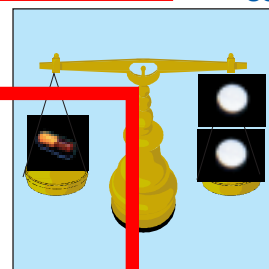
– *L'homme, l'écriture et la mort*, par J. Goody

– *12 clés pour le médicament*, par P. Potier

Les modèles en biologie et en médecine 38

par Daniel Schwartz

La biologie et la médecine désignent par le nom de modèles des démarches tout fait différentes : abstraites (mathématiques) ou concrètes (biologiques).



La nature de l'espace et du temps 46

par Stephen Hawking

et Roger Penrose

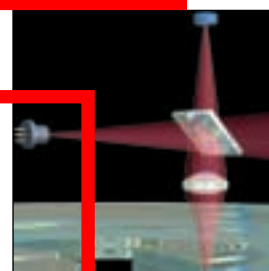
Ces deux éminents spécialistes de la relativité exposent leurs conceptions de l'Univers, son évolution et l'impact de la théorie quantique.



La prochaine génération de disques compacts 54

par Alan Bell

Un nouveau format de disque compact, nommé DVD, est né d'un accord entre les fabricants de produits électroniques. Les premiers lecteurs et les disques à ce format apparaîtront début 1997.



Les lasers bleus 60

par Robert Gunshor

et Arto Nurmikko

De nouveaux semi-conducteurs permettent de fabriquer des lasers miniatures qui émettent de la lumière bleue. Ces lasers bleus liront des disques compacts contenant bien plus d'informations qu'aujourd'hui.



Les secrets des bières lambic

66

par Jacques de Keersmaecker

Une ancienne technique de brassage produit une boisson si complexe que les scientifiques l'explorent encore.

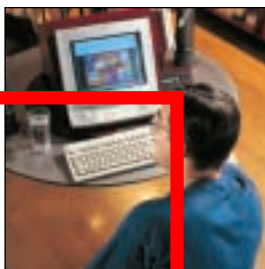


Les droits d'auteurs des œuvres numériques

74

par Ann Okerson

Les réseaux d'ordinateurs défient la législation sur les droits d'auteur, mais certains remèdes proposés pourraient être pires que le mal.



La plus importante des extinctions en masse

80

par Douglas Erwin

La Terre a été dévastée il y a 250 millions d'années : une extinction massive d'espèces a notablement modifié le développement de la vie.



Les capteurs du mouvement

88

par Sasha Zill
et Ernst-August Seyfart

Grâce à ces capteurs qui mesurent les contraintes, les blattes, les crabes et les araignées coordonnent leurs mouvements. Leurs modes de locomotion inspirent les constructeurs de robots.



Éléments de modélisation

La plupart des molécules agissent sans que l'on connaisse leur mode d'action. Les effets du lithium sur les dépressions ont été découverts par hasard, et le mécanisme d'action du lithium est inconnu. L'absence de modèle pénalise la recherche et empêche les essais *in vitro*. Les bons modèles facilitent les études.

Les modèles, mathématiques ou biologiques, sont des aides à la décision. Après les tests *in vitro*, les biologistes utilisent des modèles animaux pour étudier l'efficacité des principes actifs, mais la portée de ces essais est limitée : d'une part, la maladie humaine n'est pas identique à celle de l'animal, d'autre part, les effets secondaires ne sont pas toujours analysables sur le modèle. Aussi procède-t-on à des tests sur l'homme avec toutes les difficultés éthiques associées : d'abord ne pas nuire (*primum non nocere*), préconisaient les Anciens. Ainsi, dans le test sur l'efficacité de l'aspirine, les sujets qui auraient pu pâtir de la prise d'un produit augmentant les risques d'hémorragie ont été éliminés. Dans cette optique se pose la question de l'échantillonnage : en éliminant, comme dans le cas de l'aspirine, les patients sur lesquels le principe actif peut avoir un effet nocif, on démontre l'efficacité de la molécule, mais pas ses éventuelles conséquences maléfiques.

Faut-il, selon ce principe, attendre d'avoir toutes les certitudes pour administrer un médicament ? L'urgence est pressante. Aussi préconise-t-on une première série d'essais «biologiques», testant l'efficacité comparée d'une molécule ou d'un traitement par rapport à un autre, puis des essais «pragmatiques» testant la posologie, le coût, et l'acceptabilité par l'organisme (voir *Les modèles en biologie et en médecine*, par Daniel Schwartz, page 38).

Un échantillonnage reflétant au mieux la diversité de la population est de taille plus importante : des artefacts s'introduisent, le traitement des données est plus long et leur interprétation plus difficile.

Les modèles atteints du SIDA ou du cancer ne supportent pas cette loi. Sur quelles bases scientifiques accélérer l'utilisation d'un médicament ? Par des tests pragmatiques effectués plus tôt, des tests qui visent à rationaliser la conduite médicale, la posologie et l'ordre d'administration des médicaments en fonction des individus. Il ne s'agit plus de comparer des médicaments, mais d'optimiser leurs effets.

Philippe BOULANGER

Dénomination experte ?

Comment bénéficier de l'aura souvent attachée à l'état de spécialiste («spécialiste unanimement reconnu») sans pâtir des connotations négatives, non moins souvent attachées à ce même état («spécialiste étroit») ?

Très simplement. Ne vous présentez pas comme spécialiste. Dites plutôt que vous possédez un domaine d'expertise, ou un champ de compétence. Ces deux expressions désignent rigoureusement la même chose que le mot spécialisation, mais elles n'ont de connotations négatives. Mais voilà, mondialement reconnu dans votre domaine sans risquer de passer pour un spécialiste corné.

Les Zorgs de la barbarie

Le zèbre, comme on sait, est ainsi dénommé à cause de ses zébrures. Riemann, lui, était ainsi nommé à cause de ses surfaces ! C'est du moins ce qu'on peut comprendre en lisant : «Qu'un Riemann ait été capable de faire un travail ori-

ginal sur des surfaces Riemann à n superpositions n'avait vraiment rien d'accidentel.» (Don DeLillo, *L'Étoile de Ratner*, éditions Actes Sud, 1996, p. 172.)

Cette phrase maladroite est extraite d'un roman américain à prétentions scientifiques. Ces dernières ont visiblement affaibli la traductrice, au point qu'elle n'a même pas eu l'idée de demander à un scientifique de la relire. Il est vrai que, si elle avait eu ce scrupule, sa traduction aurait perdu en drôlerie. En effet, Dedekind prend un petit air inattendu, mais tout à fait rafraîchissant, de se faire sauter du ciel, quand la traduction mentionne qu'il a «formulé la coupe Dedekind» (p. 172) ! Même Pascal, qu'on peut pourtant supposer connu de la traductrice, prend un joli nouveau tour, mais de ceux qui l'ont conduit à inventer «le» cycloïde. Faute d'impression isolée ? Non. Tout au long du livre, Pascal cycle sur «son» cycloïde. L'influence du cyclone, probablement. N'accablons pas la traductrice. L'auteur doit avoir sa part de responsabilité lorsqu'elle est amenée à écrire : «Doublié, un nombre négatif n'a plus que la moitié de sa valeur originale» (p. 418). Quant

aux héros du roman, ils sont spécialistes d'une classe de nombres nommée les zorgs. Cette dénomination bizarre, accompagnée d'attendus comme, combien n'ont-ils d'autre raison que de préparer un fin jeu de mots, qui n'arrive qu'à la page 580 et dernière : l'orgasme. Ça a été long à venir.

Triste coïncidence

Je n'aimais qu'un seul être et je l'ai perdu deux fois ! » se lamente Roxane à la fin de *Cyrano de Bergerac*. Cette mésaventure peu banale vient de m'arriver. À peine m'étais-je fait à la triste nouvelle de la mort de Thomas Kuhn, annoncée dans *Le Monde* du 21 juin 1996, qu'il m'a fallu me faire à la désolante annonce de la mort de Thomas Kuhn, publiée dans *Le Monde* du 22 juin 1996. Une coïncidence – dont seul un statisticien saurait évaluer la probabilité a priori – a voulu que meurent quasi simultanément un chanteur rock français et un philosophe des sciences américain répondant tous deux au nom de Kuhn et au prénom de Thomas. Soyons franc. De ces deux êtres, l'un (le ne dirais pas lequel) m'était parfaitement inconnu : j'ai appris son existence au moment précis où j'apprenais qu'elle cessait. Et l'autre... aurait été parfaitement connu de moi et j'aurais même étudié mes classiques.

Rares, j'imagine, sont ceux qui auront été affectés à la fois par la mort du philosophe et par celle du chanteur. La culture populaire et l'culture savante s'ignorent plus radicalement encore que la culture littéraire et la culture scientifique. Thomas Kuhn n'a rien à faire de Thomas Kuhn. Et réciproquement...

Méditer pendant la sieste

De Bertolt Brecht, la phrase suivante m'est venue, je trouve, soit d'être longuement commentée, soit d'inspirer une profonde et silencieuse méditation (je choisis ici la seconde solution) : «On n'aurait aucune peine et on aurait grand avantage à représenter la science comme un effort pour découvrir et démontrer le caractère non scientifique des affirmations et des méthodes scientifiques.» (B. Brecht, *Me Ti Livre des retournements*, L'Arche, 1978, p. 75.)

Les différents modes de prétention

Chaque spécialité suscite ses habitudes propres. En particulier, sa forme propre de prétention. À la façon dont un individu se vante, on peut deviner sa spécialité.

Exemple 1. Forme «Tête à claque» de la prétention. Un musée d'art contemporain – bien connu des habitants de la ville où il se trouve pour sa pratique du n'importe quoi, pourvu qu'il soit haut de gamme – a pour slogan : «Notre logo c'est l'Univers.»

Forme «Moi je sais tout». Là, les économistes sont imbattables. Voici ce qu'écrit l'un d'eux dans une critique de livre : «Devant l'incertitude inévitable de l'avenir, l'auteur recommande la prudence dans l'action. Mais l'auteur du livre ajoute : "à condition que la politique de prudence n'ait pas d'effet pervers", ouvrant ainsi sous nos pas un abîme de perplexité. Là encore, sans se vanter, l'économiste aurait beaucoup à dire, car cette question, certes épineuse, est pour lui tout à fait classique.» (Ph. Simonnot, *Le Monde*, 12 juin 1996.) Quand on songe que l'effet pervers n'est guère autre chose que ce qu'on appelait autrefois les voies de la Providence, ou encore le Destin, on ne peut qu'admirer l'économiste à être débarrassé d'un des plus anciens drames de l'homme : il ne sait jamais très bien quelles conséquences vont avoir les actes qu'il commet.

Tendance «Faux désinvolte». Encore une critique de livre, rayon sciences humaines cette fois. «Regretons que ce petit livre laisse à peu près de côté la question de la psychanalyse.» Qu'y a-t-il de prétentieux là-dedans ? Oh rien, rien... Si ce n'est que le «petit» livre en question fait... 480 pages, pas une de moins (*Le Monde des poches*, 8 juin 1996).

Tendance «Ça décoiffe». Une publicité pour la collection Harlequin s'achève sur cette proclamation : «Vous ne pouvez rien contre le talent de nos auteurs.»

Je termine en présentant mes excuses aux disciplines absentes de la liste ci-dessus. Qu'elles ne se sentent pas vexées ou minimisées ! En aucun cas, je ne prétends leur faire l'injure d'insinuer qu'elles ignorent la prétention. Simplement, ma collection des types de prétention est encore incomplète.

Marine à voiles

Dans l'article de Jacqueline Hersart de la Villemarqué (voir *La pêche à Terre-Neuve*, *Pour la Science*, août 1996), le voilier de la figure 5 n'est pas une caravelle mais une caraque. La caravelle est un bateau à voiles latines, fin, sans château de proue, pour permettre la manœuvre du car (bas de la vergue latine) d'une quinzaine de mètres et de 40 à 50 tonneaux.

Vers la fin du xv^e siècle, on passa à 25 mètres de long, et on vit apparaître, au Portugal, des caravelles d'accompagnement, bateaux mixtes et rapides portant deux ou trois voiles latines, plus une voile carrée en misaine. Solution rapidement abandonnée au profit du galion.

La *Santa Maria*, navire sans doute le plus connu du Moyen Âge, n'était pas une caravelle, mais un hybride de nave et de caraque. La *Pinta* et la *Niña* étaient des caravelles.

La caraque est le premier vaisseau à trois mâts, avec voiles carrées en misaine et grand mât, et voiles latines en arrières. À la suite apparurent la civadière, que l'on voit nettement sur l'illustration A, et le contre-mât d'artimon, ce qui en faisait un quatre-mâts avec deux voiles latines à l'arrière. La largeur des carques était d'environ le tiers de leur longueur, ce qui en faisait des bateaux stables, mais ne remontant pas bien au vent. C'est l'obligation de piquer d'abord sur le vent qui a conduit à la caraque de Bonne Espérance.

François DUVAL, Paris

Primates et sucres

À propos de l'article de Jacqueline Hersart de la Villemarqué (voir *Pour la Science*, janvier 1996), je me permets de vous signaler l'existence d'une plante brésilienne, le *Salvia rebaudiana*, dont les feuilles contiennent une série de glycosides transformés en le stéviolside, qui possède un pouvoir sucrant 300 fois plus élevé que celui du saccharose. On pourra ainsi expliquer la préférence des primates de l'Ancien Monde aux molécules sucrées d'Amérique.

M. VANHAELLEN, Bruxelles

Réponse de Claude Marcel Hladik

La présence de substances sucrantes dans certaines parties d'une plante résulte de mutations aléatoires. Au second temps, la coévolution des plantes

et des primates favorise, parmi les premières espèces dont les fruits semblent sucrés (donc attractifs) aux seconds. La consommation des fruits permet en effet la dissémination des graines qu'ils contiennent, ce qui participe à la pérennité de l'espèce végétale. La présence de molécules sucrantes dans les feuilles n'a pas les mêmes conséquences écologiques : elle résulte vraisemblablement du hasard des mutations. Elle pourrait être néfaste à l'espèce végétale, mais elle n'est pas perçue par l'animal, comme nous, avec un goût voisin de celui des sucres.

Au quatrième top...

Une peur irrationnelle de l'an 2000 n'est pas de mise. Les secondes qui s'égrenent nous rapprochent toutefois d'une catastrophe, qui, si des mesures drastiques ne sont pas prises, risque d'engendrer un chaos économique et social sans précédent. La mémorisation des années dans les ordinateurs en sera la cause.

Il y a plusieurs décennies, l'octet valait son pesant d'or : l'espace mémoire était utilisé avec harmonie. C'est ainsi que pratiquement tous les programmeurs de gestion représentaient les années sur deux chiffres. À quoi bon mémoriser 1968, alors qu'il n'y avait pas d'ambiguïté à utiliser 68 ? En 2000, c'était bien loin... Les programmes de cette époque n'étaient pas présumptueux au point d'imaginer que, plus de 30 ans plus tard, leurs programmes ou leurs structures de données seraient toujours utilisés. Mais voilà, les programmes ont la vie dure et, aujourd'hui encore, une grande majorité de logiciels, de bases de données et de masques de saisie d'écran n'utilisent que les deux derniers chiffres des années. En franchissant le 31 décembre 1999, de nombreux ordinateurs passeront de 99 à 00.

Dans les ordinateurs, les dates sont importantes pour déclencher une certaine action à tel instant ou encore pour calculer les annuités entre deux jours de découverture en compte bancaire. De nombreux programmes seront donc faussés. Pour ceux qui méconnaissent l'ampleur du problème, la solution est simple : il suffit d'étendre à quatre chiffres les zones destinées à contenir des années. Malheureusement, selon les dernières évaluations américaines, il y aurait au moins 210 milliards de lignes de *Cobol* à examiner, puis à corriger, ce qui représenterait une dépense de 400 milliards de dollars. Plus grave encore, pour certaines grandes entreprises qui ne se sont pas encore attaquées au problème, il serait déjà trop tard ! La solution dispo-

portionnée et la demande ne correspondent qu'à une simple opération de maintenance et sont donc, pour certains, à l'origine d'un véritable bilisme actuel.

Jean-François COLONNA, Palaiseau

Informatique fiable

« La France n'a jamais connu de problèmes de ce genre grâce à une mise en place progressive du réseau et à des tests draconiens. ». Cette phrase, qui figure dans l'article de Kenneth Birman et Rossana Renesse (*Programmes pour réseaux fiables*, *Pour la Science*, janvier 1996) après la description de quelques pannes informatiques spectaculaires était destinée à préciser la situation française. Elle est trompeuse : elle ne concerne en effet que le réseau téléphonique. Elle devrait en outre mentionner que celui-ci est, en France, complètement informatisé depuis moins longtemps qu'aux États-Unis, ce qui a laissé moins de temps pour qu'une panne survienne.

Aucun programme de tests, aussi draconien soit-il, ne peut conduire à l'élimination totale des erreurs, comme l'a remarqué K. Birman. Les pannes dans les programmes sont inévitables. Seule une mise au point qui anticipe les pannes et incorpore des mesures correctrices peut protéger un système réparti contre de tels événements. En outre, ces systèmes conservent des risques de dysfonctionnement si la menace des pannes corrélées ne peut être contrée de manière efficace.

Le récent échec du premier vol de la fusée Ariane 5 est ainsi la conséquence d'une erreur dans un programme. Un nombre avant d'être validé s'exprimait à ce qui était autorisé pour le programme. Il en est résulté une erreur d'opérande, contre laquelle les instructions de conversion de données n'étaient pas protégées : le calculateur de vol est tombé en panne. Cette erreur s'est transmise au calculateur de secours qui est aussi tombé en panne. La redondance des systèmes ne suffit pas : il faut prévoir ce type de panne par des programmes adaptés.

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : 101641.3525@compuserve.com. Indiquez *Tribune des lecteurs* dans la rubrique objet.

Les inattendus du transistor

PIERRE AIGRAIN

Résultat espéré d'une coopération fructueuse entre trois physiciens émérites, le transistor a créé une industrie dont nul n'avait prévu l'ampleur.

Avec la lampe électrique, le transistor est l'invention qui a le plus fort impact sur notre vie. Où que nous soyons dans un pays industrialisé, un transistor est à portée de vue, radio, monte-voiture, téléviseur : sur l'empire du transistor, le Soleil ne se couche jamais. Le chiffre d'affaires de l'industrie des semi-conducteurs est de 150 milliards de dollars, le PNB du Danemark. Il se fabrique 10 milliards de puces par an et deux millions de transistors par seconde. Le succès du transistor permet l'introduction de fonctions nouvelles dans les ordinateurs : fonctions qui expriment toutes les données qui « parlent » au cerveau.

La découverte du transistor a suivi un cheminement tortueux, mais pas tout à fait inattendu car, comme pour la lampe électrique, le but était défini : elle est le fruit des travaux d'une équipe composée essentiellement de Shockley, Bardeen et Brattain. Ces chercheurs désiraient fabriquer des amplificateurs avec des semi-conducteurs. Ils réussirent, mais ce qu'ils découvrirent initialement n'était pas ce qu'ils cherchaient. Là réside l'inattendu.

LES SEMI-CONDUCTEURS D'UTILES INCOMPRIS

Le mot semi-conducteur apparaît dans la littérature scientifique vers la fin du XIX^e siècle : il désigne certains corps aux propriétés intermédiaires entre les métaux et les isolants. La mystérieuse conductivité électrique de ces solides est extraordinairement variable en fonction de paramètres mal contrôlables.

On s'aperçoit parallèlement que la conductivité de certains semi-conducteurs augmente lorsqu'on les illumine. Tel est le cas, par exemple, du sélénium utilisé dans la confection des cellules photovoltaïques. On observe également que quand on établit un contact entre certains de ces semi-conducteurs et un métal,

un tel dispositif « redresse le courant ». En effet, quand le métal est porté à une tension positive par rapport au semi-conducteur sous-jacent, le courant passe très facilement, quand la polarité est inversée, le courant ne passe plus.

L'industrie est opportuniste : elle n'attend pas de comprendre les finesses du fonctionnement des semi-conducteurs pour fabriquer des redresseurs au sélénium. Leur fabrication est empirique et relève de tours de mains difficilement reproductibles. Il n'empêche : pendant de longues années, ces dispositifs servent à redresser le courant alternatif que fournit l'ÉD sur les prises de courant pour fabriquer le courant continu nécessaire au fonctionnement des tubes à vide.

Les électroniciens s'aperçoivent aussi qu'en utilisant une pointe métallique sur de nombreux corps semi-conducteurs, le courant alternatif est redressé, même à des fréquences très élevées. Ces dispositifs, constitués d'un morceau de galène (sulfure de plomb) sur lequel est appuyée une pointe, constituent les rectificateurs des postes à galène.

Hélas pour le bon fonctionnement de tels détecteurs, la pointe est efficace à certains endroits et pas à d'autres, et l'on ignore pourquoi. On déplace la pointe un peu au hasard jusqu'à ce qu'on trouve un « point chaud », correspondant à une bonne écoute. À la moindre secousse, la pointe se déplace, bien entendu toujours dans le mauvais sens.

Vers 1939-1940 apparaissent les radars. Il faut soit détecter soit mélanger avec un oscillateur local, des signaux de fréquences très élevées : les tubes à vide ne suivent pas ces fréquences et les détecteurs à pointes sont alors indispensables. Pour une meilleure stabilité mécanique, on remplace le sulfure de plomb mou par un matériau dur, le silicium : ainsi naît l'industrie du silicium.

Deux petites découvertes précèdent celle du transistor : un chercheur améri-

cain de l'Université de Purdue, Saul Benzer, aperçoit qu'on peut fabriquer des redresseurs en utilisant non pas du silicium, assez difficile à manipuler (point de fusion très élevé, grande réactivité chimique rendant les purifications difficiles), mais du germanium. De plus, S. Benzer stabilise la position de la pointe en procédant à une opération dite de formage qui consiste à appliquer des chocs électriques pour souder la pointe.

Après cette brillante thèse, S. Benzer estime qu'il n'y a plus grand-chose à trouver dans les semi-conducteurs et se convertit à la biologie ; il est l'un des fondateurs de la biologie moléculaire.

LE MODÈLE DE WILSON

Le fonctionnement des semi-conducteurs reste mystérieux. En 1934, un Britannique, Wilson propose le premier modèle expliquant les propriétés électriques des semi-conducteurs. Un semi-conducteur est un solide cristallin, et les atomes sont fixés aux nœuds de la maille cristalline ; la conduction est le fait des électrons plus légers, plus mobiles. Toutefois, pour conduire le courant, ceux-ci doivent se déplacer sous l'action d'une différence de potentiel. Le modèle de Wilson décrit dans quelles conditions ils se déplacent, dans quelles conditions ils ne se déplacent pas.

La mécanique quantique stipule que les électrons des atomes occupent des niveaux d'énergie croissante et qu'il ne peut pas y avoir plus de deux électrons sur le même niveau d'énergie. Quand tous les états d'énergie disponibles sont remplis par les électrons, ceux-ci ne peuvent se déplacer, le corps ne conduit pas l'électricité : c'est un isolant. Dans certains semi-conducteurs, il existe une autre série de niveaux vides, séparés de la première série de niveaux pleins par une bande d'énergie interdite. Les électrons, sous l'effet de la température par exemple, peuvent sauter sur les niveaux vides et conduire le courant.

Le modèle de Wilson énonce simplement : « Il y a une bande, dite de valence, où les niveaux d'énergie sont pleins, il y a une bande, dite de conduction, où les niveaux d'énergie sont vides. Entre les deux, il y a une bande interdite ». On s'en remet à l'expérience pour déterminer les paramètres de ces bandes. Le modèle de Wilson est toujours valable. Bien sûr, on sait aujourd'hui déterminer les paramètres du solide qui fixent les énergies des bandes et l'on explique, grâce au modèle, les variations de la conductivité avec la température.

L'interprétation grossière de la conductivité constitue l'état de l'art dans les années 1940. Le transistor n'existe toujours pas, mais une idée pointe : il semble

possible d'insérer à volonté des électrons dans un semi-conducteur pour en moduler la conductivité. Pour ce faire, les physiciens pensent à appliquer un champ électrique perpendiculairement à la surface d'une couche mince de ce semi-conducteur. Dans un condensateur, les deux plaques sont à des potentiels électriques différents et se chargent par influence. Sur les deux faces du condensateur constitué par une plaque de semi-conducteur, des charges de signes opposés apparaîtront et, pensent nos trois physiciens, la conductivité de la zone où les charges électriques négatives se sont accumulées sera conductrice. On aurait ainsi le moyen de moduler la conductivité par un champ électrique appliqué, et cela constituerait un amplificateur. Shockley, Brattain et Bardeen travaillaient à la société Bell System sur ce projet, d'abord sans succès.

LA GLOIRE QUE FUT LA BELL SYSTEM

La Bell System était une société privée qui avait un monopole de l'État américain sur les systèmes de télécommunication. En échange de ce monopole, la Bell devait d'abord fournir un service de bonne qualité : elle s'acquittait de cette tâche. Les profits de la Société ne devaient pas dépasser un certain seuil, six pour cent des investissements. Cette règle était une prodigieuse incitation à investir dans la recherche. En un sens, la recherche ne leur coûtait rien et, par conséquent, ils en faisaient beaucoup.

Shockley tente de fabriquer ce que l'on appelle aujourd'hui des transistors à effet de champ avec une couche de germanium selon le principe du condensateur détaillé précédemment.

Cela ne marche pas. On appliquait une tension sur la plaque mince, mais elle ne modifiait pas la conductivité de la couche située en dessous. Bardeen, le théoricien du groupe, et Brattain, le physico-chimiste, suggèrent alors que la cause du non-

fonctionnement résulte des propriétés de l'interface. Cette interface n'est pas décrite par le modèle de Wilson. Des impuretés et des irrégularités de surface, pense avec raison Bardeen, piègent des électrons et expliquent l'inefficacité du dispositif.

Pour étudier le piégeage des électrons, ils décident de faire une expérience très simple qui consiste à mettre sur leur morceau de germanium deux pointes très près l'une de l'autre et, en appliquant une tension à l'une des pointes, à vérifier quelle est la variation du potentiel sur l'autre pointe.

TOUJOURS L'INATTENDU ARRIVE

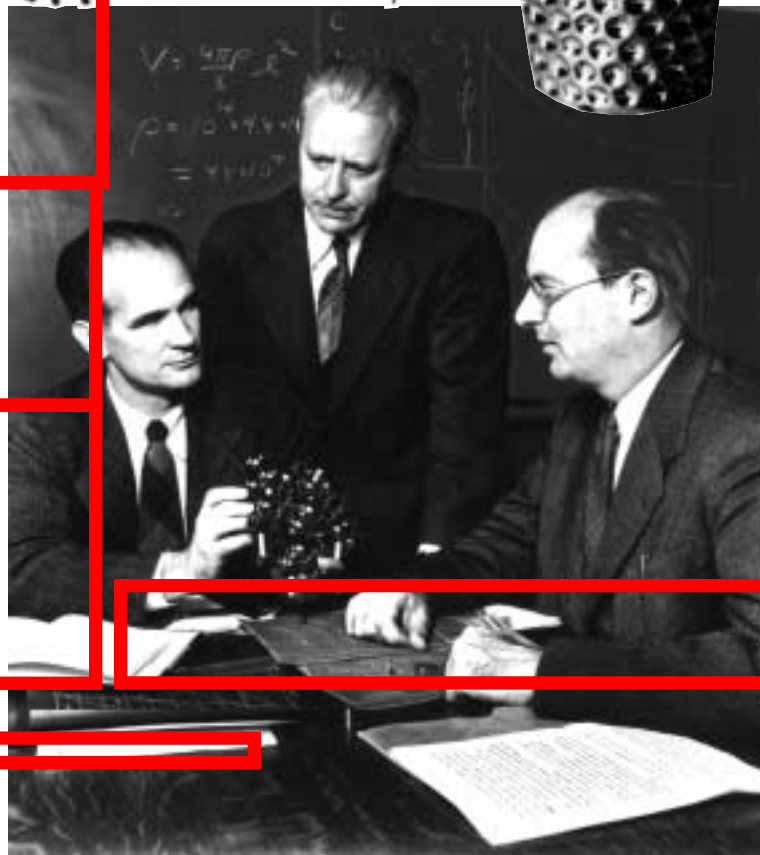
L'expérience donne un résultat imprévu. Leur morceau de germanium est dopé de manière à conduire par électron, c'est-à-dire de type *n*, *n* pour négatif. Quand ils appliquent une tension positive, même faible, sur l'une des pointes et sur l'autre pointe une tension négative, donc bloquante, le courant se met à passer dans la deuxième pointe. Il en passe même plus que dans la première : aussi l'ensemble constitue un amplificateur. Voilà l'inattendu. Ils découvrent un amplificateur au cours d'une expérience qui était destinée à expliquer pourquoi l'amplificateur le plus simple qu'on puisse envisager avec un semi-conducteur ne fonctionnait pas. Le transistor était conçu.

SMALL IS BEAUTIFUL

Il est de là petit : les deux pointes sont placées aussi près que possible l'une de l'autre, à une dizaine de micromètres, pour que les électrons n'aient pas trop de chemin à parcourir et pour que le dispositif amplifie les hautes fréquences. Des ouvriers très habiles arrivent à placer deux pointes côte à côte avec cette précision. Grâce aux techniques de formation par choc électrique de Benzer, le dispositif est relativement stable et résiste très bien aux vibrations.

Il est cependant très sensible aux variations d'ambiance, qui amènent différentes impuretés ; il y en a toujours dans l'air, aussi faut-il que ces transistors soient encapsulés dans des boîtes de trois millimètres de côté. J'en avais un, mais justement à cause de sa petite taille, je l'ai perdu.

En 50 ans, les progrès de la miniaturisation sont spectaculaires tout comme l'accroissement du nombre de transistors fabriqués annuellement, il croît, encore aujourd'hui, de 50 à 100 pour cent. Aujourd'hui il se



Les trois inventeurs du transistor, de gauche à droite, Shockley, Brattain et Bardeen. En haut, le premier transistor utilisable et commercialisé. Dans le dé à coudre 56 000 transistors fabriqués à partir de barres de silicium utilisés dans les premiers ordinateurs d'IBM.

fabrique chaque année plus de transistors qu'il n'y a de neurones dans un cerveau humain.

D'où l'idée qui se fait jour de fabriquer un cerveau artificiel. On ne va cependant pas aussi vite qu'une règle de trois pourrait nous inciter à croire : dans le cerveau humain, chaque neurone est connecté à une dizaine de milliers d'autres neurones, et cela on ne sait pas le faire. On ne sait pas réaliser les interconnexions et même s'il était possible, la puissance de sortie d'un élément n'est pas suffisante pour en commander 10 000 autres.

Revenons à notre histoire. L'explication du fonctionnement du transistor à pointe est donnée assez rapidement par nos triumvirs, sous la forme d'une double jonction positive-négative. Une nouvelle méthode de fabrication, pas très commode, est mise en place et permet les premières applications pratiques, notamment les dispositifs d'aide à la surdité. L'histoire s'accélère avec une nouvelle technique découverte peu après par les gens de la Société *Fairchild*, la technique de photolithographie, utilisant non plus le germanium, mais le silicium. Les chercheurs de *Fairchild* inventent une méthode qui permettait de réaliser des structures toutes celles qu'on voulait *pn*, *ppn*, etc., par ces techniques de photolithographie et ils abaissent les dimensions critiques à une dizaine de micromètres.

Aujourd'hui on sait descendre en fabrication de grande série à des transistors de 0,35 micromètre de côté, en laboratoire 0,15 micromètre. Cette invention va permettre l'apparition d'une autre technologie qui est le circuit intégré où l'on fabrique, en une seule opération, des circuits comportant un très grand nombre de transistors interconnectés. Les microprocesseurs, qui sont un type de circuit intégré et qui réalisent les fonctions logiques à l'intérieur d'un micro-ordinateur, contiennent cinq millions de transistors sur un petit morceau de silicium.

Je signale qu'on les fabrique sur des plaques de silicium de 30 centimètres de diamètre, alors que le circuit lui-même fait moins d'un centimètre de côté. Vous pouvez donc en élaborer plusieurs centaines sur une seule plaque. Une seule plaque, plusieurs centaines de circuits contenant chacun cinq millions de transistors, au total un demi-milliard de transistors par plaque de silicium !

On va un peu plus loin encore pour des circuits plus simples dans leur conception que sont les mémoires. Une mémoire, c'est un moyen d'utiliser des transistors. Les circuits actuels contiennent 256 millions de transistors, mais dans une structure beaucoup plus simple que les microprocesseurs.

LA PRISE DE CONSCIENCE DU FUTUR DU TRANSISTOR

Initialement le principal intérêt des transistors est leur faible consommation d'énergie et, par conséquent, leur disponibilité immédiate : les utilisateurs ne sont plus pénalisés par le temps de chauffage de la cathode des tubes à vide.

L'intérêt du circuit intégré, qui apparaîtra dans les années 1970, n'a pas été compris aussi vite. Il n'a gagné la partie que parce qu'il est fondé sur l'idée initiale de Shockley : un amplificateur composé de silicium, d'une couche d'isolant et d'une électrode métallique ou quasi métallique. Une particularité du silicium a été mise à profit : il s'oxyde très facilement, et la couche d'oxyde obtenue en surface est de la silice, un des meilleurs isolants connus ; de plus, cette silice, quand on travaille bien, ne crée pas d'états de surface, pas de piège : les électrons sont mobiles à l'interface. Les transistors à effet de champ, transistors que l'on appelle MOS, métal-oxyde-semi-conducteur, conquièrent le marché.

De plus, les circuits intégrés se perfectionnent parce qu'ils permettent leur propre fabrication... Tant que des circuits intégrés ne comportent que 1 000, à la limite 10 000 transistors, une équipe de quelques personnes peut concevoir le circuit, c'est-à-dire déterminer quel transistor mettre là, quel transistor mettre ailleurs et comment il faut les interconnecter. Cela prend beaucoup de temps, mais en travaillant un an sur le problème, les ingénieurs peuvent concevoir, «à la main», un circuit intégré comportant jusqu'à une dizaine de milliers de transistors, avec des interconnexions.

Pour aller plus loin, une seule méthode : la conception assistée par ordinateur. Ainsi performances des ordinateurs et complexité des circuits intégrés avancent de pair. Symbiose totale et cercle vertueux : tout nouvel ordinateur utilisant la dernière génération de circuits intégrés permet de concevoir la génération suivante. Cela continue aujourd'hui.

LES FACTEURS LIMITANT LA PUISSANCE DE CALCUL

Le premier facteur limitant est la vitesse de déplacement des électrons : plus la distance qu'ils doivent parcourir est grande, moins le transistor est rapide. Pour augmenter la rapidité, il faut diminuer les dimensions. Les limitations les plus sérieuses sont de deux types. La première est l'évacuation de la chaleur. Quand vous divisez par deux les dimensions d'un transistor, vous réduisez la chaleur produite d'un facteur 2, mais vous avez réduit sa surface d'un facteur 4 et,

par conséquent, la quantité de chaleur est doublée par unité de surface. On a de plus en plus de difficulté à retirer cette chaleur. N'essayez pas de mettre le doigt sur le *Paradise* de votre micro-ordinateur, vous vous brûleriez.

Signalons un inattendu heureux qui pourrait résoudre le problème de l'évacuation de la chaleur : la possibilité de réaliser facilement et à moindre coût des couches de diamant polycristallin. Pour cela, on utilise un plasma dans lequel il y a du méthane, de l'hydrogène et un peu d'oxygène : alors que les chercheurs qui ont fait l'expérience s'attendaient probablement à fabriquer du graphite, ils ont vu se constituer une couche de diamant. Le diamant est un semi-conducteur, mais avant qu'on l'utilise en tant que tel, il faut d'abord surmonter nombre de difficultés. En revanche, c'est le corps qui conduit le mieux la chaleur de tous les corps connus. Le diamant est dix fois plus conducteur de la chaleur que le cuivre et, à ce titre, il offre des possibilités qui n'ont pas, jusqu'à présent, été utilisées.

Une deuxième limite résulte des interconnexions métalliques entre transistors qui ne peuvent avoir de dimensions supérieures à celles du transistor. Les densités de courant dans ces conducteurs sont très supérieures à celles qui passent dans un fil électrique alimentant un four de ménagère et un phénomène perturbateur, l'électromigration, pénalise le passage du courant. Tout se passe comme si les électrons, en déplaçant, augmentaient la résistivité des fils. Actuellement on utilise du tungstène, métal assez peu sensible à l'électromigration, mais non sans mal : le dépôt en couche mince par photolithographie de tungstène est plus difficile que le dépôt de conducteurs plus courants.

Un autre handicap est purement économique : pour construire une usine de fabrication de transistors de 0,35 micromètre, il faut investir 1,5 milliard de dollars. La disponibilité des capitaux n'est pas infinie.

À de telles tailles, il faut lutter contre l'invisible : quand vous manipulez des circuits par des méthodes photolithographiques, avec des largeurs de traits de 0,35 micromètre, une poussière de la taille d'un virus se traduit, lors de la photolithographie, par une petite tache noire qui coupe une connexion. Par conséquent, toutes les manipulations sont automatisées : la présence d'un être humain dans les parties de lignes de fabrication où se déroulent les opérations les plus critiques augmente les taux de poussière. Les usines de fabrication de transistors sont plus stériles que celles qui sont utilisées par les biologistes. On comprend que ces usines soient extrêmement coûteuses.

EFFICACITÉ, MORALE ET RÉCOMPENSE

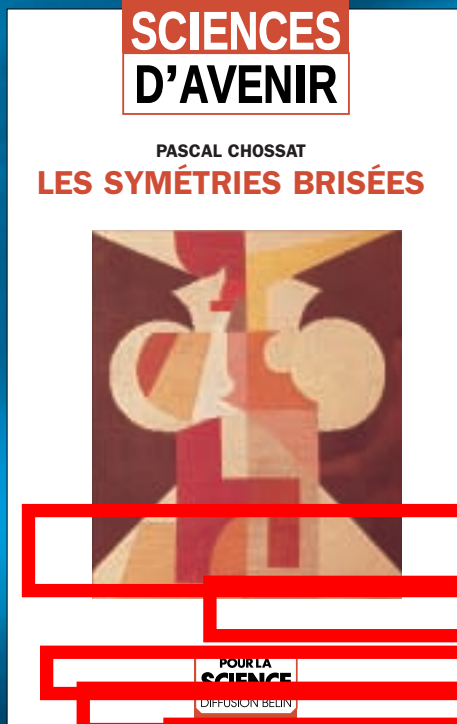
Les industries qui ont réussi dans la fabrication du transistor ne sont pas celles qui confectionnaient des tubes à vide. Dans les années 1950, les entreprises d'électronique, celles qui utilisent les composants, se rendent compte que le transistor change leur vie, et elles créent une activité semi-conducteur. Dans certains cas, cette activité est confiée, presque naturellement, aux gens qui, dans les mêmes entreprises, faisaient des tubes à vide. Les résultats ne sont pas bons. En revanche, quand la fabrication est confiée à des unités nouvelles où des ingénieurs connaissent la physique des semi-conducteurs, les résultats sont meilleurs.

L'augmentation du nombre de transistor dans des circuits de plus en plus complexes amène une autre difficulté : le test. Comment savoir qu'une pousière ou une erreur de programmation ne s'est pas introduite ? Un mathématicien a vu, il y a deux ans, qu'une erreur s'était introduite dans le *Pentium*. Ce genre d'erreur est inévitable : si on voulait tester toutes les configurations possibles d'un microprocesseur, il faudrait plusieurs milliards d'années. Donc les circuits ne sont pas testés dans toutes les configurations.

On se demande toujours si les physiciens qui ont ainsi changé la face du monde ont été suffisamment récompensés : Bardeen a été le premier homme au monde à recevoir deux prix Nobel (associé à d'autres) dans la même discipline, la physique. Le prix Nobel est associé à une bonne somme d'argent, de l'ordre de quatre millions et demi de francs, et Bardeen a touché trois millions, ce qui est insuffisant pour le considérer comme un homme extraordinairement riche. C'est le prix d'un appartement modeste à Paris.

En revanche, le prestige des trois inventeurs a été immense : Bardeen a été nommé professeur dans une université où sa carrière fut brillante. Brattain est resté un chercheur heureux à la *Bell*, jusqu'à sa retraite. Shockley a essayé de se lancer dans l'industrie : il a créé une entreprise qui a été absorbée. Je ne crois pas que Shockley ait fait fortune. Comment déterminer la juste et morale récompense pécuniaire d'une telle invention ? Je ne sais, et je me demande si cela a tellement d'importance.

Pierre AIGRAIN est membre de l'Académie des sciences. Une retranscription de ce débat, enregistré avec Émile Noël au Palais de la Découverte, sera diffusée sur France Culture le 11 septembre à 9 heures.



LES SYMÉTRIES BRISÉES

Pascal Chossat

La symétrie, de simple conséquence des lois physiques, est devenue principe d'explication dans des domaines aussi divers que les transitions de phase ou la turbulence.

La théorie des brisures de symétrie rend compte de la diversité des phénomènes en s'attachant aux symétries perdues, «brisées», d'un état original.

Elle donne une nouvelle compréhension de la genèse des formes dans la nature.

Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Les produits historiques

JEAN JACQUES

Que deviennent les produits chimiques préparés par des chimistes dont l'histoire a retenu le nom ?

Les produits chimiques nouveaux sont des créations humaines particulières : quand un chimiste a isolé ou synthétisé une substance pour la première fois, quand il a vérifié son identité, l'existence matérielle de la substance semble devenir aussitôt inutile : sa synthèse ou ses propriétés sont consignées dans des publications ou dans des brevets, mais la substance elle-même, poudre dans un flacon ou liquide dans un tube, semble ne plus avoir d'intérêt.

Pourtant cette existence matérielle est cruciale, car si un chimiste peut concevoir une nouvelle molécule, écrire sa formule et prévoir sa synthèse, le produit n'existera vraiment que lorsqu'il aura été fabriqué, réalisé, telle une symphonie que l'auditeur n'apprécie que quand elle passe de la partition à l'exécution.

On voit ainsi combien, en chimie, la distinction entre le réel et le possible reste difficile. Elle se complique encore par le système des brevets, où l'on peut se « réserver » l'existence, s'approprier ce qui n'est pas encore tangible, mais qui pourrait exister : dans certains cas, autour d'une formule générale dont quelques représentants possèdent des propriétés qui intéressent l'industrie, on autorise de délimiter un « périmètre de protection » où sont englobés des « analogues » qui n'ont encore pas été synthétisés et ne le seront peut-être jamais.

L'original de toute forme nouvelle de la matière transformée

par la science n'a pas, *a priori*, de valeur particulière : puisque, correctement décrit, il peut être reproduit à l'identique. La question du faux ne se pose pas, puisque rien ne distingue une molécule d'une autre molécule ayant la même formule. Cependant la mémoire d'un laboratoire de chimie ne se réduit pas à sa seule bibliothèque, même informatisée. Il est de tradition d'y accumuler un certain nombre de produits chimiques, pour des raisons que nous examinerons.

Le problème de la conservation des produits historiques se pose aujourd'hui, à l'occasion du déménagement imminent du Laboratoire de chimie du Collège de France : que faire des collections de produits chimiques accumulés depuis plus d'un siècle par des générations de chercheurs dans les diverses « réserves » du bâtiment menacé d'évacuation ? Plusieurs milliers de récipients variés (tubes, flacons bouchés à l'émeri, ampoules scellées, etc.) contiennent des échantillons dont la masse est comprise entre quelques milligrammes et plusieurs kilogrammes ; certains sont dus à des figures de la chimie telles que Friedrich Kekulé (1829-1896), fondateur de la chimie organique structurale qui trouva la formule du benzène, ou Marcelin Berthelot (1827-1907), qui fonda notamment la thermo-

chimie et réalisa de nombreuses synthèses (acétylène, benzène, propylène...).

Tout d'abord, existe-t-il des échantillons

historiques de produits chimiques, qui méritent une attention spéciale ? Certains produits font-ils partie du patrimoine au même titre que le manuscrit qui en décrit pour la première fois l'obtention ? Pour qui s'intéresse à l'histoire des sciences, la réponse est évidemment oui. L'historien de la chimie a besoin de connaître et de pouvoir éventuellement vérifier, par des moyens actuels, l'identité ou la pureté de l'échantillon de certaines substances dont l'obtention a constitué un progrès décisif. Selon quels critères juger cette importance ? En admettant cette question résolue, où entreposer ces précieux témoignages ?

Il existe, en France, quelques tentatives de réponse aux questions que je n'ai pas posées : certaines facultés de pharmacie ou le Muséum national d'histoire naturelle, par exemple, conservent surtout des produits naturels. En Suisse, un organisme privé de « préservation de la diversité moléculaire » a été récemment créé, mais on manque encore de recul pour juger de son efficacité et du public qu'il vise.

PRODUITS HISTORIQUES, DIVERSITÉ MOLÉCULAIRE

Pour déterminer les actions à entreprendre, il faut d'abord savoir en quoi de vieux produits, même s'ils ne sont pas historiques, peuvent être intéressants. Les raisons que je trouve sont variées et, sans doute, partiales. La première peut être purement utilitaire : « ça peut toujours servir ». Ayant retrouvé plusieurs centaines de grammes de tartrate double de sodium et d'ammonium gauche (non naturel) préparé par Émile Jungfleisch (1867-1916), j'ai pu reproduire les expériences de cristallisation décrites par Louis Pasteur.

Un autre exemple, moins intéressant mais plus intéressant : des cristaux de ce même tartrate, préparés par Pasteur lui-même et conservés dans la collection de minéralogie de l'Université de Paris VII, nous apprennent *de visu* à quel point l'observation de l'hémiédrie (la propriété pour une molécule de former des cristaux asymétriques) est rare et difficile, et étayent notre admiration pour le jeune Normalien qui « inventa » la dissymétrie moléculaire, après avoir trié les cristaux gauche et droit du tartrate, à la pince.

Dans le cas des produits naturels rares, l'échantillon original peut constituer une référence d'identité, lorsqu'on en découvre une source nouvelle ou qu'on en réalise une synthèse inédite. On peut alors confirmer, par des moyens modernes, la structure ou les proprié-



1. Vers 1880, Marcelin Berthelot avait obtenu l'acide persulfurique en soumettant un mélange d'acide sulfureux et d'oxygène à l'action d'une décharge électrique. Ce persulfate d'ammonium, préparé par Berthelot lui-même, est un sel de cet acide. Il peut servir d'agent de blanchiment.

tés particulières attribuées à l'«échantillon unique». Ainsi Jean-Marie Lehn et ses collègues suédois ont retrouvé dans nos collections un petit flacon contenant de la laccase (une enzyme présente dans le latex d'un arbre à laques indochinois), isolée en 1894 par Gabriel Bertrand (1867-1962). Ils ont vérifié que cet échantillon contenait bien du manganèse, comme l'avait annoncé son découvreur, ce qui avait été plus tard contesté.

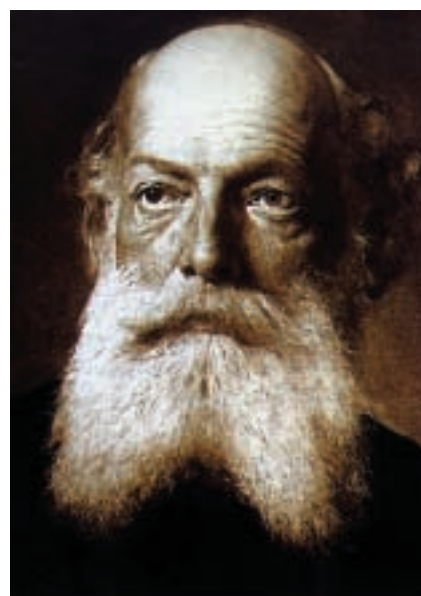
Parfois aussi, l'examen de l'échantillon «historique» ne tourne pas à l'avantage du créateur : on connaît des cas où l'on a découvert que le produit ne possédait ni l'identité ni la pureté que l'étiquette et l'histoire lui attribuaient. Ainsi, en 1933, Fritz Kögl et ses collègues de l'Université d'Utrecht avaient décrit les propriétés et la structure des premières

hormones de croissance naturellement présentes dans les végétaux. Ils avaient trouvé, dans l'urine humaine, des traces de ces produits qu'ils nommèrent «auxines». Leurs données furent admises comme classiques et mentionnées dans les dictionnaires et dans les traités de chimie, pendant plus de 30 ans. Toutefois, dans les années 1960, des doutes s'élevèrent, car personne n'arrivait à reproduire les données concernant les activités biologiques annoncées.

C'est ici que la conservation des produits historiques est justifiée : quelque temps après la mort de Kögl, les échantillons «authentiques» de ses auxines et de leurs dérivés furent retrouvés et examinés par J. F. et J. F. G. Vliegenthart, appartenant à la même université. Ils constatèrent qu'aucune de ces

reliques n'avait les formules et les propriétés publiées (à l'exception de leur température de fusion). Plus tard, une équipe japonaise synthétisa tous les composés ayant la structure de ceux qui avaient été décrits par Kögl : aucun n'avait de propriétés phyto-hormonales.

Enfin les développements récents en «diversité moléculaire» donnent une raison supplémentaire de conserver les produits : pour trouver de nouveaux médicaments, les pharmaco-chimistes ont appris à fabriquer des «bibliothèques» qui rassemblent des mélanges de milliers de nouveaux produits ; ils testent ensuite les propriétés biologiques de plusieurs dizaines de composés simultanément. Pour ces études, des bibliothèques constituées par une collection de molécules variées, et déjà synthétisées, sont une aide considérable.



2. Échantillons de tartrate de chaux préparés par Kekulé (en haut à droite) et par Perkin. En 1860, Auguste Kekulé (1828-1896) et William Perkin (1838-1907) avaient indépendamment réussi la synthèse de l'acide tartrique racémique, à partir de l'acide succinique. Retrouvés au Collège de France, ces échantillons de tartrate de calcium ont sans doute été rassemblés par Émile Jungfleisch, qui, en 1873 et en 1884, s'intéressa également à la synthèse de cet acide qu'étudia Pasteur (en bas à droite).

LA PÉREMPTION DE L'HISTOIRE

La conservation des produits historiques ou de la préservation de la diversité moléculaire suppose que l'on soit capable de répondre à une autre question préalable : les produits chimiques vieillissent-ils et sont-ils sujets à péremption ? Le bon sens chimique impose une réponse circonstanciée : si les produits minéraux sont généralement inaltérables, les produits organiques, selon leur structure et les conditions de leur stockage, sont plus ou moins périssables, la chaleur, l'air et la lumière contribuant à leur dégradation.

Mon expérience m'a montré que le contenu des flacons éventuellement historiques est beaucoup moins menacé que le contenant : le temps endommage les bouchons de liège et les étiquettes (quand il ne bloque pas les rodages à l'émeri), mais il fait peu souffrir les produits cristallisés.

Les liquides semblent plus périssables que les solides, mais les produits conservés en tubes scellés sont apparemment inaltérables. Nos collections renferment ainsi plusieurs échantillons d'alcools tertiaires qui avaient été préparés par leur découvreur,

Alexandre Boutlerov (1826-1886), et envoyés à Marcelin Berthelot pour qu'il en étudie les chaleurs de combustion ; ils n'ont apparemment pas changé. De même, au Collège de France, Marcel Delépine (1873-1966) avait eu la curiosité de m'informer de l'état de conservation de produits qu'il avait préparés 26 ans auparavant : des tubes scellés contenant des produits soufrés, capables de s'autoxyder à l'air « avec fumées et lumineuse » ont été ouverts et analysés avec toute la minutie dont mon bon maître était capable ; malgré leur fragilité, ces produits étaient encore en parfait état. Enfin j'ai récemment mesuré les spectres RMN de quelques uns des produits que j'ai décrits en 1945 dans ma thèse. Si la structure de quelques uns d'entre eux comportait quelques erreurs qu'il m'était impossible d'envisager à l'époque, j'ai vérifié que les échantillons étaient d'une pureté inaltérée.

L'étude la plus intéressante que je connaisse, à propos du vieillissement des produits de collection, est sans doute celle de Joshua Howarth, de l'Université de Dublin : en 1991, il a analysé, avant leur dispersion ou leur destruction, des produits préparés entre 1917 et 1924 par des thésards de Theo-

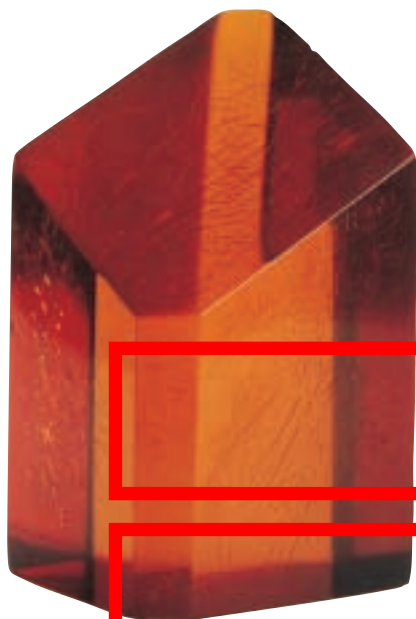
dore Curtius (1857-1928) alors que ce chimiste était professeur à Heidelberg. Sur la trentaine d'échantillons examinés, un seul ne possédait pas la structure promise par son étiquette et, pour la quasi totalité, ils étaient purs à plus de 90 pour cent.

LES RÉSERVES DE PRODUITS

Nous avons considéré des héritages du passé, quel sera notre legs ? Dans le domaine de l'écrit, l'informatique a fait craindre que les repentirs des écrivains soient perdus, effacés, et que les spécialistes de la critique littéraire n'aient plus que les œuvres, sans les moyens de mieux les situer. Les chimistes d'aujourd'hui laisseront-ils, des produits à la postérité et contribueront-ils à l'enrichissement des réserves ? J'ai peu de craintes, car même si, depuis quelques décennies, des marchands aux impressionnants catalogues fournissent des produits en un temps record et même si le stockage des matières premières se justifie de moins en moins (on travaille aujourd'hui sur des quantités très faibles de réactifs), les chimistes vident rarement tous les flacons commandés



3. Ce pot (à gauche) contenant plusieurs centaines de grammes de tartrate de sodium et d'ammonium «non naturel», préparé par Émile Jungfleisch est identifié, au crayon à papier, par Marcel Delépine (1871-1965), qui fut un de ses successeurs au Collège de France. Sur la photographie ci-dessus, Émile Jungfleisch est au centre, entouré par ses collaborateurs de la Faculté de pharmacie de Paris, en 1883. À la mort de Marcelin Berthelot, en 1907, il lui succéda à la chaire de chimie organique du Collège de France.



4. Un échantillon d'ORCA (anagramme d'acro), une matière plastique à base d'acroléine préparée par Charles Moureu (1863-1929) et par Charles Sufraisse (1885-1969). Ce matériau fut un précurseur et un prototype des résines acryliques.

d'urgence, conservant généralement quelque fond de bouteille de produit coûteux qu'ils ont scrupule à jeter. De surcroît, les chimistes qui prévoient la suite de leurs activités conservent prudemment des échantillons de ceux qui ne sont pas commerciaux et qu'ils ont parfois peine à préparer. Aussi ai-je l'impression que le métier de chercheur en chimie organique restera pour l'essentiel ce qui fait aujourd'hui sa raison d'être : l'accumulation plus ou moins bien gérée de la production et la création plus ou moins voulue de collections me paraît incontournable.

Jean JACQUES est directeur de recherche émérite au CNRS (Laboratoire de chimie des interactions moléculaires du Collège de France).

J.-M. LEHN, B.G.E. SELIN et M. ÖBLAD, *Metal analysis of the laccase of Gabriel Bertrand*, in *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 11, p. 228, 1986.

M. MATSUDA et Y.S. Hwang, *Proc. Jap. Acad.*, vol. 42, p. 488, 1966.

J. F. et J.F.G. Vliegenthart, *Recueil des travaux chimiques des Pays-Bas*, vol. 85, p. 1267, 1966.

K. MORI, A. TAMURA et M. KUDO, *Rec. Ann. Chem.*, p. 775, 1991.

M. DELÉPINE, *Sur l'autoxydation des composés soufrés organiques*, in *Bull. Soc. Chim.*, vol 6, p. 1234, 1939.

J. HOWARTH, *Journal of Chemical Education*, vol. 71, p. 726, 1994.

La longueur en bouche

Des enzymes de la salive amplifient un arôme important des vins obtenus à partir du cépage sauvignon.

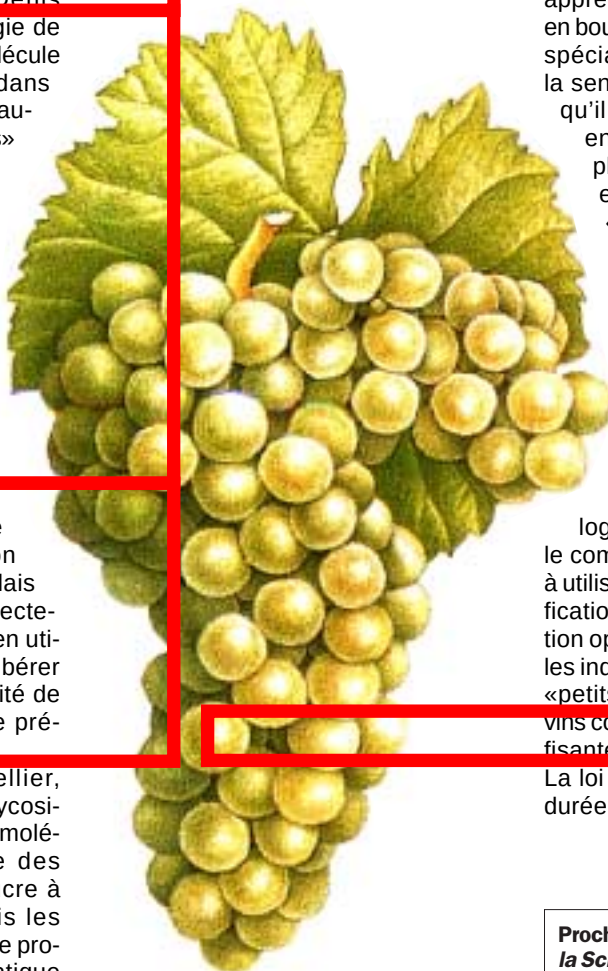
Les biochimistes s'intéressent beaucoup aux méthodes de production des vins, mais ils ont rarement exploré la physiologie de la dégustation. Pourtant des résultats récents éclaircissent la dégustation : dans les vins formés à partir du cépage sauvignon blanc, on a trouvé une molécule aromatique qui ne prend son effet que lorsque les enzymes de la salive l'ont séparée de son précurseur ; il faut ainsi quelques instants, avant que l'arôme soit perçu.

En 1995, M. Darriet et Denis Dubourdieu, à l'Institut d'œnologie de Bordeaux, avaient trouvé une molécule qui joue un rôle prépondérant dans l'arôme spécifique des vins de sauvignon, leur conférant la note «buis» ou «gentil». Cette molécule simple a un squelette composé de cinq atomes de carbone seulement, et elle contient notamment un atome de soufre.

Ses découvreurs avaient observé qu'elle apparaît dans le vin au cours de la fermentation alcoolique, et ils avaient identifié son précurseur. Mieux encore, ils avaient observé que la transformation de ce précurseur en arôme s'effectue de façon inégale selon les souches de levures assurant la fermentation alcoolique. Les chimistes bordelais avaient essayé de connaître directement la structure du précurseur en utilisant une enzyme capable de libérer l'arôme : connaissant la spécificité de l'enzyme, on aurait déterminé le précurseur.

Au Centre INRA de Montpellier, M. Bayonove étudie ainsi des glycosidases, enzymes qui coupent des molécules odorantes de la classe des terpènes, de la molécule de sucre à laquelle ils sont liés. Toutefois les enzymes utilisées à Montpellier ne produisirent pas le composé aromatique étudié du sauvignon : il n'était pas lié à un sucre.

En revanche, les chimistes cherchèrent, parmi les enzymes qui coupent les liaisons entre un atome de carbone et un atome de soufre, si l'une d'elles ferait apparaître l'arôme : ils s'intéressèrent notamment à une enzyme nommée lyase, produite par une bactérie intestinale *Eubacterium limosum* et qui coupe les dérivés soufrés de la cystéine (un acide aminé). Le composé du sauvignon fut libéré *in vitro* d'un extrait non volatil de moût de sauvignon par



Le cépage sauvignon blanc, qui fait les plus grands des vins blancs du Bordelais.

action d'un broyat bactérien d'*Eubacterium limosum*. Ils conclurent que le précurseur de l'arôme contient de la cystéine, dans le moût.

Quelles sont les conséquences de ces résultats ? Tout d'abord, ils confirment que le raisin a un potentiel aromatique que la vinification doit maîtriser : le vinificateur doit choisir les levures qui savent développer le goût du cépage. Au milieu de ce siècle, Curnonsky, prince des gastronomes, revendiquait que les aliments aient «le goût de ce qu'ils sont». De ce point de vue, la chimie met sur la voie des vins de qualité.

UNE LONGUEUR D'AVANCE

D'autre part, les œnologues de Bordeaux avaient montré que le précurseur de l'arôme se retrouve en quantité notable dans le vin, la molécule aromatique restant liée à la partie non aromatique. Or les enzymes de la salive détachent la cystéine de l'arôme soufré, en quelques secondes : on entrevoit ainsi un premier exemple de mécanismes de ce que les gourmets apprécient sous le nom de «longueur en bouche», définissant même une unité spéciale, la caudalie, pour quantifier la sensation que laisse le vin une fois qu'il a été bu. Certains grands vins engendrent une sensation qui dure plusieurs secondes (ou caudalies) et, dans des cas exceptionnels, ils «forment même la queue de paon» : la sensation, une fois disparue, revient. Si la molécule soufrée découverte à Bordeaux n'explique pas la queue de paon, elle est la première à donner une longueur en bouche dont on comprend l'origine.

Comment utiliser la découverte ? Comme la loi interdit le frelatage des vins, les œnologues qui travaillent souvent pour le compte de producteurs chercheront à utiliser leurs résultats pour que la vinification biologique assure une production optimale de l'arôme identifié, mais les individus désargentés qui jouent les «petits chimistes», s'ils achètent des vins contenant l'arôme en quantité insuffisante, pourront s'amuser à l'ajouter. La loi ne leur interdit pas d'allonger la durée de leur plaisir.

Hervé This

Prochain rendez-vous *France Info* et *Pour la Science*, le 27 septembre 1996, avec la chronique *Info Sciences* de Marie-Odile Monchicourt.

JEU-CONCOURS

PIERRE TOUGNE

N° 27

L'ART DE TRANSVASER

Un marchand d'huile doit livrer une quantité d'huile comprise entre un et douze litres, mais qu'il ne connaît pas à l'avance. Pour cela, il dispose de trois urnes vides de 7, 8, 9 litres ainsi que deux urnes pleines de 12 et 13 litres. Malheureusement son chameau ne peut porter que trois urnes : deux vides et un plein. Quels devront être ces trois urnes pour qu'il puisse satisfaire n'importe quelle commande du client ? Il

est entendu qu'il doit délivrer la quantité souhaitée en une seule fois simplement par un transvasement.

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de septembre 1996, dix gagnants tirés au sort recevront un livre de la Collection *Univers des Sciences*.



RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°25

La clé de ce problème est le théorème de Ceva, qui est resté dans la mémoire de nombreux lecteurs. Ce théorème indique que si AI, BJ, CK sont trois droites concourantes, alors :

$$\frac{IB}{IC} \times \frac{JC}{JA} \times \frac{KA}{KB} = -1$$

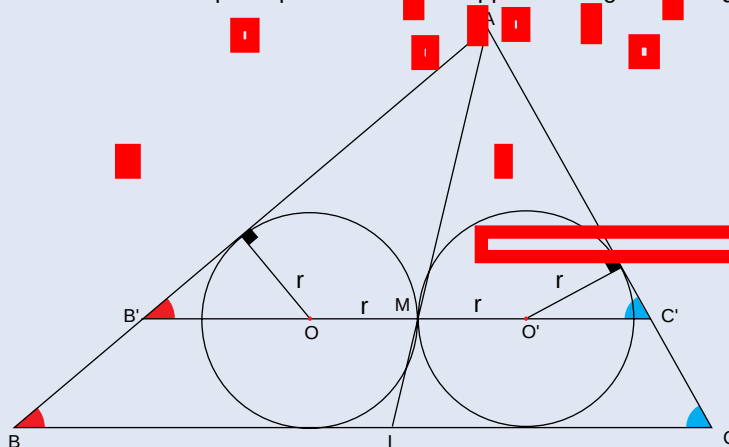
Dans le problème qui nous intéresse, soient B' et C' les points d'intersection de la droite OO' (parallèle à BC) avec les côtés AB et AC du triangle. Les triangles AB'M et ABI, ainsi que AC'M et AIC sont semblables deux à deux, et

$$\frac{IB}{IC} = \frac{MB'}{MC'}$$

Or $MB' = OB' + OM = r/\sin B + r = r(1 + 1/\sin B)$; de même $MC' = r(1 + 1/\sin C)$.

$$\text{Donc : } \frac{IB}{IC} = \frac{1 + 1/\sin B}{1 + 1/\sin C}$$

$\frac{JC}{JA}$ et $\frac{KA}{KB}$ s'obtiennent immédiatement par permutation circulaire de A, B et C, et l'on vérifie que le produit des trois rapports est égal à -1. CQFD.



Résistance au VIH

On connaît une porte d'entrée du virus du SIDA dans l'organisme. On vient de découvrir une autre clé, indispensable à l'infection.

Pourquoi certaines personnes régulièrement exposées au VIH, le virus responsable du SIDA, semblent-elles résistantes ? Pourquoi les personnes contaminées n'évoluent-elles pas toutes aussi vite vers le stade du SIDA ? Ces questions préoccupent les immunologistes : si certaines personnes bénéficient d'un facteur protecteur, peut-être disposerait-on enfin d'un moyen d'éviter la contamination ou de retarder l'issue fatale. Or le VIH a besoin de clés pour que sa membrane fusionne avec celle de la cellule infectée, c'est-à-dire pour qu'il puisse introduire son génome dans la cellule hôte.

Les immunologistes sont depuis longtemps persuadés que la seule clé identifiée jusqu'à présent, le récepteur CD₄ porté par les macrophages et certains lymphocytes, ne suffit pas au virus, mais qu'il lui faut au moins deux clés pour pénétrer dans les forteresses cellulaires. L'équipe de Marc Parmentier et de Gilbert Vassart, à la Faculté de médecine de l'Université libre de Bruxelles, a identifié cette deuxième clé et a montré que les personnes qui en sont dépourvues sont résistantes au VIH.

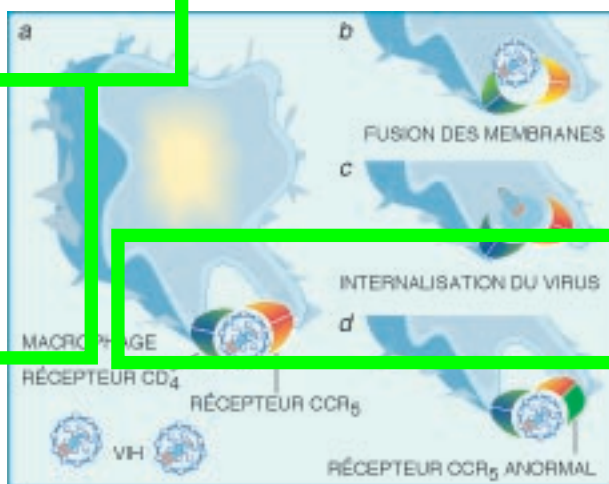
Au cours d'une infection, le virus change de cible cellulaire : lors de la contamination, c'est envahit les macrophages, la porte d'entrée du virus dans l'organisme, et, ultérieurement, sa cible devient les lymphocytes T qui portent le récepteur CD₄. Si une souche virale donnée ne peut pénétrer dans toutes les cellules qui portent le récepteur CD₄, cela signifie que ce récepteur ne suffit pas à la reconnaissance ou à la fusion des membranes cellulaire et virale. Progressivement est née l'idée qu'il fallait des « cofacteurs » pour que le VIH infecte ses cellules cibles.

Après plusieurs années de recherches infructueuses, on a identifié un des cofacteurs, la fusine. Cette molécule semble nécessaire à la pénétration du virus dans certaines cellules : quand on force des cellules « imperméables » au VIH à exprimer le récepteur CD₄ et la fusine, elles laissent entrer cer-

taines souches de virus. Cette molécule ressemble aux récepteurs des chémokines, des molécules qui participent aux réactions inflammatoires. Or, on a montré récemment que certaines de ces chémokines (1).

En bloquant, *in vitro*, la réplication des lymphocytes T CD₄ infectés par le VIH. L'équipe de Bruxelles eut alors l'idée d'étudier plus précisément le récepteur CCR₅ de ces chémokines. Effectivement, les souches virales qui infectent les macrophages fusionnent, *in vitro*, avec les cellules qui expriment à la fois les récepteurs CD₄ et CCR₅.

La présence ou l'absence de ce récepteur à la surface des macrophages influence-t-elle sur la résistance au VIH, *in vivo* ? Pour le savoir, M. Parmentier et ses collègues ont d'abord séquencé la région codante du gène CCR₅ et comparé les deux allèles de ce gène chez trois patients infectés mais depuis longtemps en phase asymptomatique, et chez quatre personnes indemnes de toute contamination. Un des patients asymptomatiques et deux des personnes saines avaient un allèle normal et un allèle muté. Le récepteur codé par l'allèle muté n'est pas fonctionnel, c'est-à-dire qu'il ne lie pas les chémokines. Ce récepteur n'interagit pas avec le virus : une cellule dotée d'un récepteur CCR₅ muté n'est pas infectée.



Le récepteur CCR₅ est, comme le récepteur CD₄, indispensable à la pénétration du VIH dans les macrophages. Quand le virus est fixé (a), sa membrane et celle de la cellule fusionnent (b), et le virus injecte son génome dans la cellule cible (c). Lorsque le récepteur CCR₅ est anormal, le macrophage n'est pas infecté (d).

Ensuite, l'équipe belge a étudié plusieurs centaines d'échantillons d'ADN, qui provenaient de personnes saines d'origine caucasienne (d'Europe ou d'Amérique du Nord), africaine et japonaise. Il est apparu que les Caucasiens sont porteurs, plus souvent que les autres, d'un allèle CCR₅ muté, voire de deux allèles mutés. Les populations africaine et japonaise étudiées ne présentent jamais l'allèle muté.

Enfin, pour préciser si la présence ou l'absence de l'allèle muté est bien liée à la sensibilité vis-à-vis du VIH, les biologistes ont étudié le polymorphisme du gène CCR₅ parmi des personnes séropositives de la population caucasienne – la seule qui présente ce polymorphisme. Effectivement, ces personnes ont généralement l'allèle normal, mais certaines ont des cellules qui possèdent l'allèle muté. Ces cellules normales sont peu nombreuses, et aucune n'a deux allèles mutés. Ainsi, les personnes ayant une copie anormale du gène codant le récepteur CCR₅ seraient moins sensibles au virus que les personnes n'en ayant aucune ; celles qui en auraient deux seraient résistantes.

UNE MUTATION BÉNÉFIQUE

En conclusion, le récepteur CCR₅ fonctionne comme un cofacteur essentiel pour que des macrophages soient infectés. Le récepteur CCR₅ n'est pas fonctionnel : il confère à certaines personnes qui le portent une certaine résistance à l'infection. Comme il est également présent sur certains lymphocytes, peut-être prolonge-t-il la période asymptomatique qui précède la phase terminale du SIDA. D'autres études devront préciser les caractéristiques et les limites de cette relative immunité.

Si ces résultats sont confirmés, comment pourrait-on museler les récepteurs CCR₅ fonctionnels ? On pourrait injecter de grandes quantités de chémokines qui bloqueraient les récepteurs CCR₅ et empêcheraient le VIH de s'y fixer. Ils déclencheraient sans doute peu d'effets secondaires indésirables, même si un tel traitement préventif ne pourrait être utilisé de façon prolongée. Des anticorps dirigés contre le récepteur auraient le même effet. En revanche, un tel traitement n'empêcherait sans doute pas la maladie d'évoluer chez les personnes déjà infectées, car on sait que certaines souches de VIH utilisent comme cofacteur d'autres récepteurs des chémokines. □

Les dialectes des pinsons

Ils indiquent l'origine d'individus migrants.

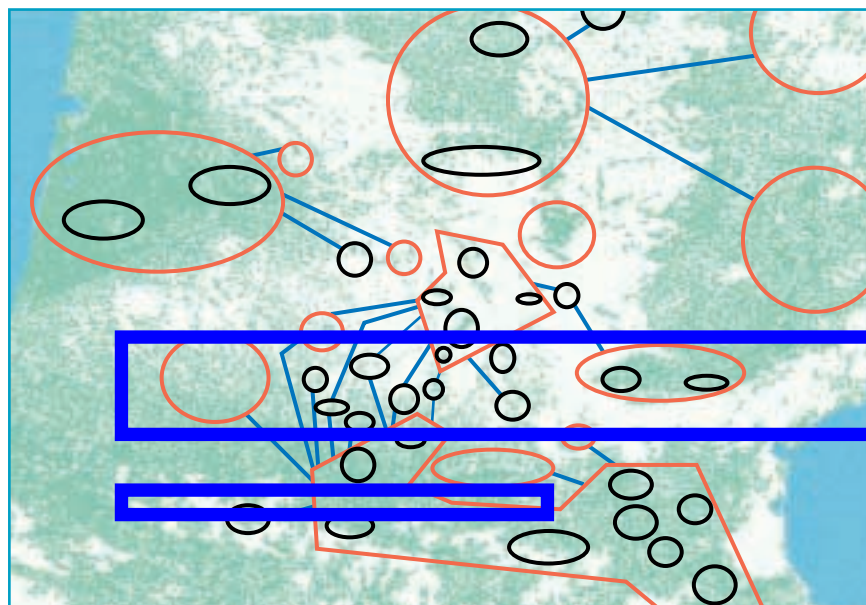
En voyage dans le Pacifique, Charles Darwin s'avise de la diversité des tailles et des formes des becs des 13 espèces de pinsons des îles Galapagos. On sait l'importance des conclusions qu'il en tire. S'il avait voyagé dans le Sud-Ouest de la France, aurait-il perçu la diversité sonore qui règne au sein de la seule espèce de pinsons des arbres? Des groupes de pinsons indépendants chantent dans des dialectes différents. Aussi utilise-t-on ce marquage pour reconstituer les mouvements de population.

Le pinson des arbres apprend à chanter pendant les trois premières semaines de sa vie, à l'écoute de ses parents et de son voisinage. Son répertoire, qui compte de une à six phrases, est ensuite fixé pour toute sa vie. C'est donc une trace indélébile de son lieu de naissance.

Dans le Sud-Ouest de la France, le pinson des arbres vit exclusivement en milieu forestier. Chaque individu mâle a un territoire, qu'il balise par son chant. Les relations entre la densité forestière, calculée à partir d'une photogra-

phie prise par un satellite, et l'indice de présence du pinson, mesuré par des enquêtes de terrain, permet de calculer la probabilité d'occurrence du pinson dans la région. Celle-ci n'est, en effet, pas uniformément peuplée : la densité de population suit le boisement. Des secteurs à forte densité de population côtoient des zones moins densément peuplées, et des zones habituellement non habitées par l'espèce.

Nous avons enregistré le chant de pinsons mâles, de mi-avril à début juillet, pendant plusieurs années, dans de nombreuses zones boisées de la région Sud-Ouest. Dans chaque forêt, 15 à 20 pinsons différents ont été enregistrés, chacun pendant une vingtaine de minutes de chant effectif : nous voulions connaître l'ensemble de son répertoire. Nous avons d'abord trié les différentes phrases à l'oreille. Nous les avons ensuite numérisées et traduites en sonogrammes, où la puissance sonore est représentée en fonction du temps et de la fréquence. Nous pouvions alors les comparer sans ambiguïté.



Les zones de répartition des dialectes du pinson des arbres (en rouge) et de leurs particularismes locaux (en noir) correspondent au fractionnement des zones boisées dans la région Sud-Ouest. Les phrases communes entre certains dialectes (en bleu) permettent de distinguer trois grands ensembles indépendants.

CHANTS RÉGIONAUX

L'analyse des répertoires des oiseaux montre l'existence de dialectes, localisés dans les zones fortement peuplées. Un dialecte est composé d'une trentaine de phrases, dont six environ sont répandues dans toute la population, les autres étant rares. Des 14 dialectes rencontrés dans le Sud-Ouest de la France, trois grands ensembles ne possèdent aucun chant en commun et peuvent être qualifiés de «super dialectes». L'ensemble du Massif Central regroupe le Quercy, le plateau de Millevaches, le Cantal et les Cévennes. L'ensemble pyrénéen, complexe très varié, aurait donné naissance au noyau de la plaine garonnaise autour de Toulouse. Le troisième ensemble est réparti dans les Landes.

Dans certaines régions, des dialectes très apparentés sont répandus sur de grandes distances ; ailleurs, la proximité géographique des noyaux dialectaux n'empêche pas une grande différenciation. La fragmentation de l'ensemble des pinsons du Sud-Ouest en sous-population n'est donc pas régulière dans l'espace : elle est liée au fractionnement du milieu naturel du pinson, la forêt.

Les noyaux dialectaux ne sont pas complètement isolés : des pinsons changent de territoire d'une année sur l'autre, emportant avec eux leur dialecte. On repère ainsi leur arrivée dans un secteur.

Autour d'un noyau dialectal, qui correspond toujours à une zone de forte densité de population, l'arrivée de pinsons «étrangers» (marquée par un renouvellement dialectal) est d'autant plus importante que le milieu est peu favorable. Elle est inexistante dans les forêts, seulement perceptible dans les secteurs moyennement boisés, et forte dans les secteurs peu boisés. Tout se passe comme s'il existait une «prime à la proximité» pour les colons issus du noyau central : ils s'installent dans les zones les plus boisées. Les pinsons provenant de noyaux dialectaux géographiquement plus éloignés s'installent plutôt dans des milieux moins favorables. Les quelques migrations à grande distance que nous avons observées arrivaient toutes dans des secteurs peu boisés.

Dans le cas d'immigration réussie, une sorte de stage au voisinage des noyaux densément peuplés serait donc la règle. Ce stage donnerait le temps à la génération suivante d'apprendre le dialecte local. Les immigrations étagées sur deux ou trois générations sont peut-être plus courantes qu'on ne l'imagine.

Jean JOACHIM, INRA - IRGM,
Jacques LAUGA, CNRS, Univ. Toulouse III

Collision maritime

Sans vent, deux navires sur une mer houleuse s'attirent.

Au dix^e siècle de nombreux marins rapportaient un phénomène mystérieux : deux navires proches, sur une mer houleuse sans vent, s'attirent et se rapprochent jusqu'à la collision. En revanche, un bateau soumis au roulis près du mur d'un quai ressent une force répulsive. Ces forces ne sont-elles que des superstitions de marins ? En utilisant une analogie avec la mécanique quantique, Spiko Boersma, un physicien hollandais de Delft, a calculé ces forces, bien réelles.

Les navires et les atomes ne peuvent être décrits par la même physique : les atomes sont régis par la mécanique quantique, et les navires par la physique classique. Toutefois, S. Boersma avait remarqué la similitude entre cette mystérieuse force attractive et la force de Van der Waals, qui attire les atomes.

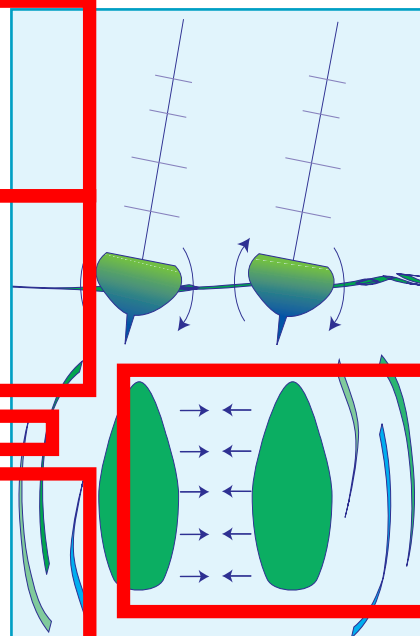
En 1948, Hendrick Casimir expliquait l'attraction atomique à l'aide de la physique quantique. En physique quantique, le vide n'existe pas : sur des échelles de distance de 10^{-37} mètre, des particules virtuelles apparaissent en permanence par paires, en raison des fluctuations de l'énergie du vide, et disparaissent rapidement. Chaque particule subsiste toutefois suffisamment longtemps (10^{-23} seconde) pour que

sa rencontre avec les atomes ambiants crée une pression de radiation. On montre qu'entre deux atomes proches, il se crée une région où la pression de radiation est inférieure à la pression ambiante, laquelle rapproche alors les atomes.

Bien que cet effet soit purement quantique, on peut considérer que la pression de radiation est semblable à un champ d'ondes. Ainsi, pour expliquer l'attraction entre les navires, S. Boersma reformule en termes d'ondes les équations qui établissent la pression de radiation.

ATTRACTION FATALE ?

Les navires qui roulent sous l'effet de la houle absorbent une partie de l'énergie des vagues. Ils réémettent ensuite une fraction de cette énergie dans toutes les directions, sous la forme d'ondes secondaires (de vagues). Lorsque la longueur d'onde de la houle est bien supérieure à la distance entre les bateaux, les navires oscillent en phase, et les ondes secondaires ont la même longueur d'onde que celle de la houle. Les bords des bateaux qui se font face se déplacent donc en opposition de phase. Comme la longueur d'onde des ondes émises est grande devant la distance entre les bateaux, les interférences entre les ondes sont destruc-

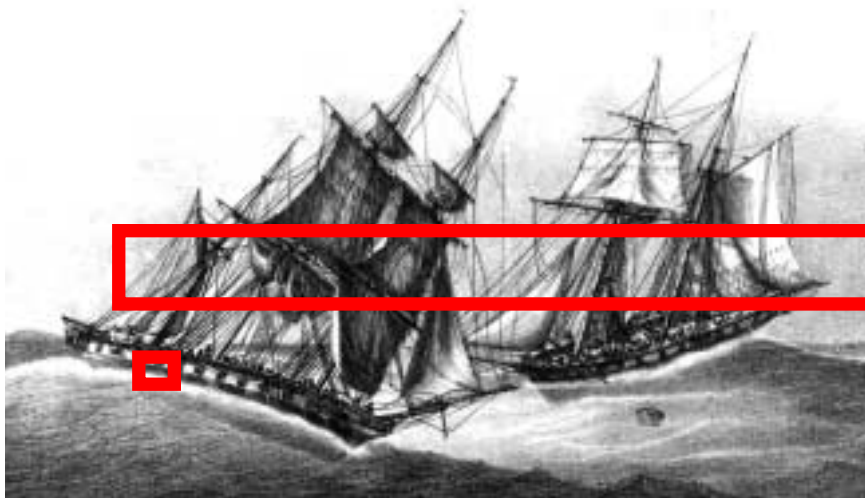


Soumis à une houle de grande longueur d'onde, deux navires proches oscillent en phase (*en haut*). Une partie de l'énergie de la houle est absorbée puis réémise de façon isotrope sous forme de vagues. Entre les bateaux, les interférences entre les vagues sont destructives. Comme les forces de réaction des vagues émises vers l'extérieur ne sont pas compensées par les forces dues aux vagues émises entre les navires, ceux-ci s'attirent (*en bas*).

tives, et les ondes secondaires émises s'annihilent (comme si deux ondes en opposition de phase étaient émises du même endroit). Il en résulte une diminution de l'énergie des vagues entre les navires, analogue à la diminution de la pression de radiation entre les atomes. Comme les navires émettent des ondes secondaires vers l'extérieur, ils se rapprochent en raison de la loi de l'action et de la réaction.

Lorsque l'on calcule l'attraction exercée entre des navires de 700 tonnes que la houle fait tanguer de huit degrés, on trouve une force de 2 000 newtons (la force nécessaire pour soulever un poids de 200 kilogrammes). Cette force est suffisante pour que les navires se rapprochent, et suffisamment faible pour que les rameurs la compensent.

Pour un bateau passant près d'un mur, comme précédemment, le navire oscille et émet des ondes secondaires dans toutes les directions. Cette fois, l'onde réfléchie par le mur interfère de manière constructive avec celle provenant du navire. La «pression de radiation» entre le navire et le mur est donc supérieure à celle au large : le bateau est repoussé du mur. Cette répulsion rend-elle le passage du cap Horn, zone de forte houle avec des murs de rochers, moins dangereux ? On peut en douter. □



À la suite d'un très mauvais temps, il arrive quelquefois que le vent se calme brusquement, mais il n'en est pas de même de la mer, qui reste houleuse longtemps encore. De grands bateaux assez proches s'attirent en vertu d'une force due à leur comportement oscillant.

Création de liens

Chez l'agneau, les premières tétées activent les mécanismes de reconnaissance de la mère.

La recherche de la mamelle est le premier acte d'un petit mammifère, lequel obtient ainsi l'apport énergétique, protéique et hydrique nécessaire à sa croissance. Outre son intérêt nutritionnel, la tétée assure une immunisation passive grâce aux immunoglobulines contenues dans le colostrum, le liquide sécrété par les glandes mammaires juste après la naissance du jeune ; le colostrum transfère également des souches bactériennes non pathogènes qui colonisent le tube digestif, et diverses hormones ; la tétée module l'activité cardiaque et elle agit aussi sur le comportement, puisqu'elle a un effet sédatif. Enfin, nous avons montré que les premières tétées servent au nouveau-né à apprendre à reconnaître sa mère.

Au cours des 12 à 24 heures qui suivent sa naissance, un agneau établit un lien préférentiel avec sa mère ; entre deux brebis ayant mis bas, l'agneau recherche la proximité de sa mère et évite celle de la brebis étrangère. Une prise de colostrum régulière est indispensable à l'établissement de cette préférence envers la mère. Quand on entrave les tétées par la pose d'un cache-mamelle sur la brebis, pendant six heures, l'agneau âgé de 24 heures évite sa mère.

Les premières heures après la naissance sont particulièrement importantes pour l'apprentissage, et les conséquences comportementales de la période d'inaccessibilité à la mamelle diffèrent selon le moment de l'entrave à la tétée. Quand l'entrave intervient pendant les six premières heures postnatales, les agneaux ne développent aucun lien avec leur mère, même s'ils ont accès à la mamelle entre 6 et 24 heures : les agneaux n'apprennent pas les caractéristiques (l'aspect ou le hâlement) de la mère.

Un agneau autorisé à téter sa mère dès la naissance, mais pas entre 12 et 18 heures, reste, lors des tests réalisés à l'âge de 24 heures, à proximité d'une brebis étrangère qui l'accepterait à la mamelle. Ainsi, l'empêchement de la tétée perturbe à la fois l'éta-

blissement de la reconnaissance maternelle et l'évolution des liens qui fondent l'attachement agneau-brebis.

Une tétée se caractérise par une phase orale, la succion, et par une phase gastro-intestinale, l'ingestion de colostrum. La seconde phase est plus importante que la première dans l'établissement des liens entre la mère et le jeune : des tétées non nutritives, au cours des six premières heures postnatales, ne créent aucun lien avec la mère ; les effets sont identiques à ceux d'une absence totale de tétée. L'agneau âgé de 24 heures ne distinguant pas sa mère d'une brebis étrangère. Les nouveau-nés se désintéressent d'un pis non nourricier, car la succion n'est pas accompagnée de la phase gastro-intestinale.

Au contraire, quand, au cours des six premières heures postnatales, l'agneau ne tète pas, mais reçoit du colostrum dans l'estomac par une intubation, il reconnaît sa mère comme si la tétée avait été complète. L'ingestion d'eau ou d'une solution de lactose ne permet pas l'établissement du lien avec la mère ; c'est bien la composition du colostrum qui l'autorise.

On sait qu'après un repas de colostrum ou de lait, certaines hormones gastro-intestinales augmentent chez le nouveau-né. L'une d'entre elles, la cholécystokinine, joue un rôle important dans

les mécanismes d'apprentissage et de mémorisation. Chez l'agneau dont la tétée n'est pas perturbée, la concentration plasmatique de cholécystokinine augmente rapidement ; elle quintuple en quelques heures, se stabilise, puis, au bout de 24 heures, commence à diminuer, comme nous l'avons montré avec Kerstin Uvnäs-Moberg et ses collègues de l'Institut Karolinska de Stockholm.

Inversement, la libération de cholécystokinine est retardée chez l'agneau qui n'a pas accès à la mamelle dans les six heures qui suivent la naissance. Quel est le mécanisme qui met en jeu la cholécystokinine endogène dans l'attachement à la mère chez l'agneau nouveau-né et dans l'apprentissage des caractéristiques maternelles ?

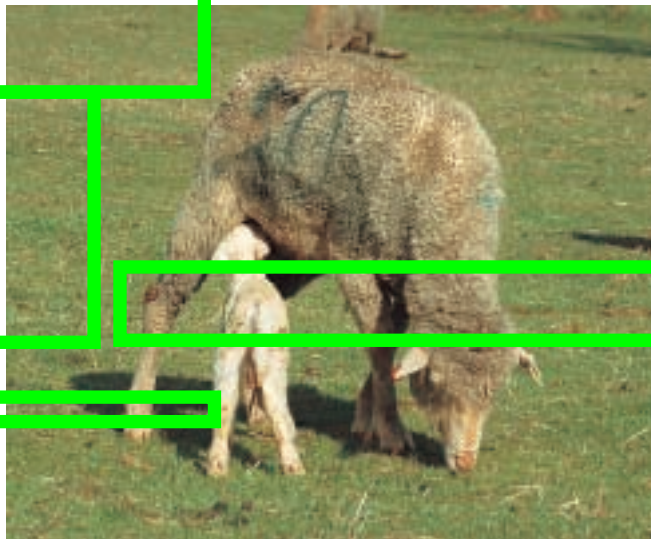
TÉTÉES ET APPRENTISSAGE

Cette hormone interagit avec deux types de récepteurs, nommés CCK-A et CCK-B. Nous avons étudié son rôle en utilisant des antagonistes, c'est-à-dire des substances qui l'empêchent d'agir sur ses récepteurs. L'injection, à la naissance, d'un tel antagoniste des récepteurs CCK-A empêche l'établissement d'une reconnaissance maternelle : la cholécystokinine participe aux mécanismes mnésiques en stimulant les récepteurs CCK-A. En revanche, l'injection d'un antagoniste des récepteurs CCK-B de la cholécystokinine n'a pas d'effet inhibiteur.

Comment la cholécystokinine participe-t-elle à l'établissement d'un lien avec la mère ? On ignore si la cholécystokinine, libérée dans le tube digestif, traverse la barrière hémato-encéphalique du nouveau-né. Si elle ne pénètre pas dans le cerveau, du moins agit-elle sur le système nerveux central par l'intermédiaire de ses récepteurs CCK-A localisés sur le tube digestif, sur le nerf vague et sur quelques structures situées à la base du cerveau. Nous pensons que la cholécystokinine libérée au cours des premières tétées se fixe sur les récepteurs A du nerf vague, et que le signal transmis au cerveau stimule les structures participant aux mécanismes

d'apprentissage et de mémorisation des caractéristiques maternelles. Toutefois, une question reste ouverte : pourquoi la cholécystokinine doit-elle agir dans les heures qui suivent la naissance pour que ce lien s'établisse ?

RAYMOND NOWAK
CNRS URA 1291, INRA, Nouzilly



L'agneau apprend à reconnaître sa mère dès les premières tétées, parce que le colostrum déclenche la libération d'une hormone qui facilite les mécanismes d'apprentissage et de mémorisation.

Trafic cellulaire

L'annexine II participe à la fusion des membranes cellulaires et au transfert des molécules.

Les cellules synthétisent, stockent et libèrent des molécules, qui assurent la communication intercellulaire et le bon fonctionnement de l'organisme. Synthétisées par l'appareil de Golgi, les molécules sont prises en charge par des vésicules spécialisées, délimitées par une membrane, avant d'être libérées dans l'espace extracellulaire. Au cours d'un tel mécanisme d'exocytose, la membrane de la vésicule fusionne avec celle de la cellule : les molécules contenues dans la vésicule s'échappent hors de la cellule par un trou d'exocytose et atteignent leur cible. Comment deux membranes peuvent-elles se reconnaître et fusionner ? Ce mécanisme fait intervenir plusieurs molécules, mais nous avons montré que l'annexine II tient un des premiers rôles dans l'exocytose.

Les fusions membranaires ne sont pas spécifiques du phénomène d'exocytose : elles ont également lieu au sein des cellules, où des vésicules-navettes assurent le passage de molécules d'un compartiment intracellulaire à un autre. Dans le cas de l'exocytose, la fusion est déclenchée par un stimulus extracellulaire, électrique ou chimique. Il ne s'écoule guère plus de quelques millisecondes entre le stimulus et la formation d'un trou d'exocytose dans une membrane neuronale ou plusieurs secondes dans le cas des cellules chromaffines, qui sécrètent les hormones du stress.

James Rothman, du Centre de recherches Sloan-Kettering, a émis l'hypothèse que des protéines solubles du cytoplasme s'associeraient pour former un complexe macromoléculaire qui reconnaîtrait les protéines cibles de la membrane plasmique et celles de la membrane vésiculaire. En fait, cette interaction n'est qu'une des étapes du mécanisme. Conduite sur le site d'exocytose, la vésicule de stockage interagit avec la membrane plasmique, à la suite d'une série de réactions d'association et de dissociation : il semblerait que, au cours d'une première étape réversible, la vésicule de stockage

serait positionnée sur le site d'exocytose de la membrane plasmique par le complexe macromoléculaire et que, au cours d'une seconde étape irréversible, les deux membranes fusionneraient.

LES ANNEXINES

Les annexines sont synthétisées par de nombreuses cellules. Elles semblent participer aux mécanismes inflammatoires, à l'organisation du cytosquelette (l'« armature » des cellules) et à celle des membranes cellulaires. En présence de calcium, toutes les molécules de la famille des annexines se lient aux membranes biologiques.

Nous avons montré qu'un des membres de cette famille, l'annexine II, est indispensable à l'exocytose. Pour ce faire, nous avons étudié les cellules chromaffines des glandes surrénales ; certaines de ces cellules synthétisent l'adrénaline, le neuromédiateur des situations de stress aigu et de peur immédiate, les autres l'adrénaline, le neuromédiateur des situations de stress chronique. Quand ces cellules sont perméabilisées par un laser qui perce de petits trous dans la membrane, elles perdent leur capacité de sécrétion, parce que les molé-

cules solubles du cytoplasme diffusent hors des cellules par les trous de perméabilisation. Quand on ajoute de l'annexine II dans le milieu extracellulaire, celle-ci diffuse vers le milieu intracellulaire, et les cellules récupèrent partiellement leur capacité d'exocytose.

Nous avons alors cherché où se localise l'annexine II lors de l'exocytose des catécholamines par les cellules chromaffines. La molécule, présente sous forme de monomère dans le cytoplasme des cellules au repos, se déplace vers la périphérie cellulaire lors de la stimulation des cellules chromaffines (de la nicotine introduite dans le milieu de culture active des cellules qui portent des récepteurs nicotiques). La translocation du monomère s'effectue au cours des quelques secondes qui suivent la stimulation, et elle précède juste l'exocytose des catécholamines.

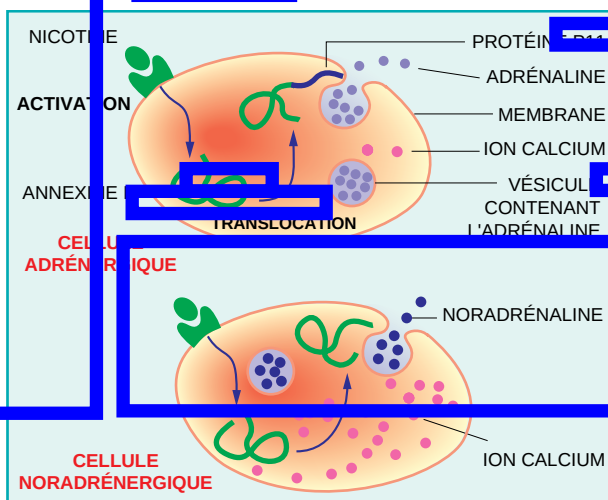
Afin de préciser le rôle de l'annexine II dans le mécanisme de libération, nous avons synthétisé un peptide de 12 acides aminés analogue à un segment de la molécule. Nous l'avons injecté dans une cellule chromaffine, juste avant de la stimuler : ce peptide inhibe la translocation de l'annexine et bloque toute libération de catécholamine. Bien que ce peptide n'assure pas directement la fusion des membranes, c'est lui qui permet à l'annexine II d'accomplir cette fonction.

Il existe des sites de liaison sur le cytosquelette et sur la membrane plasmique, où elle se fixe à une petite protéine nommée p11, qui appartient à une famille nombreuse de protéines abondantes dans le cerveau, mais dont on ignore encore les fonctions. Nous

avons montré que, contrairement aux cellules adrénergiques, les cellules noradrénergiques sont dépourvues de protéine p11. En revanche, pour libérer leur neuromédiateur, les cellules noradrénergiques doivent être placées dans des solutions où l'ion calcium est dix fois plus concentré que dans le cas des cellules adrénergiques. On ignore encore pourquoi l'abondance d'ions calcium pallie l'absence de la protéine p11.

Le phénomène d'exocytose nécessite une machinerie multimoléculaire et des mécanismes de contrôle élaborés. Chez les mammifères, on dénombre quelque 200 types cellulaires différents. Une question préoccupe les biologistes : les voies de sécrétion y sont-elles commandées par des molécules identiques ?

DOMINIQUE AUNIS
Unité INSERM U 338, Strasbourg



Les cellules chromaffines adrénergiques et noradrénergiques libèrent leur neuromédiateur (l'adrénaline et la noradrénaline) par exocytose. Dans le premier cas (en haut), la nicotine active l'annexine II, qui migre et se lie à la protéine p11 ; la vésicule libère alors l'adrénaline. Dans le second cas (en bas), la cellule est dépourvue de protéine p11, et l'exocytose nécessite une concentration élevée en ions calcium.

Les derniers hiéroglyphes

Les rongorongo, hiéroglyphes de l'île de Pâques, témoignent d'une écriture.

Depuis leur découverte, au milieu du XIX^e siècle, les hiéroglyphes de l'île de Pâques, les *rongorongo*, résistaient au décryptage. Aussi, de nombreux linguistes pensaient qu'il ne s'agissait pas d'une écriture, mais d'un support mnémotechnique pour psalmodier des chants. Par des approches différentes, deux linguistes, Konstantin Podzniakov, à Saint-Petersbourg, et Steven Fisher, à Auckland, ont montré que les signes gravés sur les 26 tablettes de bois retrouvées représentent une véritable écriture.

Ces tablettes sont difficiles à dater. Entre la découverte de l'île en 1722 et l'apparition de la première tablette, plus de 100 ans après, aucun des explorateurs et des visiteurs de l'île ne mentionne de tablettes ou d'écriture. Selon la tradition orale, les tablettes auraient été apportées par les premiers Polynésiens qui débarquèrent sur l'île vers le V^e siècle de notre ère. Elles étaient gardées dans des lieux secrets, inaccessibles aux étrangers. Lorsque, en 1871, les explorateurs s'intéressent enfin aux tablettes, presque toute la population de l'île (quelques milliers d'habitants)

avait été déportée en esclavage par les pirates chiliens pour travailler dans des mines du Pérou. Les quelques dizaines de Pascuans qui en revinrent ne savaient ni lire ni graver les caractères.

Pour déchiffrer les hiéroglyphes, S. Fisher, a utilisé un bâton conservé à Santiago qui avait appartenu à un dignitaire de l'île. Cet objet, couvert de signes, contient 97 traits verticaux délimitant, par couple, une série de signes. Le premier signe de chaque série délimitée par deux traits verticaux porte un appendice de forme phallique, qui se répète ensuite tous les trois signes : les signes du bâton de Santiago sont regroupés en triades, retrouvées ensuite sur deux autres tablettes, dont la petite tablette de Santiago (voir la figure). Les «phrases» situées entre deux traits, sont toutes des répétitions de triades de la forme X'YZ, où X' désigne le signe associé à l'appendice phallique, Y et Z les signes suivant immédiatement X'.

S'inspirant d'un chant pascuan recueilli en 1886, S. Fisher a traduit une triade du bâton de Santiago formée par un motif d'oiseau portant le signe phallique, suivi d'un signe de poisson, puis

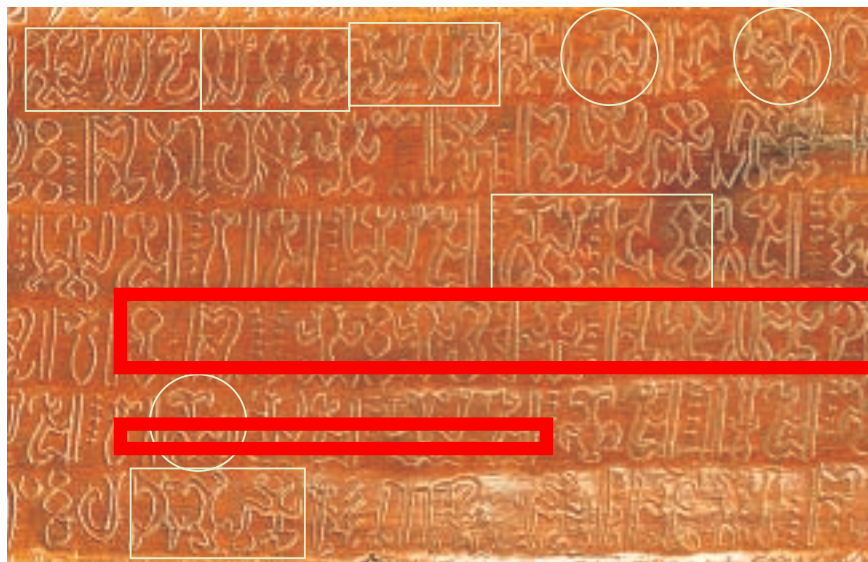
d'un soleil par la formule : «Tous les oiseaux (X) se sont accouplés (Y) avec les poissons (Z) pour engendrer le Soleil (Z)». Les tablettes sur lesquelles ce système de triades peut être repéré sont vraisemblablement des chants célébrant la création du monde, fréquents dans les cultures polynésiennes. Les *rongorongo* seraient ainsi une écriture mixte : une partie des signes représente des mots en rapport avec des choses ou des êtres vivants (signes logographiques), une autre décrit un acte sans recours au langage (par exemple l'appendice phallique traduit l'acte de s'accoupler).

L'ANALYSE STATISTIQUE DES TABLETTES

Pour identifier les caractères *rongorongo* par une méthode statistique, K. Podzniakov a établi son propre catalogue des signes, dénombrant une centaine de signes de base. Sur un corpus d'environ 14 500 signes, il constate que tous les textes *rongorongo*, à deux exceptions près, sont constitués d'une soixantaine de mini-textes qui contiennent chacun entre 10 et 50 signes, lesquels se retrouvent sur de nombreuses tablettes. Le nombre de signes différents placés au début et à la fin de ces mini-textes est faible : la répartition de ce type de signes indique que ces mini-textes seraient des phrases séparées par des caractères. Les textes *rongorongo* constitués d'une dizaine de mini-textes qui se suivent presque sans intervalle pourraient être non seulement des chants de création, comme le suggère S. Fischer, mais aussi des formules magiques ou des poèmes.

Le linguiste russe montre aussi que la fréquence des signes de base des textes *rongorongo* est très proche d'une tablette à l'autre, indice d'une véritable écriture. D'autre part, il établit que les fréquences des signes dans les textes *rongorongo* et les fréquences des syllabes dans la langue de l'île de Pâques d'aujourd'hui (le rapanui) sont très proches. Cela montre, d'une part, que la base linguistique de cette écriture est bien polynésienne et, d'autre part, que cette écriture possède des signes syllabiques.

L'analyse statistique indique la présence de signes logographiques et de déterminatifs représentés par des signes autonomes ou des associations de signes. Par exemple, lorsque l'on rencontre un même signe trois fois dans le corpus de 14 500 signes, le signe est plus vraisemblablement un signe logographique qu'une syllabe. En revanche, un signe dont la fréquence dépasse celle de toutes les syllabes (par exemple, l'appendice phallique) est probablement un signe déterminatif. □



Sur la petite tablette de Santiago, on retrouve des triades (rectangles) et des signes logographiques, tel celui représentant un oiseau (cercles). D'une ligne à l'autre, l'écriture est inversée : il faut sans cesse tourner la tablette pour la lire.

Expérience de cosmologie

Des tourbillons dans de l'hélium superfluide modélisent les cordes cosmiques formées dans les premiers instants de l'Univers.

Quelques instants après le Big Bang, l'Univers primordial, en se refroidissant, subit des transitions de phases. Celles-ci engendrent des défauts topologiques, telles les cordes cosmiques, filaments massifs qui seraient les germes des galaxies. Lorsque l'on abaisse la température de l'hélium 3 à quelques millièmes de degré au-dessus du zéro absolu, des filaments tourbillonnaires, analogues aux cordes cosmiques, peuvent apparaître dans l'hélium superfluide. En mesurant la densité des filaments tourbillonnaires créés dans de l'hélium superfluide, des chercheurs du Centre de recherche sur les très basses températures de Grenoble et du Laboratoire des basses températures d'Helsinki ont simulé la formation des cordes cosmiques.

Les transitions de phase engendrent des brisures de symétrie, transformant des états symétriques en des états asymétriques. Un cristal est moins symé-

trique qu'un liquide. Lors de la transition de phase qu'est la congélation de l'eau, des défauts topologiques apparaissent dans la glace (par exemple des paillettes) quand plusieurs zones cristallisent selon des directions différentes.

Personne ne sait combien de transitions de phase a subies l'Univers, mais toutes ces transitions se sont produites lors de la première seconde après le Big Bang. Elles ont pu engendrer des défauts où de l'énergie d'un Univers symétrique a été piégée. Des cordes cosmiques massives, où sont concentrées de grandes quantités d'énergie, se sont alors formées. Leur masse aurait entraîné l'effondrement gravitationnel de la matière environnante, constituant ainsi les galaxies.

Cette hypothèse séduit T. Kibble, du Collège impérial de science et technologie de Londres, qui propose des scénarios de formation des cordes cosmiques au cours de transitions de phase,

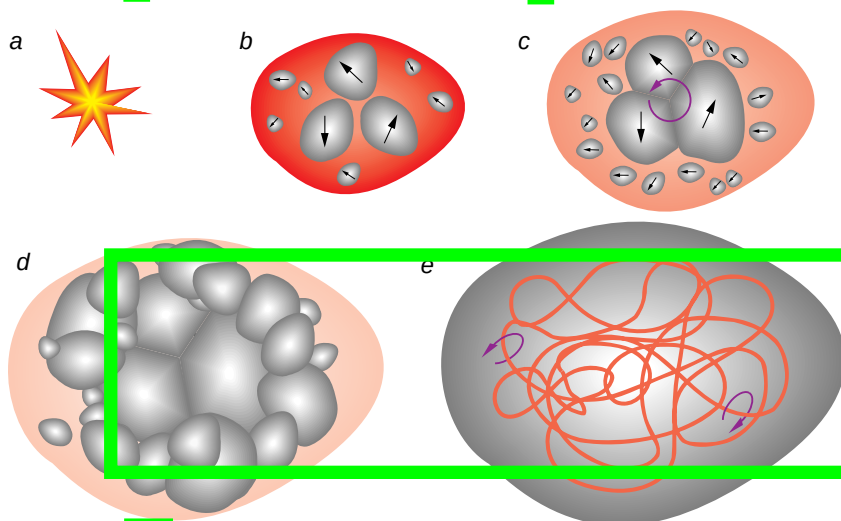
et estime la densité de ces cordes lors de leur formation. Même si la densité des cordes cosmiques est celle prédite par T. Kibble, leur détection est hors de portée des instruments actuels. Aussi, pour confronter cette estimation à l'expérience, on procède par analogie : la physique qui gouverne les transitions de phase est la même, quelle que soit la température. En mesurant la densité des filaments tourbillonnaires formés au cours d'une transition de phase entre l'hélium liquide et l'hélium superfluide, on pourrait déterminer la densité des cordes cosmiques formées aux premiers instants de l'Univers, lorsque la température était de 10^{28} kelvins.

L'UNIVERS DANS UN TUBE À ESSAI

L'équipe grenobloise, en collaboration avec des chercheurs de l'Université de Lancaster, a refroidi une petite quantité d'hélium 3 à la température de 160 microkelvins. Ils bombardent alors l'hélium superfluide avec des neutrons. Chaque neutron sert à chauffer brièvement une petite quantité d'hélium au-dessus de sa température critique : l'hélium est alors sous la forme de bulles de liquide normal.

En se dilatant, ces bulles chaudes refroidissent sous la température critique : elles redeviennent alors superfluides. Cette transition de phase n'est pas homogène, car des régions différentes du fluide refroidissent indépendamment. Comme, contrairement à un liquide normal, un superfluide est un liquide orienté (tel un cristal liquide), les différentes régions superfluides qui se forment sont orientées différemment. Le superfluide final ne peut alors être uniforme, et des défauts topologiques apparaissent sous la forme d'un enchevêtrement de tourbillons. L'énergie déposée par les neutrons étant bien connue, l'énergie qui s'échappe sous forme de chaleur est la quantité d'énergie nécessaire à la formation des tourbillons. Dans le groupe d'Helsinki, l'expérience est analogue, et une procédure permet de compter les tourbillons créés.

La densité spatiale des tourbillons déduite de ces expériences confirme la prédiction de T. Kibble sur la densité initiale des cordes cosmiques. Cependant, la confirmation expérimentale du mécanisme qui crée des défauts topologiques ne suffit pas à montrer que les cordes cosmiques existent. Pour cela, il faudra les détecter dans l'Univers, par exemple en observant des discontinuités linéaires dans le rayonnement du fond cosmologique, ou en observant les variations de la période de pulsars millisecondes dues au rayonnement gravitationnel émis par des cordes cosmiques. □



Une réaction nucléaire entre un neutron et un noyau d'hélium superfluide crée une région chaude de fluide normal (a). Le refroidissement n'est pas homogène : des bulles de superfluide apparaissent quand la température locale est inférieure à 2,7 millikelvins. Comme les bulles de superfluide se forment indépendamment, tels des cristaux de glace, leurs orientations (leurs arrangements internes) sont différentes, ce qui est représenté par les flèches noires (b). Lorsque les trois régions centrales se touchent (c), il se forme un tourbillon (flèche violette). Un réseau de tourbillons est créé le long des frontières entre les bulles de plus en plus nombreuses (d). Finalement, toute la région est superfluide, et il ne demeure qu'un enchevêtrement de tourbillons (e).

La contraception dans le monde

L'utilisation des méthodes modernes a progressé depuis 30 ans.

Depuis environ 30 ans, la fertilité mondiale a considérablement décroché, particulièrement dans les pays en développement. Entre 1960 et 1965, les femmes de ces pays avaient, en moyenne, six enfants. Au début des années 1990, ce chiffre a baissé jusqu'à 3,1. Dans les pays d'Extrême-Orient, sur la même période, le nombre de naissances par femme a chuté de 65 pour cent. Il est aujourd'hui inférieur au seuil de renouvellement de la population (2,1 enfant par femme). Ailleurs en Asie, le nombre de naissances par femme a diminué d'un tiers, tandis qu'il a presque été divisé par deux en Amérique latine. En Afrique, en revanche, la diminution n'a été que de 10 pour cent. Dans les pays développés, le nombre de naissances par femme a baissé de 40 pour cent et y est presque partout inférieur au seuil de renouvellement de la population.

Les méthodes modernes de contraception ont fortement contribué à cette baisse de la fécondité. La moitié des femmes en âge de procréer, mariées ou vivant en union libre, utilisent la contraception. Les méthodes modernes sont

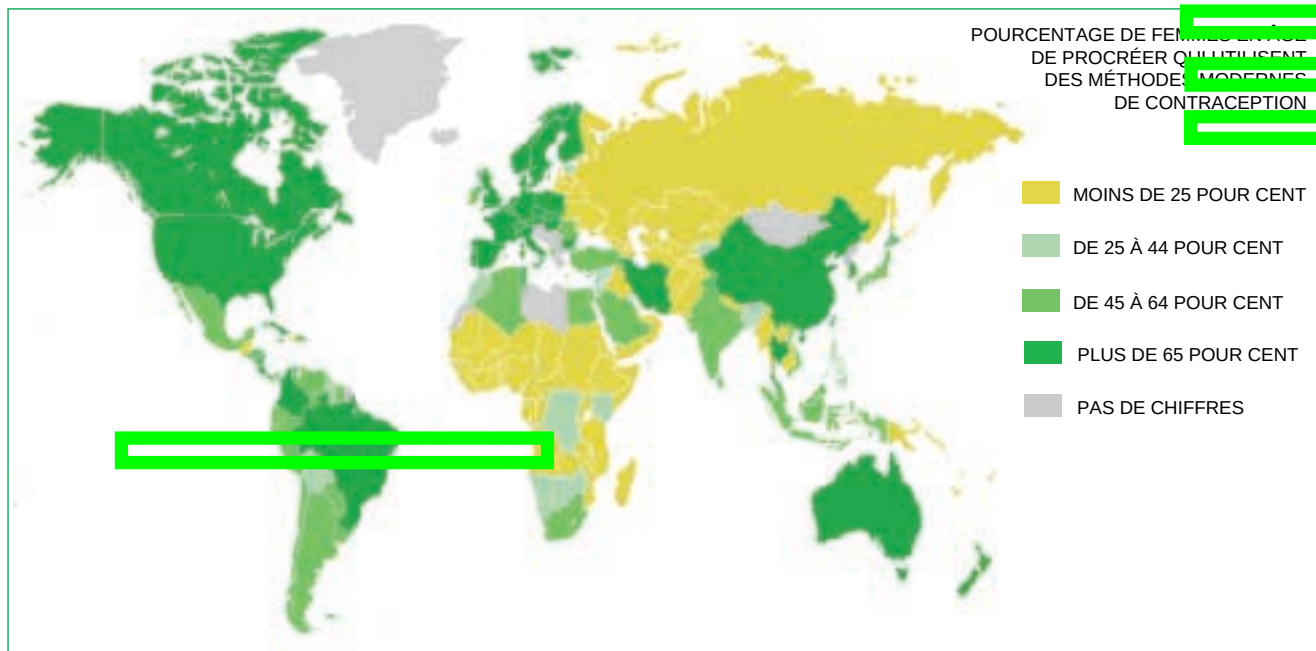
variées : stérilisation féminine, stérilisation masculine, implants hormonaux, produits injectables, stérilet, pilule anticonceptionnelle, préservatif, spermicides, diaphragme (la moins efficace). Les préservatifs (masculins et féminins) sont les seules méthodes disponibles qui protègent aussi des maladies sexuellement transmissibles.

Le pourcentage de femmes qui utilisent des moyens modernes de contraception est aujourd'hui de 54 en Asie (39 pour cent si l'on ne compte pas la Chine), 53 en Amérique latine, 30 à 50 dans les pays musulmans du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord, 48 à la pointe Sud de l'Afrique, mais moins de 10 pour cent dans la vaste partie centrale de ce continent. Dans les pays développés d'Amérique du Nord et d'Europe de l'Ouest, les méthodes modernes sont utilisées par 65 à 75 pour cent des femmes. Dans les pays de l'ancienne Union soviétique, les produits contraceptifs manquent, ce qui restreint leur usage à moins de 20 pour cent des femmes. L'avortement est devenu un moyen «normal» de limitation des naissances.

L'accroissement de l'utilisation de contraceptifs et le déclin de la fécondité dans les pays en développement sont étroitement liés à la scolarisation des filles. L'alphabétisation facilite l'accès à des informations fiables sur la contraception, tandis que les exigences des études, particulièrement au niveau universitaire, retardent l'âge du mariage et du premier enfant. L'Afrique subsaharienne, la région dont la fécondité est la plus grande, a le plus faible pourcentage de scolarisation féminine.

Quelques pays en développement, tels la Chine et Cuba, sont déjà au-dessous du seuil de renouvellement de la population de 2,1 enfants par femme, en grande partie grâce aux méthodes modernes de contraception. Des pays tels que le Brésil, l'Indonésie, le Vietnam, l'Afrique du Sud, la Turquie, l'Égypte et l'Inde devraient atteindre ce chiffre dans dix ans environ. Au contraire, des pays tels que le Pakistan ou le Nigeria n'atteindront pas ce seuil de renouvellement avant plusieurs décennies. Peu de femmes de ces pays à forte fécondité utilisent la contraception moderne.

Les méthodes traditionnelles de contraception, méthode des températures, coït interrompu, allaitement prolongé (qui supprimerait l'ovulation) ne sont pas comptabilisées sur la carte. Dans le monde, sept pour cent des femmes mariées ou vivant en union libre, et en âge de procréer, utilisent ces méthodes, beaucoup moins fiables que les méthodes modernes. Elles sont particulièrement répandues dans plusieurs pays. En Turquie, par exemple, le coït interrompu a les faveurs du plus grand



Voir plus petit

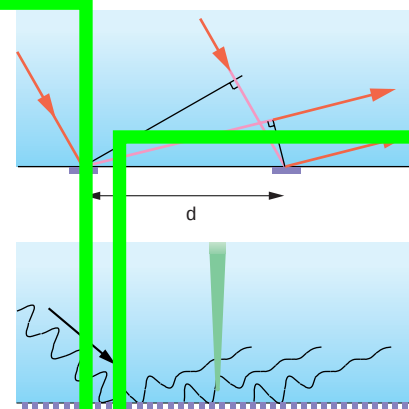
La résolution du microscope optique est améliorée.

La longueur d'onde de la lumière avec laquelle on éclaire un objet limite la finesse des détails que l'on observe. En lumière visible, la résolution d'un très bon microscope, pour un objet en contact avec l'air, ne dépasse pas 0,30 micromètre (ou millionième de mètre). Depuis une dizaine d'années, les opticiens ont franchi cette limite grâce à la «microscopie en champ proche» : ils sondent le champ électromagnétique au voisinage des surfaces à l'aide, par exemple, d'une petite ouverture à l'extrémité d'une fibre optique taillée en pointe et métallisée. La variante technique que nous avons mise au point avec Renaud Bachelot, Ahmed Larech et Philipp Gleyzes, permet d'observer des détails de 0,015 micromètre, indépendamment de la longueur d'onde lumineuse.

Lorsque l'on examine un objet à structure périodique (rideau, surface d'un disque compact, réseau), on observe des rayons lumineux diffractés dans d'autres directions que celle de la lumière transmise ou réfléchi. Plus la période de la structure est petite et plus l'angle entre la direction d'éclairage et la direction des images diffractées est grande. Pour des périodes un peu supérieures à la demi-longueur

d'onde de la lumière rasante utilisée pour éclairer l'objet, les rayons diffractés rasent la surface observée. Pour des périodes inférieures, ils disparaissent. Le rayonnement électromagnétique correspondant subsiste toutefois au voisinage de la surface, sous forme d'ondes évanescentes (elles ne se propagent pas). Si l'on veut des informations sur des détails plus petits que la demi-longueur d'onde, il faut donc sonder le champ électromagnétique tout près de la surface de l'échantillon (d'où le nom de «microscopie en champ proche» pour cette technique).

C'est ce que nous faisons avec une pointe métallique très fine qui oscille près de la surface, avec une amplitude de quelques centièmes de micromètre. L'extrémité de cette pointe, dont le rayon de courbure est de 0,015 micromètre, se comporte comme une particule conductrice plongée dans un champ électromagnétique : elle émet un rayonnement dont les variations spatiales dépendent de la structure du champ lui-même. Ces ondes électromagnétiques engendrées par l'oscillation de la pointe constituent le signal qui est collecté par un objectif de microscope et envoyé sur un détecteur. Il est ensuite traité, afin de quantifier les



Une image de diffraction d'une structure de période $\lambda/2$ se forme dans les directions pour lesquelles la différence de marche (différence des distances en rose) entre deux réflexions voisines est un multiple de la longueur d'onde λ (en haut). Si d est inférieure à la moitié de λ , il y a plus d'interférences. Le rayonnement n'est pas réfléchi, mais crée, près de la surface, des ondes évanescentes (en bas). Une fine pointe vibrante (en vert) détecte les variations spatiales de ce champ électromagnétique «proche».

images et de mettre en évidence les coefficients de réflexion locaux.

En opérant par réflexion, nous avons fait l'image d'un grand nombre de structures de la taille d'un centième de micromètre environ, qui présentent des contrastes optiques (des zones adjacentes ont des coefficients de réflexion différents) et des contrastes topographiques variés (structures en creux ou en bosse, structures en marches d'escalier sur des surfaces de monocristaux). La résolution de ce microscope ne dépend que de la taille de la pointe.

À la longueur d'onde rouge de 0,67 micromètre, nous avons atteint une résolution de 0,015 micromètre, voisine du rayon de courbure de nos pointes et bien inférieure à la limite de la demi-longueur d'onde. Nous avons ensuite observé des films d'or avec la lumière rasante d'un laser à gaz carbonique, à la longueur d'onde de 10,6 micromètres. Les plus petits détails sont toujours du même ordre de grandeur (0,015 micromètre) que la longueur d'onde.

Cette résolution étend le champ d'application de la microscopie optique : vérification des composants micro- et opto-électronique, l'observation des propriétés locales d'édifices moléculaires ou d'agrégats. Le rayonnement infrarouge, qui interagit avec les charges électriques de surface, permettra de contrôler les implantations ioniques et les modifications locales dans les composants semi-conducteurs et supraconducteurs, dont les tailles ne cessent de se réduire.

Claude-Albert BOCCARA, ESPCI, CNRS

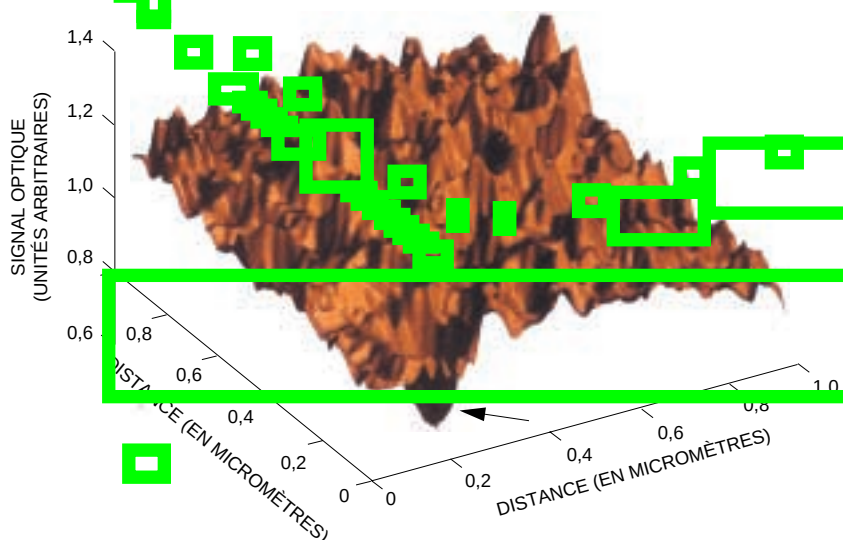


Image en champ proche d'un film mince d'or, à la longueur d'onde de 10,6 micromètres. Les détails (fluctuations de la réflectivité dues à des variations locales des propriétés électroniques) sont 600 fois plus petits que la longueur d'onde utilisée. La chute importante du signal (flèche) est due à la présence d'une particule organique, très absorbante dans l'infrarouge.

L'invasion des moules zébrées

Elles nettoient le lac Érié, mais elles feraient disparaître les poissons

L'invasion des Grands Lacs américains par la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*), mollusque originaire de la mer Noire et de la Caspienne, a fait craindre le pire pour l'équilibre de l'écosystème. Huit ans après l'arrivée de l'espèce, celle-ci semble au contraire participer à la dépollution des eaux : elle favoriserait même la réapparition d'espèces végétales menacées. Des écologistes l'accusent tout fois d'être la cause de la disparition des poissons.

En 1988, lorsque les premières moules zébrées sont apparues dans le lac Érié, sur la frontière entre les États-Unis et le Canada, les prédictions alarmistes se sont succédées : ces coquillages robustes et prolifiques déclencheraient un désastre écologique et financier. Ils détruiraient la chaîne alimentaire du lac, boucheraient les prises d'eau des usines et des barrages hydro-électriques et bloqueraient les hélices des bateaux.

Ces prédictions n'ont pas survécu à l'épreuve des faits. Le chlore et d'autres produits chimiques ont repoussé les

maudis mollusques loin des prises d'eau, et des coûts inférieurs à ceux que ce que l'on redoutait. En outre, la présence des moules zébrées aurait amélioré la situation écologique du lac. Ces coquillages sont des filtres prodigieux qui purifient l'eau de quantités surprenantes de polluants et qui les accumulent dans leurs graisses. Ils ont aussi dévoré tant d'algues, leur aliment de base, que de grandes étendues du lac sont aujourd'hui plus claires.

Des plantes aquatiques auparavant rares, qui menaient un combat perdu d'avance contre les algues nourries par la pollution, repartent de plus belle. L'herbe à anguilles, une plante endémique qui a

échappé de peu, en 1988, à l'inscription sur la liste des espèces menacées, a repoussé en d'immenses forêts sous-marines qui se balancent au fond du lac. Elles s'emmêlent même dans les hélices des bateaux de plaisance près de Put-in-Bay, une ville touristique située sur une île de l'Ouest du lac.

L'invasion des moules zébrées aurait-elle été un bienfait ? Elles ont

absorbé tant de produits polluants que la moitié de ceux contenus dans le lac Saint-Clair, un plan d'eau de 1 200 kilomètres carrés qui sépare le lac Érié du lac Hudson, sont maintenant accumulés dans leurs tissus. Dans de nombreux secteurs du lac Érié, la clarté de l'eau a sextuplé. Malgré ces relatives améliorations dans le plus pollué des Grands Lacs, les écologistes restent inquiets pour l'avenir.

LE STOCKAGE DES POLLUANTS

Les moules zébrées sont des filtres vivants. Chaque adulte aspire jusqu'à un litre et demi d'eau par jour, retenant les algues et les autres nutriments et, incidentellement, le pyralène, la dioxine, les hydrocarbures aromatiques et tous les autres polluants qui se trouvent dans l'eau ou dans les sédiments. La population actuelle de moules zébrées filtre toute l'eau du bassin Ouest du lac en cinq ou six jours. Les produits toxiques s'accumulent dans les tissus adipeux des animaux, qui comptent pour 15 pour cent de leur poids.

Malheureusement, les polluants ainsi éliminés des eaux ne restent pas indéfiniment stockés dans les moules. Les corps et les déjections de celles-ci, qui sont aussi pollués, sont des maillons importants de la chaîne alimentaire qui aboutit aux consommateurs de poisson. Le dépôt des polluants dans les sédiments serait moins dangereux.

Quelles quantités de polluants arrivent-elles sur les tables (et dans les estomacs) des consommateurs ? Plusieurs années seront nécessaires pour savoir comment la répartition des polluants a été modifiée dans le lac depuis l'arrivée des moules zébrées.

Le nettoyage des algues par les moules zébrées aurait aussi des conséquences dévastatrices, car ces algues sont le premier élément de la chaîne alimentaire de tous les êtres vivants du lac. Leur diminution entraînerait ainsi une diminution du zooplancton, qui s'en nourrit. Les poissons, qui consomment du zooplancton à plusieurs étapes de leur développement, manquent donc de nourriture s'ils ne peuvent pas dévorer des moules zébrées.

Avant l'invasion, le lac Érié, de loin le plus pêché des Grands Lacs, alimentait des pêcheries d'un chiffre d'affaires total de trois milliards de francs par an. Dans les années 1990, les prises ont diminué : le chiffre d'affaires des pêcheries est tombé à un milliard de francs. Coïncidence ou relation causale ? Les zoologistes n'ont pas encore tranché.



Les amas de moules zébrées, sur les plages des Grands Lacs américains, symbolisent la bataille perdue contre cet envahisseur qui perturbe l'écosystème, en bien et en mal.

Les mesures pour l'emploi

L'absence d'évaluation des mesures anti-chômage est pénalisante.

Face au chômage endémique, les pouvoirs publics instaurent des mesures destinées à faciliter l'insertion des jeunes sur le marché du travail. Ces mesures sont-elles efficaces? Quels contrats faut-il privilégier si l'objectif est d'assurer un emploi aux jeunes? L'étude du parcours de 5 500 jeunes âgés de 18 à 29 ans, par Thierry Magnac, économiste à l'INRA, montre que l'obtention d'un emploi permanent est plus aisée lorsque la personne a fait un stage ou un travail temporaire l'année précédente, que lorsque elle a été au chômage pendant la même période. Néanmoins, ces épisodes de contrats permanents après des stages ou des contrats temporaires peuvent être courts, en raison de licenciements ou de départs volontaires. Comment mesurer l'efficacité des stages?

En France, la mesure des conséquences des dispositifs publics est pénalisée par l'absence d'expériences contrôlées : les études utilisent des données issues de sources administratives ou d'enquêtes par ménage de l'INSEE. Les échantillons des enquêtes présentent alors un biais de sélection : ils ne prennent pas en compte des caractéristiques cachées. Par exemple, qui a des contacts rapides avec des employeurs potentiels, et supposons que l'État finance des stages, dont la mise en œuvre dépend de l'employeur. Lorsque l'on mesure l'impact de ces stages sur la rapi-

dité d'insertion des jeunes sur le marché du travail, les résultats ont un biais : ce n'est pas le stage qui procure un travail, c'est la faculté de trouver ce stage, difficile, qui détermine l'embauche rapide.

Les données utilisées pour l'étude du travail chez les jeunes consistent en un relevé, mois par mois, de la situation des 5 500 jeunes. Chaque mois, un jeune est dans l'un des six états suivants : emploi à durée indéterminée, emploi à durée déterminée, stage rémunéré, chômage, études ou inactif. On calcule ensuite, en fonction de ces statistiques, la probabilité pour que partant d'un état donné, un jeune ait un contrat permanent à la période suivante.

L'ÉLABORATION DES STATISTIQUES

Pour s'affranchir du biais de sélection, on suppose que toutes les personnes qui ont été le même nombre de fois dans les différents états forment un ensemble homogène sans tenir compte de l'ordre des transitions. Ces personnes constituent alors un ensemble dont les caractéristiques inobservables, la facilité à nouer des contacts, par exemple, sont identiques. On suppose que l'ensemble des personnes qui ont travaillé pendant deux mois consécutifs est homogène. Par exemple, si dans la population des individus qui «visitent» pendant deux périodes consécutives une fois l'état stage rémunéré et une fois l'état chômage, il existe un plus grand nombre

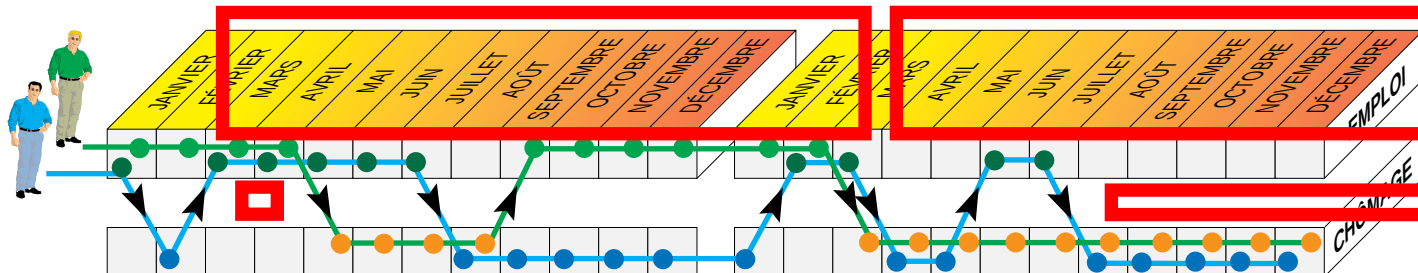
de trajectoires où une personne passe de l'état chômage vers l'état stage que l'inverse, on en déduit que les transitions sont plus probables de l'état chômage vers l'état stage.

Sur ces bases, T. Magnac a confirmé que la probabilité d'avoir un emploi permanent est maximale si, l'année précédente, on avait un emploi permanent, un stage ou un contrat temporaire. Cette probabilité est inférieure si l'on était chômeur. Alors que le but des stages est d'assurer l'insertion vers un emploi stable, on constate que l'état stage et l'état emploi temporaire sont équivalents.

De surcroît, la probabilité de conserver un emploi permanent d'une année sur l'autre est minimale pour les personnes qui étaient précédemment au chômage, en stage, ou avaient un emploi temporaire. La précarité n'est donc pas éradiquée avec le début d'un emploi à durée indéterminée. La raison est double : les entreprises peuvent licencier d'abord les personnes recrutées le plus récemment ou les jeunes peuvent démissionner, car de bas salaires dans les premiers emplois ne les satisfont pas.

Même si ce modèle permet de calculer des probabilités, les économistes font une hypothèse simplificatrice pour s'affranchir du biais de sélection. Pour cette raison, une conclusion ferme sur l'efficacité d'une mesure donnée est difficile. Aux États-Unis, les mesures publiques ne sont votées que si elles sont accompagnées de tests d'évaluation. Ces tests suivent le principe général des expériences biomédicales où l'on oppose un groupe qui suit un traitement, ici les personnes suivant un stage, à un groupe de contrôle.

Si, en France, on instaurait des tests, on pourrait utiliser ces données pour servir à simuler les effets de différentes mesures publiques. On saurait ainsi aider les décideurs publics dans leurs mises en œuvre de politiques économiques. □



Suivi, mois par mois, de la situation de personnes qui sont au chômage ou ont un emploi. Pour s'affranchir d'une sélection hétérogène, on choisit des classes de personnes qui ont été le même nombre de mois en emploi et au chômage (respectivement 10 mois et 14 mois) deux années consécutives. La trajectoire des

personnes de la classe verte (trajectoire verte) comporte trois transitions tandis que celle des personnes de la classe bleue (trajectoire bleue) en comporte sept. Si le nombre de personnes dans la classe bleue est supérieur au nombre de personnes dans la classe verte, la mobilité entre état est plus facile que dans le cas contraire.

Récepteur bifonctionnel

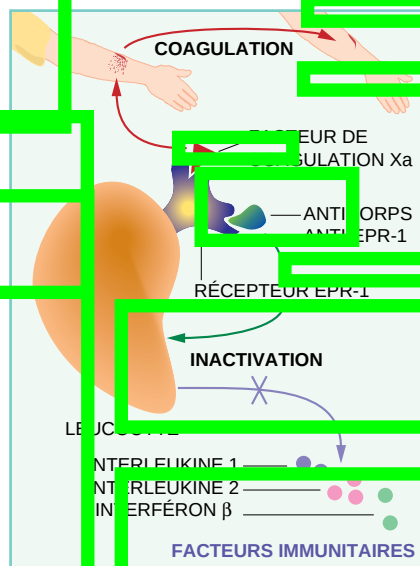
Une nouvelle molécule, bloquant un récepteur identifié pour une autre fonction, inhibe le système immunitaire.

Comment le système immunitaire est-il activé ou, au contraire, mis au repos? On connaît plusieurs acteurs cellulaires (les différents lymphocytes, les macrophages, les cellules auxiliaires...) et moléculaires (les interleukines, les interférons...) qui commandent ces mécanismes d'activation ou d'inhibition. On pensait les avoir tous identifiés. Or, Michel Duchosal et ses collègues du Centre hospitalier universitaire de Lausanne, et l'équipe de Dario Altieri de l'Université Yale, ont identifié une nouvelle molécule qui inhibe le système immunitaire.

Le plus étonnant, c'est que le récepteur de cette molécule immunosuppressive a d'abord été identifié pour une autre fonction. Ainsi ce récepteur nommé EPR-1, a été isolé il y a quelques années. C'est un récepteur transmembranaire : une partie de la molécule est localisée à l'extérieur de la cellule, la deuxième traverse la membrane et la troisième baigne dans le milieu intracellulaire. Il est localisé sur les lymphocytes et sur les macrophages, et c'est le facteur Xa : cette molécule participe à la chaîne des réactions qui aboutissent à la coagulation du sang.

On a alors constaté, *in vitro*, que la densité des récepteurs EPR-1 augmente quand les lymphocytes qui portent ce type de récepteurs sont activés : l'expression de ces molécules est liée à l'activation de cellules du système immunitaire. C'était un premier indice du rôle de ce récepteur dans la régulation immunitaire. L'équipe de Yale a alors mis au point un anticorps qui se lie au récepteur EPR-1, sur un site de liaison différent de celui où se lie le facteur Xa.

Les biochimistes en conclurent que ce récepteur a deux sites de liaison et donc deux fonctions : l'une, connue, dans la chaîne de coagulation, et une autre, inconnue. On disposait d'une deuxième clé pour une porte à deux serrures ouvrant sur deux pièces, dont l'une était déjà explorée. Cet anticorps a permis aux biochimistes de mettre en évidence la deuxième fonction de ce récepteur.



Le récepteur EPR-1 peut fixer le facteur Xa qui intervient dans les mécanismes de coagulation du sang et un anticorps qui inhibe le système immunitaire, l'empêchant de libérer divers agents de défense de l'organisme.

L'équipe américaine a montré que l'anticorps anti-EPR-1 a une action sur des cultures de leucocytes stimulés : l'anticorps inhibe la libération des interleukines 1 et 2 et de l'interféron β . Plusieurs expériences réalisées *in vitro* ont montré le rôle immunosuppresseur de l'anticorps anti-EPR-1. De surcroît, l'action de l'anticorps cesse dès qu'il quitte son récepteur.

Le rôle immunosuppresseur de l'anticorps anti-EPR-1 a été démontré *in vivo* par l'équipe de M. Duchosal. Pour ce faire, ces biologistes ont greffé des cellules humaines sur des souris dépourvues de système immunitaire. Normalement, on constate une réaction de rejet du greffon contre l'hôte. Quand les cellules humaines sont préalablement traitées avec l'anticorps anti-EPR-1 ou que cet anticorps est injecté en même temps que sont greffées des cellules humaines, le greffon ne réagit pas : les cellules du système immunitaire greffées restent inactives, inhibées par l'anticorps.

Ainsi dispose-t-on d'une molécule qui met le système immunitaire au repos, comme le fait la ciclosporine utilisée aujourd'hui pour éviter les rejets de greffes. Toutefois cette molécule a été synthétisée et n'est pas une molécule fabriquée par l'organisme. Comme le récepteur EPR-1 a une fonction immunitaire naturelle, quel est son ligand endogène? C'est bien sûr une des questions qui préoccupent les deux équipes. Quand on l'aura isolé, on disposera d'un nouvel immunosuppresseur dont il faudra explorer les applications thérapeutiques potentielles.

Sentez-vous bien!

Mauvaise haleine et psychologie

Faut-il avoir quelqu'un dans le nez pour sentir sa mauvaise haleine? Ce n'est pas sûr. En revanche, un mauvais jugement sur sa propre haleine témoignerait de troubles psychologiques plutôt que digestifs ou d'un manque d'hygiène.

Des psychologues de l'Université de Tel-Aviv ont étudié la qualité de l'haleine de 38 personnes qui venaient consulter pour ce trouble. Ils leur ont demandé de noter leur haleine de zéro à dix sur une échelle de jugement. Une rose aurait reçu un zéro tandis que le souffle diabolique que Linda Blair projette vers le prêtre, dans le film *L'exorciste*, aurait atteint dix. Ils ont aussi soufflé, à une distance de dix centimètres, dans le nez d'un juge d'appels, qui a noté ces émissions sur la même échelle. Pour affranchir la notation des sensibilités individuelles, tous les participants à l'étude, une comar, ont reniflé une odeur de référence : celle d'un engrais à base de fumier. La notation du fumier assurait aussi que l'odorat des patients était normal.

Le fumier a remporté la note de neuf, à l'unanimité. En revanche, tandis que le juge avait noté les patients, en moyenne, plus près de la menthe que du purin, à 2,7, le groupe s'était accordé à lui-même une moyenne de 6,7.

Le questionnaire de personnalité préalablement rempli fournit l'explication : les personnes hypersensibles accuseraient leur haleine de leurs difficultés relationnelles, tandis que des troubles obsessionnels compulsifs conduiraient d'autres à une trop grande attention à l'hygiène personnelle, en particulier aux odeurs buccales. Si vous ne vous sentez pas bon, c'est que vous ne vous sentez pas bien!



La vie sur Mars ?

Des chercheurs de la NASA pensent avoir trouvé des traces de vie dans une météorite martienne qui date de 3,6 milliards d'années.

La NASA aurait voulu attirer l'attention sur ses recherches qu'elle n'aurait pas agi autrement : 24 heures avant la publication de résultats obtenus par David McKay et ses collègues, l'organisme a tenu une conférence de presse pour annoncer «la possibilité d'une étonnante découverte : il y a plus de trois milliards d'années, une forme primitive de vie microscopique aurait existé sur Mars.» Cette découverte est-elle réelle ? La NASA avait-elle besoin de redorer son blason, pour obtenir les subsides qui lui permettraient d'envoyer la sonde *Mars Global Surveyor*, le 6 novembre 1996, puis la sonde *Mars Pathfinder* le 2 décembre ? En tout cas, Bill Clinton l'a immédiatement souligné l'importance de la découverte et assuré l'organisme de son soutien.

Mars est aujourd'hui une planète inhospitalière : son atmosphère contient 95 pour cent de dioxyde de carbone, et cinq pour cent d'azote, de gaz rares, avec des traces de d'oxygène et de vapeur d'eau. La pression atmosphérique à sa surface est 100 fois inférieure à celle de la Terre, et les températures sont comprises entre -120 et +25 °C. Grâce aux missions spatiales des années 1960 à 1980, on sait que l'atmosphère et les climats martiens ressemblaient jadis à ceux de la Terre ; il y

avait même de l'eau en quantité considérable comme le révèlent les canaux observables en surface. Toutefois, l'atmosphère évolua très différemment de celle de la Terre, perdant progressivement la plus grande partie de sa substance, se refroidissant et s'asséchant.

Y a-t-il de la vie sur Mars ? En juillet et en septembre 1976, les sondes *Viking 1* et *Viking 2*, qui se posèrent à la surface de Mars, cherchèrent des traces d'activité biologique. Elles ne trouvèrent pas d'activité photosynthétique, ni de métabolisme du carbone, qui aurait été révélé par le suivi de carbone radioactif. Tout espoir de trouver de la vie sur Mars devait-il être abandonné ? Les expériences n'ayant été effectuées qu'au voisinage de la sonde, il n'était pas exclu que de la vie florisse ailleurs. Comme on n'avait pas rapporté d'échantillons de sol martien, les planétologues s'intéressèrent aux météorites.

LES MÉTÉORITES SNC

Des milliers de tonnes de matériaux météoritiques tombent chaque année dans l'atmosphère terrestre ; la plupart ont été formés lorsque le Système solaire s'est constitué, il y a 4,5 milliards d'années, mais environ dix pour cent des

météorites sont des roches volcaniques, éjectées par des volcans de la Lune, de Mars, de l'Iou ou de Triton, par exemple.

Douze de ces météorites volcaniques se distinguent par leur âge et par leur composition : ces météorites dénommées SNC doivent leur nom aux premiers sites où on les a trouvées : Shergotty (Inde), Nakhla (Égypte) et Chassigny (France). Les douze objets SNC sont gris ou noirs, comme les roches du sol martien (la couleur rouge de la surface provient de l'oxydation de ces roches et, notamment, de l'oxydation du fer). L'un d'entre eux, ALH84001, a été trouvé en 1984 en Antarctique ; sa masse est de 1,9 kilogramme.

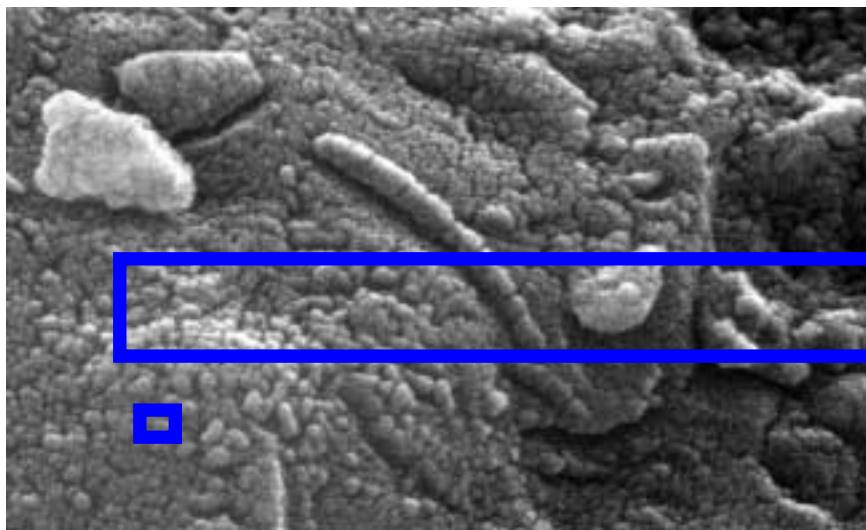
Il présente plusieurs caractéristiques remarquables. Tout d'abord, des fractures renferment des dépôts de carbonates, ainsi que des hydrocarbures polycycliques aromatiques, tel le naphtalène ou le phénanthrène. Les chercheurs américains soutiennent que ces composés organiques, ainsi que les dépôts de carbonate, proviennent de micro-organismes martiens, dont des fossiles, pensent-ils, sont présents dans la roche. De surcroît, toujours au voisinage des globules de carbonates et des fractures, les minéralogistes ont trouvé des composés inhabituels, des sulfures de fers et de la magnétite, qui sont communément produits par des bactéries anaérobies et par d'autres organismes terrestres.

Les scientifiques de la NASA ont récusé l'hypothèse d'une contamination par des matériaux terrestres, au cours du séjour de 13 000 ans dans l'Antarctique. Notamment les molécules organiques ont été détectées à l'intérieur des dépôts de carbonate, lesquels datent de 3,6 milliards d'années.

Pourtant leurs conclusions sont largement contestées, et les critiques sont variées : des traces de vie aussi anciennes sont très rares, sur la Terre ; la météorite a tant voyagé, depuis Mars, qu'elle aurait pu être contaminée de façons variées ; les hydrocarbures polycycliques aromatiques sont présents partout, dans l'espace et sur la Terre.

Alors que la controverse scientifique fait rage, Carl Sagan, l'un des principaux spéculistes de la vie extraterrestre, est peut-être celui qui a fait la remarque la plus péjorative : une annonce aussi extraordinaire que la découverte de vie extraterrestre nécessite des preuves à la hauteur. Ce n'est pas le cas : même les chercheurs de la NASA admettent qu'ils n'ont qu'un faisceau de présomption.

Aussi continuent-ils l'exploration de la météorite ALH84001 ; ils recherchent notamment des acides aminés et des traces de paroi cellulaire dans les objets qu'ils croient être des microfossiles. □



Cette image prise au microscope électronique montre une structure tubulaire trouvée dans la météorite ALH84001, d'origine probablement martienne. Cette structure de quelques micromètres de long pourrait être une trace d'un micro-organisme qui aurait vécu sur Mars il y a 3,6 milliards d'années.

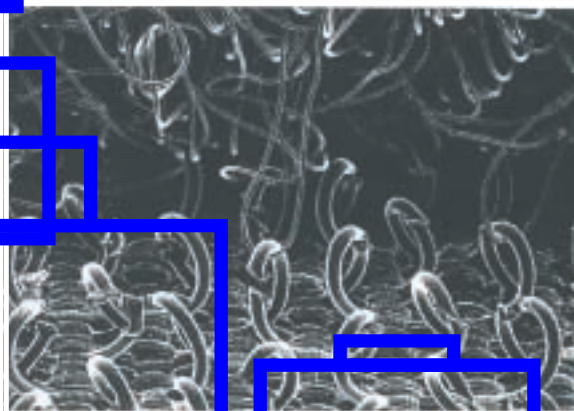
Le velcro

MARTIN JACOBS



GEORGE DE MESTRAL

Cet ingénieur suisse eut l'idée des crochets et des boucles du velcro après avoir examiné au microscope les petits fruits de la bardane, que les enfants aiment cueillir dans les champs et s'envoyer car ils restent accrochés aux vêtements.

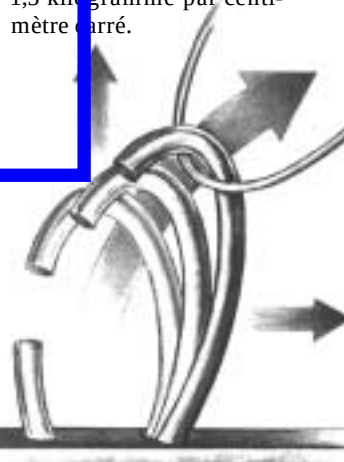


Le velcro tire son nom d'une contraction des mots *velours* et *crochet*. Comme le fil de fer barbelé imite les buissons de ronces, le velcro est un de ces produits que l'homme a conçu, inspiré par la nature. George de Mestral, un ingénieur suisse décédé en 1990, eut l'idée de ce qui allait devenir le velcro en retirant, au début des années 1940, des petits fruits de bardane collés sur son pantalon et accrochés au pelage de son chien. Il les observa au microscope et découvrit des myriades de minuscules crochets qui s'attachaient à tout ce qui avait une forme de boucle. Cette baie épineuse inspira la conception des crochets et des boucles en nylon qui sont utilisés depuis les années 1950 dans de nombreux dispositifs de fermeture, tels ceux des couches-culottes pour les nouveau-nés, des chaussures et de divers vêtements, ou encore pour diverses fixations industrielles.

La force d'attachement de rangées de crochets et de boucles qui mesurent moins de deux millimètres de hauteur est surprenante. Une pièce de velcro de six centimètres carrés peut renfermer 3000 boucles et crochets (même si un tiers seulement sont réellement appariés). Ce petit morceau de velcro résiste à une charge de 80 kilogrammes que l'on y suspendrait. Les boucles et les crochets se séparent plus facilement quand on tire de biais, car on sépare alors les rangées de crochets et de boucles les unes après les autres, et non toutes en même temps comme lorsque l'on tire perpendiculairement. La séparation de la première rangée, puis de la deuxième, et ainsi de suite, produit le bruit de déchirement caractéristique du velcro que l'on ouvre.

TRACTION

Lorsque la force visant à séparer les crochets et les boucles est exercée perpendiculairement au plan de base des crochets, la résistance à l'arrachement atteint 1,5 kilogramme par centimètre carré.



À L'ARRACHEMENT

Lorsque la force est exercée de biais, les rangées de boucles et de crochets se séparent assez facilement : une masse de 300 grammes suffit à libérer un centimètre d'une rangée de crochets.

CISAILLEMENT

Contre une force exercée parallèlement au plan de base des crochets, la résistance à l'ouverture peut atteindre trois kilogrammes par centimètre carré.

Les modèles en biologie et en médecine

DANIEL SCHWARTZ

La biologie et la médecine désignent par le nom de modèles des démarches tout à fait différentes : abstraites (mathématiques) ou concrètes (biologiques). Les unes comme les autres ont pour but l'acquisition de connaissances difficilement accessibles par une autre voie ou l'aide à la décision.

Qu'est-ce qu'un modèle? Sa définition est imprécise, parce que ce mot a des acceptions très différentes. Un des premiers modèles biologiques connus, établi par Fibonacci en 1228, décrivait en langage mathématique la dynamique d'une population de lapins. Ce modèle n'est pas aussi rigoureux, pour l'évaluation des médicaments, la souris est un modèle de l'homme? Faut-il en déduire que les divers modèles biologiques et médicaux n'ont en commun que le nom? On pressent que non, mais quel lien unit les différents types de modèles? Quelques exemples faciliteront la réponse.

Les modèles que nous examinerons seront pris aux étapes essentielles de la vie : la naissance, la croissance, la maladie, la mort. Après l'étude de ces situations particulières, nous aborderons le modèle de la vie humaine, qui se sent dans l'étude du vivant, et nous insisterons sur l'importante distinction entre connaissance et décision. Ce n'est pas un exercice de lexicologie : dans la lutte contre une maladie comme le SIDA, où l'on doit évaluer dans l'urgence l'efficacité de stratégies thérapeutiques, l'emploi de modèles est une des clefs du succès.

Naître ou ne pas naître

Une des difficultés de la recherche médicale est qu'on ne peut pas expérimenter sur l'homme. Le problème de la procréation est, à cet égard, parti-

culièrement sensible. Ce domaine est l'un de ceux où un modèle, de type probabiliste, s'est révélé utile.

On sait aujourd'hui que la majorité des œufs humains fécondés n'arrivent pas au terme de leur développement, mais l'importance de cette hécatombe n'a pas été longtemps sous-estimée. Il y a quelques dizaines d'années, on croyait que la fréquence des avortements spontanés était inférieure à moins de dix pour cent mais on les distinguait mal des avortements provoqués. La première enquête sérieuse, due aux démographes R.E. French et J.E. Bierman, semblait montrer, en 1960, qu'environ 25 pour cent des femmes qui se savaient enceintes avortaient spontanément! En outre, ces avortements pouvaient se produire plus tôt, alors que les femmes ne savaient pas qu'elles étaient enceintes, l'expulsion d'œufs microscopiques échappant à leur attention.

Comment dénombrer ces avortements «incliniques»? Devait-on opérer sur des femmes, prélever et observer des œufs? Cette solution fut adoptée par le chirurgien américain A.T. Hertig, dans les années 1940 : des femmes

à fertilité normale, acceptaient d'avoir un rapport sexuel au moment favorable de leur cycle, juste avant l'opération. Hertig pouvait ainsi voir s'il y avait des œufs et apprécier leur viabilité. Il mit plusieurs années à réunir une centaine de cas. En ne retenant que les cas bien évaluables, il conclut que, sur 100 ovules ayant eu un contact avec

le sperme, 84 étaient fécondés, dont 42 mouraient dans les deux semaines suivant l'ovulation, et 42 atteignaient les premières règles manquantes. Le bilan de la mortalité cliniquement non décelable était de 50 pour cent.

À l'extrême opposé de cette méthode directe et invasive, une méthode indirecte et abstraite a été imaginée : l'utilisation d'un modèle mathématique. L'un des modèles possibles, que j'ai mis au point, est le suivant.

La probabilité qu'un cycle conduise à un œuf viable jusqu'à un temps t (ce que nous nommerons succès) est exprimée en fonction de probabilités élémentaires : la probabilité d'émission d'un ovule, les probabilités de fécondation de cet ovule, compte tenu des rapports sexuels qui ont eu lieu dans le cycle, et la probabilité de survie de l'œuf jusqu'au temps t . Ces probabilités élémentaires sont inconnues ; la probabilité de survie de l'œuf, en particulier, est très difficile à évaluer. En revanche, les probabilités de succès pour divers moments des rapports sexuels dans le cycle peuvent être estimées, si l'on s'en donne le mal. C'est la base d'un modèle mathématique.

modèles mathématiques, d'induire des valeurs de paramètres inconnus : ce sont celles qui correspondent le mieux aux données observées.

Cette démarche demandait que l'on dispose d'une population de couples adéquate. Situation rare, mais qui a été réalisée par les chercheurs britanniques J.C. Barret et J. Marshall, qui avaient

réuni 2 192 cycles ovulatoires de 241 couples, pour lesquels on possédait la courbe de température, la répartition des rapports sexuels et l'état de l'œuf fécondé six semaines après la date estimée d'ovulation.

En appliquant notre modèle à cette série, nous avons estimé la probabilité de survie d'un œuf jusqu'à six semaines. La valeur trouvée était de l'ordre de 52 pour cent. La mortalité dans les six premières semaines, complémentaire de la survie, serait donc également de l'ordre de 50 pour cent. Hertig avait obtenu le même résultat, mais pour la mortalité à deux semaines ; pour la mortalité à six semaines, il trouvait 58 pour cent, résultat encore voisin de celui du modèle.

Les deux méthodes sont fondées sur des hypothèses, mais la plupart ont été confirmées. En outre, la concordance entre les résultats de deux démarches différentes donne confiance dans les estimations obtenues. Des approches récentes (tests précoces de grossesse, fécondation in vitro) ont apporté des informations nouvelles, qui suscitent également quelques réserves, mais, dans l'ensemble, elles donnent de nouvelles preuves de celles qui avaient été obtenues. N'est-il pas admirable que la fréquence d'un événement invisible ait ainsi été, sans audacieux coup de bistouri, mesurée par un modèle mathématique ?

L'artificiel, modèle du naturel

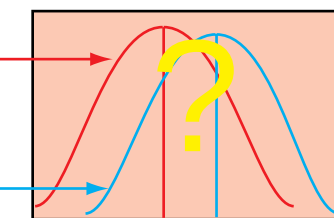
L'étude de la fertilité humaine est particulièrement ardue, ne fût-ce qu'en raison des résistances qui empêchent d'obtenir ces informations. À cet égard, l'insémination artificielle avec donneur de sperme congelé présente des avantages considérables. Elle permet d'obtenir une multitude de renseignements sur la femme et sur le donneur ; un donneur de sperme a des enfants avec plusieurs femmes ; on connaît la date exacte des inséminations et la date présumée de l'ovulation ; la fécondation est, sauf cas exceptionnels, contrôlée ; enfin, sans avantage incomparable, c'est le sperme inséminé qu'on analyse.

Lorsque fut créé par Georges David le premier Centre d'étude et de conservation du sperme (CECOS), on établit en outre un protocole précis et utile pour la recherche ; il était prévu, en particulier, que le premier cycle ne comporterait qu'une seule insémination.

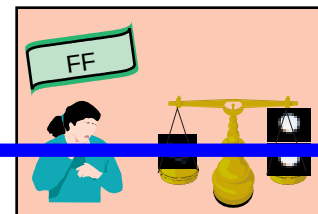
Ainsi a-t-on déterminé le rôle du jour d'insémination. Sur 1 000 cycles, l'insémination unique, on identifia la place de la période de fertilité, ainsi que les «meilleurs jours» (c'étaient, dans l'ordre, les jours -1 et -3 par rapport au jour zéro, dernier minimum de la courbe thermique).

La fertilité dépendait-elle de l'âge des membres du couple ? De nombreux démographes avaient cherché cette rela-

tion, mais il était difficile de séparer le rôle de l'âge du couple de facteurs concomitants tels que l'âge du mari et la fréquence des rapports sexuels. Dans l'insémination artificielle avec donneur, l'âge du donneur et le nombre des inséminations par cycle sont indépendants de l'âge de la femme. Les dix CECOS d'alors découvrirent, à partir de 2 000 cas de femmes inséminées, que la fécondabilité (taux de succès par cycle) dimi-



TEST STATISTIQUE



BILAN GLOBAL



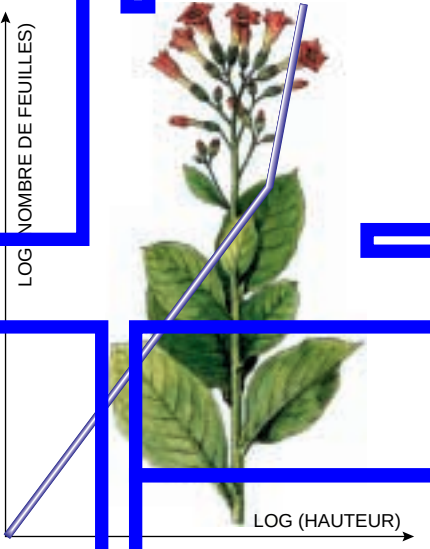
1. LES ESSAIS THÉRAPEUTIQUES sont de deux types : essais de connaissance et essais de décision. Dans le premier (*en haut*), l'essai peut porter sur un échantillon sélectionné, des personnes âgées par exemple. On crée deux groupes par tirage au sort, on administre les traitements en conditions égales (notamment même présentation) et l'on ne mesure si possible qu'un seul effet. La comparaison utilise un test statistique. Dans les essais de décision (*en bas*), les deux groupes sont tirés au sort dans un échantillon représentatif ; on administre les traitements en conditions optimales et l'on compare leur bilan coût-efficacité ; on n'effectue pas de test statistique.

La croissance du tabac

Des modifications brusques de la croissance s'observent dans le règne végétal et dans le règne animal.

Dans le cas du tabac, par exemple, on met en évidence ces phases de la croissance en portant sur un graphique la variation de la hauteur de la plante en fonction du nombre de feuilles produites, en coordonnées logarithmiques.

On observe ainsi une brusque montée en hauteur : c'est la montée en graines, ou montée en fleurs, que les jardiniers appréhendent chez les laitues. Or, à ce même moment, des coupes dans le bourgeon terminal révèlent l'apparition des premières ébauches florales : c'est l'âge ingrat du tabac...



nue légèrement dès la trentaine, et notamment après. Pour cette étude du rôle de l'âge, l'analyse de l'impact de la croissance artificielle avec donneur est probablement un cas meilleur. La publication du résultat dans le *New England Journal of Medicine* était accompagnée d'un éditorial qui concluait de façon péremptoire : que les femmes commencent par faire des enfants et travaillent plus tard. Cet oukase provoqua de violentes controverses.

La croissance

Un type de modèle différent des deux précédents a été utilisé dans le domaine de la croissance. Des milliers d'articles scientifiques ont été consacrés à la croissance, donnant des formules qui expriment la variation de divers paramètres (poids, taille...) en fonction du temps. Dans les années 1930, Georges Teissier, en France, et J.M. Huxley, en Grande-Bretagne, ont proposé d'étudier plutôt la variation d'un paramètre en fonction d'un autre, sans considérer le temps : par exemple, le poids en fonction de la taille. Teissier et Huxley ont montré qu'entre deux points de croissance d'un

individu au cours de sa croissance existe, pendant de larges périodes de temps, une relation du type $y = kx^\alpha$, où k et α sont des constantes, différentes pour les différents couples de paramètres. Le cas où α est égal à 1, qui correspond au maintien des proportions y/x , donc à une conservation homothétique de la forme, est exceptionnel ;

généralement y augmente plus vite ou moins vite que x, entraînant une déformation continue. C'est ce que montre, à titre d'exemple, la figure 2 pour notre espèce.

Ce phénomène, nommé allométrie de croissance, est très général : non seulement parce qu'il s'applique à la majorité des êtres, mais aussi parce qu'il est vérifié par un très grand nombre de paramètres, morphologiques ou physico-chimiques. Six et y sont portés sur des axes logarithmiques (c'est-à-dire les valeurs 1, 10, 100, 1 000... à intervalles égaux), la relation est traduite par une droite nommée « droite d'allométrie ». Une même droite ne convient généralement pas pour toute la vie de l'individu ; la croissance est représentée par plusieurs segments successifs, déterminant des points anguleux où α change de valeur.

Il est remarquable que les points anguleux coïncident dans le temps pour différents couples de paramètres : les segments correspondent à des étapes de la croissance, et les points anguleux à des crises physiologiques.

Dans le cas de l'espèce humaine, des points anguleux apparaissent à l'âge de la naissance, à l'âge de la puberté, à l'âge de la vieillesse.

De nombreux paramètres morphologiques ; ainsi, vers l'âge de 13-14 ans, la largeur des épaules et la longueur du torse croissent moins vite que la taille avant le point anguleux, plus vite après. L'inverse a lieu de manière particulièrement frappante pour la longueur des jambes, justifiant le nom d'âge ingrat, l'âge où la forme est disgracieuse. Au

même moment se produisent de profondes modifications physiologiques (notamment l'activité des glandes sexuelles) et psychologiques. C'est la crise de la puberté.

De même, divers statisticiens, tels Philippe Lazar et Nicole Mamelle, ont étudié les relations allométriques dans les périodes pré- et postnatales, à partir de mesures échographiques de fœtus ou de mesures directes sur des fœtus avortés et des nouveau-nés.

Pour le couple taille-périmètre crânien, la relation est décrite par trois étapes : dans la première, qui va jusqu'à la 30^e semaine, le périmètre crânien croît presque comme le carré de la taille, tandis qu'après cette date, il croît plus vite que la taille (comme sa racine carrée) ; à la naissance, il recommence à croître plus vite que la taille, quoique moins nettement que dans la période initiale.

Ces trois étapes correspondent à une naissance, à une croissance, à une maturation. Pour les grands prématurés, nés avant 30 semaines (il n'y a alors pas de point anguleux à 30 semaines) et pour les bébés qui se présentent par le siège (le cerveau croît plus vite dans la deuxième étape). L'ensemble de ces observations a permis à Ph. Lazar de formuler des hypothèses que nous exprimerons en termes finalistes.

Dans la première étape, le cerveau croît très rapidement que, si la croissance continuait, l'accouchement serait sans doute l'accouchement impossible et compromettrait en tout cas la survie de la mère et de l'enfant. À la 30^e semaine se produit un renversement saltatoire : la tête croît moins vite, c'est par ailleurs le moment où le bébé se place tête en avant. La forte croissance de la tête reprend après l'accouchement.

Cependant le changement de rythme à la 30^e semaine ne serait pas suffisant si l'accouchement devait tarder. Qu'il ait lieu à la 40^e semaine paraît un deuxième moyen de protection, car cette durée de gestation semble anormalement courte : on sait combien le

naissance et, en comparant l'homme à divers primates, certains biologistes ont estimé que la durée de gestation, chez la femme, devrait être de l'ordre de 21 mois. La reprise de la croissance rapide du cerveau après l'accouchement suggère que le développement n'était pas achevé. Enfin la station debout avance la naissance du bébé : les femmes

qui travaillent de bout pendant leur grossesse ont l'avantage de rester prématurés. Ainsi le modèle allométrique prouve son utilité en montrant que trois caractéristiques de l'espèce humaine, apparemment indépendantes, ont été associées au cours de l'évolution : l'importance du volume crânien, la précocité de la naissance et la bipédie.

La maladie

Comment prévoir si une molécule est ou non efficace contre une maladie ? Un modèle, qu'on n'avait sans doute pas nommé ainsi, a été proposé au XVI^e siècle par l'alchimiste et médecin suisse Paracelse (1493-1541) : la théorie des signatures. Cette théorie stipulait que Dieu, regrettant d'avoir créé les maladies, aurait donné à l'homme les plantes permettant de les combattre, en leur affectant une signature.

Ce modèle fait aujourd'hui sourire, mais, le hasard aidant, la théorie des signatures aboutit à une découverte de taille : puisque les saules prospéraient les pieds de malades, on chercha à en

nir des remèdes contre les fièvres et les rhumatismes ; on chercha dans leur écorce, et l'on trouva l'acide salicylique, dont l'aspirine est un dérivé.

Depuis Paracelse, les modèles qui permettent de prévoir l'activité des molécules ont évolué... Dans le cas du cancer, par exemple, on a cherché des substances qui s'intercalent dans

la double hélice de l'ADN des chromosomes. Si ce modèle moléculaire n'a pas convaincu le cancer, il a donné, de bons résultats dans d'autres maladies : quand on identifie des cibles biologiques, on peut les activer, pour inhiber ou pour amplifier des effets physiologiques, ou les bloquer, afin de diminuer les hyperfonctionnements.

Ces cibles sont généralement des récepteurs protéiques disposées à la surface des cellules et qui participent aux échanges d'informations dans l'organisme, ou des enzymes qui assurent certaines étapes des diverses réactions physiologiques. Connaissant les récepteurs ou les enzymes, on tente de mettre au point des molécules capables d'agir sur eux. Cependant les pharmaciens ne savent pas encore prédire à coup sûr l'action d'une molécule entièrement nouvelle.

Le Graal de la pharmacie est la prédiction des relations structure-activité. En l'absence d'un tel modèle, notre allié le plus efficace reste souvent le hasard érigé en système par

des dizaines de milliers de substances pour découvrir un petit nombre de composés efficaces.

La mort

Nous avons présenté des modèles pour la naissance, la croissance, la maladie. Un modèle peut-il expliquer la pro-

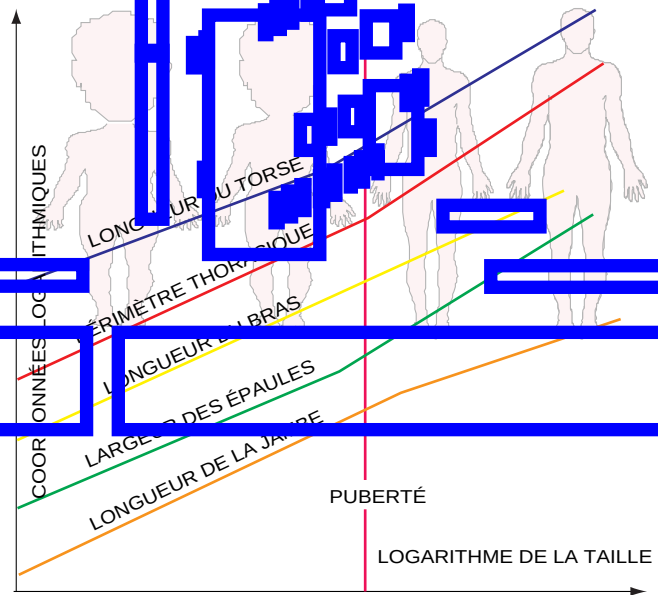
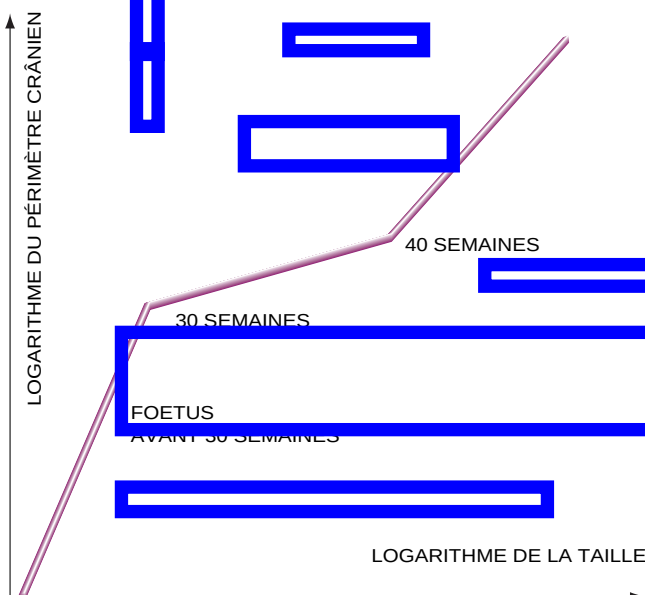
gression vers la mort ? Nous avons cherché à le vérifier à partir de la répartition (les statisticiens disent « distribution ») des durées de vie.

Tout caractère, en biologie, varie selon les individus. Cette variabilité, pour un caractère quantitatif continu et pour un échantillon d'individus, est classiquement représentée par un diagramme de probabilité (figure 3). La distribution qui représente cette variabilité pour la population dont provient l'échantillon est une courbe qui sous-tend l'histogramme. Ainsi la figure 1 illustre la loi établie du poids des nouveau-nés, loi établie à partir de l'histogramme observé pour 200 sujets. Une distribution, ou loi de probabilité, est un modèle.

La forme d'une courbe de distribution permet-elle de suggérer des hypothèses ? C'est ce que nous examinerons, avant d'étudier la mortalité, sur deux distributions classiques.

La distribution normale, ou loi de Laplace-Gauss, est la plus célèbre des lois de probabilité. Sa forme est une

s'étend de moins l'infini à plus l'infini (c'est la courbe en rouge de la figure 4). Un théorème qui joue un rôle fondamental en statistique énonce que la somme de variables nombreuses et indépendantes, aucune n'atteignant des valeurs trop supérieures aux autres, tend vers une loi normale quand le nombre des variables augmente.



2. LES MODÈLES ALLOMÉTRIQUES identifient des phénomènes physiologiques. Par exemple, quand on trace la variation de diverses mensurations en fonction du périmètre crânien (à gauche) ou de la taille (à droite) en coordonnées logarithmiques, on observe

que les points se répartissent sur des segments de droite, raccordés par des points anguleux. Le point anguleux de la courbe de droite correspond à la puberté. Les silhouettes montrent que les proportions du corps évoluent avec l'âge.

On est alors tenté de retourner ce résultat : puisque le poids de naissance des nouveau-nés dans une population suit une loi très proche de la normale, ne peut-on supposer que ce poids se constitue, pendant la gestation, par addition de multiples effets indépendants ?

Le terme « loi normale » incite à croire que les variables biologiques doivent lui être « normalement » assujetties. Or bien des variables suivent d'autres lois. Une loi fréquemment rencontrée est la loi log-normale : c'est alors le logarithme de la variable qui est normalement distribué, la courbe représentant la loi ayant une forme en cloche dissymétrique plus étendue à droite qu'à gauche (voir la figure 5). Un exemple dans le domaine économique illustre cette situation : les modifications de salaires sont généralement pas par addition d'une

somme identique pour tous, mais par l'octroi de sommes proportionnelles aux salaires existants. Ce sont là des effets multiplicatifs ; le logarithme des salaires est donc déterminé par des effets additifs. On conçoit, dans cet exemple, l'existence d'une distribution log-normale.

Dans la répartition log-normale, l'intérêt de la concentration en cholestérol total dans le sang, ou cholestérolémie, cette concentration serait donc déterminée par des effets multiplicatifs, tandis que le poids à la naissance le serait par des effets additifs. Pourquoi il faudrait qu'on en cherche une explication physiologique.

Il reste après ces deux préalables, à voir ce qu'il en est de la durée D de la vie humaine. La courbe de distribution de la durée de vie après 20 ans, dans nos contrées à l'époque actuelle, est représentée sur la partie inférieure de la figure 5. Elle est très voisine des distributions précédemment envisagées. Toutefois cette courbe ressemble à la symétrique d'une courbe de loi log-

normale. Autrement dit, $\log(L-D)$ aurait une distribution normale, L serait un âge limite, et c'est l'écart à cet âge limite qui serait réparti selon une loi log-normale.

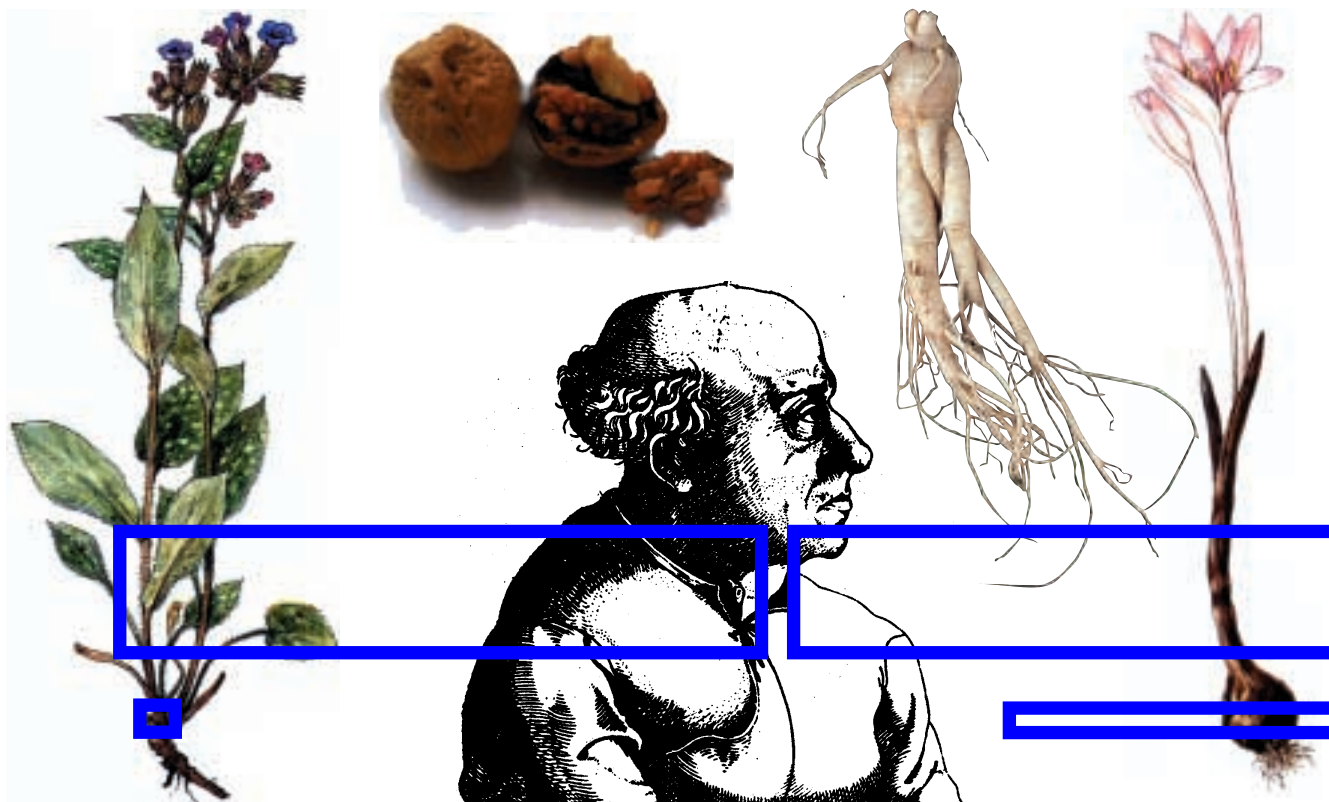
Partant des données de l'INED publiées par Jacques Vallin pour le sexe féminin, en France en 1969, nous avons montré que, pour cette population, le

modèle s'ajustait bien aux données pour une durée de vie limite de 105 ans. L'âge limite est donc une limite théorique ; on ne peut naturellement pas admettre qu'en première approximation. Par ailleurs, une répartition quasi normale de $\log(L-D)$ suggère que les individus recevraient à la naissance un capital de L années, auquel les aléas de la vie opéreraient un retrait distribué de manière log-normale, donc relativement banale.

Le modèle fait penser que « ce qui compte » dans le vieillissement, c'est, non le nombre total d'années, mais la diminution du temps restant, et cela de manière proportionnelle à ce qui reste, puisque l'il s'agit de son logarithme. Si l'on conserve pour limite L une valeur égale à 105, l'âge de 55 à 80 ans représente une division

de 50 ; $105 - 80 = 25$; il en est de même du passage de 100 à 102,5. Ces deux vieillissements, l'un de 25 ans et l'autre de 2,5 ans, seraient donc « équivalents » ; une année d'âge compterait beaucoup plus pour un sujet âgé que pour un sujet jeune (pour le vieillissement).

Le modèle nous a conduits bien loin. Nous n'ignorons pas son côté hypo-



3. LA THÉORIE DES SIGNATURES FUT UN MODÈLE : selon l'alchimiste et médecin suisse Paracelse (au centre), la pulmonaire (à gauche), avec ses feuilles aux taches blanches évoquant la couleur des expectorations des maladies broncho-pulmonaires, en constituait un remède de choix ; la noix (en haut à gauche) était

bonne pour le cerveau, dont elle imite les deux hémisphères ; les racines de ginseng (en haut à droite), en formes de cuisses, étaient des aphrodisiaques ; la colchicine, médicament de la goutte, est extraite du colchique, dont le bulbe a précisément la forme d'un gros orteil (à droite).

thétique, mais, du fait qu'il décrit bien les données, tout se passe comme s'il avait une certaine réalité, et les conclusions qu'on en tire sont faibles (8).

Le modèle probabiliste

L'évaluation de traitements (l'essai thérapeutique) consiste à comparer, pour la guérison d'une maladie par exemple, un groupe recevant un traitement A et un groupe recevant un traitement B (qui peut être l'absence de traitement).

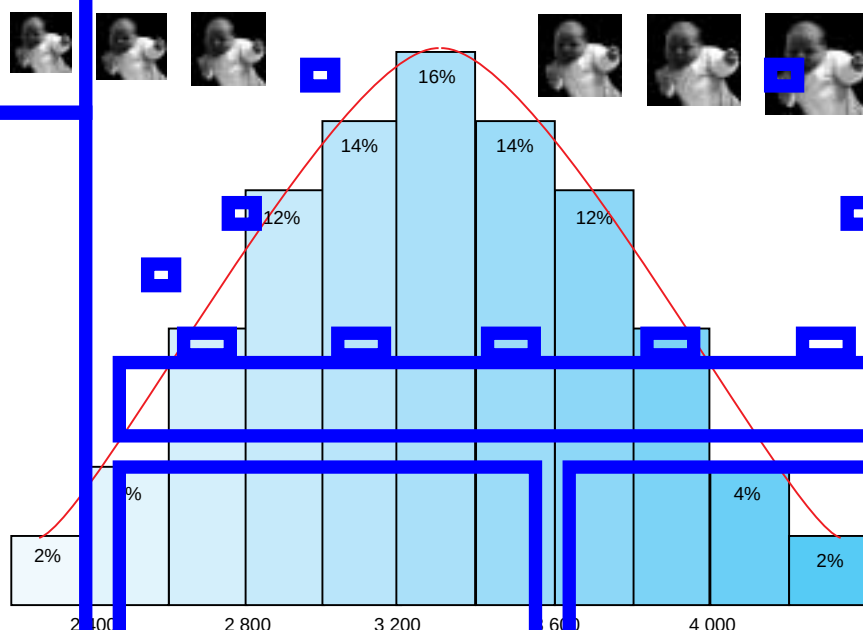
La difficulté d'une telle comparaison provient de la variabilité des caractères biologiques selon les individus. Certaines personnes atteintes d'une maladie guérissent et d'autres non, et, parmi le premier groupe, le temps de maladie est variable selon les personnes. Le médecin qui veut évaluer l'efficacité d'un traitement ne peut étudier ce traitement chez une seule personne, et doit mesurer une proportion de guéris ou des durées moyennes de maladie. Comment déterminer ces valeurs? Ces moyennes vraies, ces taux vrais, ou probabilités, nous échappent nécessairement car on ne peut tester le médicament chez tous les individus ; nous ne pouvons qu'estimer ces valeurs sur des échantillons de taille finie. Et ces estimations diffèrent plus ou moins des vraies valeurs, en raison des fluctuations d'échantillonnage, ou fluctuations de hasard : si on tire un échantillon de 20 boules d'une urne à 20 pour cent de boules blanches, on n'observe pas nécessairement 20 pour cent de blanches. Voilà le problème :

l'épidémiologiste veut comparer le taux de guérison chez des malades traités par le médicament A ou par le médicament B, ou la durée moyenne de la maladie, mais la connaissance de ces taux ou de ces moyennes est hors de portée.

Avant le XX^e siècle, la méthode était simple, mais absolument pas rigoureuse : on concluait selon la grandeur de la différence observée. Grande de combien? Le hasard est capable de tous les caprices : il peut conduire à des taux de guérison très différents, même si les probabilités de guérison sont égales.

avec A et B, et à des taux voisins ou identiques, alors que les chances de guérison sont différentes. C'est ici que le calcul des probabilités donne une solution, avec le test statistique.

Supposons que, sur deux échantillons de 200 malades, on observe 100 guéris avec le traitement A et 60 guéris avec le traitement B. Le calcul



4. LE POIDS des nouveau-nés est distribué de façon « normale » : la proportion de nouveau-nés ayant un poids donné, en fonction du poids, est sous-tendue par une courbe en forme de cloche symétrique. Une telle distribution se retrouve pour plus de 100 paramètres physiologiques.

des probabilités indique que, si les vrais taux de guérison étaient identiques, on aurait moins d'une chance sur 10 000 d'obtenir une telle différence de taux. L'hypothèse d'égalité des taux est donc très peu vraisemblable.

La différence observée est généralement considérée comme significative quand la probabilité d'atteindre la différence observée (le fameux « petit p » des statisticiens) est inférieure à cinq pour cent. Pour la probabilité précédente, elle est pour 10 000, la différence est donc très significative.

Si la probabilité est supérieure à cinq pour cent, on ne peut conclure que les taux de guérison sont identiques, mais seulement qu'on n'a pas mis en évidence de différence : une telle attitude de « non conclusion » peut être illustrée par une analogie : si on trouve l'arme du meurtre chez un accusé, on pourra conclure, avec un risque d'erreur, qu'il est le criminel, mais si on ne trouve pas l'arme, on ne conclut pas qu'il est innocent.

On comprend le progrès apporté par le test statistique : on conclut non d'après l'importance de la différence observée, mais d'après la probabilité d'obtenir une telle différence si les traitements sont équivalents.

La différence admise comme significative, un nouveau problème se pose : la différence peut-elle être attribuée aux traitements? Cette imputation causale n'est possible que si les deux groupes sont, à part les traitements, comparables à tous les points de vue.

On peut montrer que cela n'est réalisé que si les deux groupes de malades ont été obtenus par tirage au sort dans l'ensemble des 200 malades considérés et que les groupes ainsi constitués sont restés comparables pendant l'essai.

Connaissance ou décision

Parmi les nombreuses classifications des modèles, l'une des plus importantes porte sur la distinction entre les modèles de connaissance et les modèles de décision ou de prévision. Les modèles de connaissance ont d'une part, et les modèles de prévision ont d'autre part. La distinction entre connaissance et décision sont deux attitudes si différentes qu'elles devraient nécessiter des approches radicalement différentes. Toutefois, cette distinction est souvent mal perçue, conduisant à une mauvaise formulation des problèmes.

Le processus de tout essai visant à comparer les effets de traitements doit définir, avant de commencer, les définitions des effets, traitements, patients. Deux exemples montreront comment ces définitions peuvent revêtir des

différentes significations. Le mot « comparer » qui, contrairement aux apparences, est ambigu.

Les essais de connaissance

Soit à éprouver l'efficacité d'une nouvelle molécule, par exemple un hypocholestérolémiant ou un hypnotique. Pour attribuer une différence observée

aux traitements (problème d'imputation causale), il est essentiel que les deux groupes soient identiques, à part le traitement, et qu'ils le restent. Aussi les traitements doivent-ils être donnés avec le même mode d'administration (voie sanguine, ou bien voie orale, etc.) et sous une présentation identique (une pastille rouge n'a pas le même effet qu'une pastille verte). Plus généralement, la connaissance du traitement par le malade ou par son médecin peut provoquer, par autosuggestion ou par hétérosuggestion, des différences, non seulement dans l'appréciation des résultats, mais aussi dans l'évolution de la maladie. Pour éviter cela, on peut, on présentera donc les traitements sous des formes indiscernables, leur identité étant ignorée du malade (essai en «aveugle») et du médecin (essai en «double aveugle»). Si le groupe témoin peut ne pas être traité, on lui administrera un placebo, substance inerte imitant, dans sa présentation, le traitement à évaluer.

Les critères de jugement doivent être peu nombreux, un seul si possible : baisse du cholestérolémie ou nombre d'heures de sommeil.

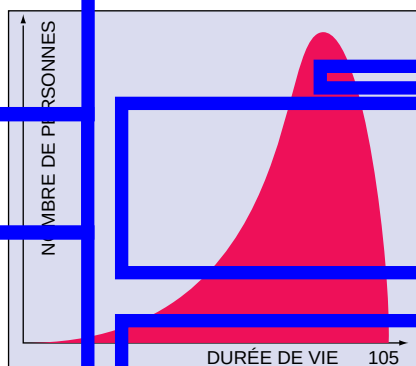
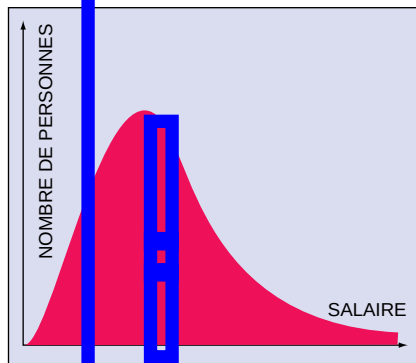
Les patients seront sélectionnés selon des critères d'optimisation : homogénéité de la population, représentativité étant secondaire. On teste une propriété pharmacologique vraisemblablement extrapolable d'une population à l'autre, l'essai prolongeant l'expérimentation sur l'animal. Enfin la comparaison sera effectuée par un test statistique. Cette démarche est celle de l'essai thérapeutique classique, qui est le plus couramment pratiqué.

Les essais de décision

Supposons que nous devions choisir entre deux traitements de la polyarthrite rhumatoïde : par exemple, entre un nouveau traitement de fond *N* et un traitement de fond classique *C*. Un essai de décision est entrepris pour déterminer quel traitement est le plus intéressant ou le plus utile dans ses conditions habituelles d'emploi.

L'un ou l'autre, à la fin de l'essai. Les quatre mots-clés du protocole doivent alors être définis d'une nouvelle façon.

On administrera le traitement nouveau *N* pour un groupe, le traitement classique *C* pour l'autre, chacun avec ses conditions d'administration optimales : la meilleure dose (il n'est pas question de donner des doses égales,



5. LA DISTRIBUTION des durées de vie après 20 ans (en bas) peut se ramener à une distribution log-normale, telle que celle des salaires (en haut), quand on considère la différence de la durée de vie à une valeur limite, égale à 105 ans dans la population féminine française, en 1969.

si les substances sont différentes), la meilleure voie d'administration, éventuellement les traitements adjuvants (si le régime sans sel est indiqué pour un des traitements, on ne privera pas de sel les patients de l'autre groupe). Ainsi on ne se préoccupe pas de réaliser des conditions égales, mais des conditions optimales.

Pour juger des résultats, on retiendra non seulement les nombreux critères cliniques et de qualité de vie, permettant d'apprécier l'état d'un malade souffrant de polyarthrite rhumatoïde, mais aussi les inconvénients de ces traitements. Il faudra ensuite bâtir, à partir de ces critères, un score exprimant le bilan. Il est cette fois indispensable d'avoir un échantillon représentatif de la population à tester. On choisira donc des conditions de l'essai. En effet, le résultat (*N* plus ou moins intéressant que *C*, dans un bilan global) n'est pas, comme la propriété pharmacologique testée dans le premier exemple, une conclusion de portée générale vraisemblablement extrapolable d'une population à l'autre.

Enfin la comparaison est l'élément le plus original de la démarche. Elle ne

se ramène pas à un simple choix. En premier lieu, dans un bilan, l'hypothèse soumise à un test, qui serait l'équivalence des deux traitements, n'a aucune raison d'être. En second lieu, un test statistique peut conduire à une non conclusion, alors qu'il faut, en l'occurrence, aboutir à un choix : on doit dire lequel des deux traitements est le plus intéressant.

La solution est à emprunter à la théorie de la décision. À Villejuif, avec Joseph Bresson, de l'Université Paris XI, nous avons mis au point une méthode simple : elle consiste à opter, sans test statistique, pour celui des deux traitements dont le bilan dans l'essai a été le meilleur, sous la condition que le nombre de sujets de l'essai, calculé à l'avance, minimise le risque que le traitement ainsi adopté soit le moins bon.

Le premier essai, qui vise à éprouver une hypothèse biologique, a tous les caractères d'une expérience de laboratoire. Le second, qui vise à tester le plus intéressant de deux traitements pour une population donnée, est une sorte de répétition générale, un banc d'essai des traitements en conditions réelles. La première démarche est une quête de connaissance : c'est l'attitude explicative. La seconde aboutit à une prise de décision : c'est une attitude pragmatique.

On croit facilement qu'un choix inapproprié à l'un quelconque des niveaux de décision est inévitable. Mais, du moins limitées, les conclusions d'un essai. Citons, à titre d'exemple, la célèbre étude sur l'effet de l'aspirine dans la prévention de l'infarctus du myocarde. Sur près de 260 000 sujets sollicités, les nombreux critères exigés pour la participation à l'essai n'ont laissé subsister que 22 000, soit huit pour cent.

L'incertitude n'était pas tant la réduction de l'effectif, qui est tout notable, que la non-représentativité résultant des critères de sélection. L'essai, de type explicatif, prouvait l'efficacité de l'aspirine, dans une population qui était déjà beaucoup, mais l'extrapolation à l'ensemble de la population n'était pas possible.

En particulier, la prise d'aspirine au long cours présente aussi des inconvénients, notamment un risque d'hémorragie. Les clauses d'exclusion éliminaient, entre autres, tous les sujets pour lesquels cet événement risquait

de se produire : l'échantillonnage n'était pas satisfaisant. C'est sans doute une erreur. Mais la communauté médicale n'a pas emboîté le pas d'emblée. Au fond, la démarche logique que l'on devrait adopter est : d'abord des tests sur l'animal, puis des essais cliniques chez l'homme en échantillons sélectionnés (essai explicatif), puis des essais chez l'homme en échantillon représentatif (essai pragmatique).

Néanmoins la recherche médicale s'est, presque toujours, limitée aux essais explicatifs. Le développement des essais pragmatiques a été lent, pour plusieurs raisons. D'abord parce que la méthode est nouvelle, donc mal connue. Ensuite parce qu'il y a un manque de rigueur : absence de test statistique, recherche d'une situation aussi voisine que possible de la pratique courante, soulesse dans la définition des traitements. Bref on se rapproche de la médecine quotidienne, ce qui fait craindre un retour à l'empirisme, alors qu'il s'agit d'un essai de rationalisation de la conduite médicale.

En revanche, ici comme dans d'autres domaines, un « effet SIDA » s'est révélé bénéfique : l'essai pragmatique est apparu soudain comme une panacée. La plupart des molécules étant toxiques, on a d'abord demandé que leur évaluation tienne compte d'un bilan coût-avantage. Ensuite il a paru intolérable que des essais, souvent très longs et portant sur des milliers de malades, risquent d'aboutir à la non conclusion, à la suite d'un test statistique. Enfin c'est surtout la définition des traitements qui pose problème. En raison de la toxicité, un pourcentage de malades ne les supportent pas et doivent les abandonner. En général, dans la comparaison de deux traitements A et B, ceux qui ne supportent pas A l'abandonnent au profit de B et réciproquement. La comparaison des deux groupes en ressort très affaiblie et, dans la plupart des cas, la différence est non significative.

C'est ici que l'attitude pragmatique est à l'œuvre. Elle consiste, en dehors de tout essai, dans les conditions de la pratique courante, c'est-à-dire que les sujets intolérants à A recevront B, et réciproquement. On ne comparera donc pas les traitements A et B, mais les stratégies « traitement A, puis traitement B si intolérance au traitement A » et « traitement B, puis traitement A si intolérance au traitement B » ; autrement dit,

on cherchera s'il faut d'abord administrer A, puis B, ou B, puis A. Remis en question par le SIDA, les essais pragmatiques sont revenus à l'ordre du jour, et nul doute qu'ils ne se répandront.

Il serait utile que la distinction soit perçue dans de nombreux domaines de recherche. En agronomie, par exemple, un chercheur voulut un jour comparer deux races A et B de haricots. Il constitua des parcelles de haricots A et des parcelles de haricots B. Les premiers poussaient tout en hauteur, les seconds formaient des boules s'étendant en largeur et se gênant dans leur croissance. L'agronome avait utilisé le même nombre de graines par mètre carré. Pourquoi ? Parce que, pour

comparer les deux groupes comparables pour tous les autres facteurs. Quelle fut la conclusion ? Rationalisation ? Le problème était de nature pragmatique. Il n'était pas de tester l'hypothèse, tout à fait invraisemblable, d'égalité des deux races, mais de choisir la meilleure. Il fallait donc donner à chacune ses chances optimales.

Les modèles

Qu'est-ce qu'un modèle ? Cette question, éludée par les philosophes, a été reprise avec l'idée que la réponse se concevait mieux à la lumière de quelques exemples. Nous avons annoncé qu'il y avait, dans l'utilisation du mot différences et points communs. Les différences sont évidentes : entre le modèle de conception, l'insémination artificielle et la théorie des signatures, elle saute aux yeux.

Cette différence existe d'ailleurs dans l'utilisation du mot en langage courant : on parle des petites filles modèles, du fusil modèle 1936, d'Harpagon comme modèle de l'avare, de la personne qui pose pour le magazine comme modèle scientifique, on justifie cette diversité en instituant des catégories : il y a les modèles dialectiques, parmi lesquels figurent les modèles mathématiques, et les modèles physiques (comme le pendule), les modèles biologiques (comme la souris, le modèle de l'homme pour l'étude d'un médicament).

D'autres parlent de modèles abstraits et concrets, mais la question reste le pourquoi de l'utilisation d'un même mot. Une définition courante du modèle est « instrument d'étude de la réalité », mais cette définition manque

de spécificité. On ne peut pas à un microscope, voire à un crayon ? Suzanne Bachelard dit plutôt « instrument d'intelligibilité ». Il faudrait ajouter « ou d'aide à la décision ». Même imparfaites, ces définitions mettent l'accent sur ce but commun des divers modèles, concrets comme abstraits. Ce but ressort clairement des exemples que nous avons présentés.

Nous avons dû faire un choix : ainsi nous avons ignoré les modèles à compartiments, qui sont des modèles d'éléments entre des départements qui communiquent, par exemple les échanges d'hormones entre divers organes. Les tels modèles font l'objet de nombreuses études, mais ils n'auraient rien ajouté à notre propos. Nous avons préféré retenir quelques modèles très différents et que nous avons nous-mêmes utilisés.

Certains pourront paraître s'écarter de la notion stricte de modèle. Le modèle probabiliste, par exemple, est-il vraiment un modèle ? Il en crée en tous cas pour la médecine thérapeutique avec le tirage au sort des patients, son protocole précis, un médicament administré à l'aveugle, n'est-il pas typiquement un modèle construit pour prouver la causalité ? Où s'arrêtera-t-elle la frontière des modèles ? Selon Boltzmann, l'hypothèse, la théorie, la science elle-même sont des modèles de la réalité.

Daniel SCHWARTZ est professeur émérite à la Faculté de médecine de Paris Sud.

Henri LEFDON, *Les enfants du désir*, éditions Julliard, 1995.

H. LEFRAS, *Lois de mortalité et âge limite*, in *Populations*, n° 3, 1976.

G. DAVID, *L'insémination artificielle et le système ECOS*, in *L'insémination artificielle* éditions Masson, 1991.

Ph. LEZARD, *La naissance prématurée*, in *L'anthropologie*, tome 90, n° 3, 1986.

G. BOUVINOT, E. ESCHWÈGE et D. SCHWARTZ, *Le médicament*, éditions de l'INSERM et Nathan, 1993.

J. M. LEGAY, *La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale*, éditions Informatique et biosphère.

D. SCHWARTZ, *Le jeu de la science et du hasard*, éditions Flammarion, 1994.

D. SCHWARTZ et J. LELLOUCH, *Exploratory and Pragmatic Attitudes in Clinical Trials*, in *J. of Chronic Diseases*, vol. 20, 1967.

La nature de l'espace et du temps

STEPHEN HAWKING • ROGER PENROSE

Deux éminents spécialistes de la relativité exposent leurs conceptions de l'Univers, son évolution, et l'impact de la théorie quantique.

En 1984, Stephen Hawking et Roger Penrose donnèrent une série de cours publics sur la relativité générale à l'Institut Isaac Newton de l'Université de Cambridge. Ces conférences ont été publiées cette année par Princeton University Press, sous le titre *The Nature of Space and Time*, et les extraits choisis dans cet ouvrage exposent les conceptions de ces deux scientifiques. Bien qu'ils partagent un héritage commun en physique – Penrose siégeait dans le jury de thèse de Hawking, à Cambridge –, les orateurs ont une vision différente de la mécanique quantique et de ses conséquences sur l'évolution de l'Univers. Ils s'opposent, en particulier, sur ce qu'il advient de l'information emmagasinée par un trou noir et sur la raison de la différence entre le début et la fin de l'Univers.

Stephen Hawking a découvert, dans les années 1970, que, par les effets tunnels quantiques, les trous noirs émettent des particules. Le trou noir s'évapore au cours du processus, de sorte qu'il ne subsistera peut-être plus rien de la masse originelle. Toutefois, pendant leur formation, les trous noirs engloutissent énormément de données : les types, propriétés et configurations des particules qui tombent dans le trou noir. L'information doit être conservée, mais ce qu'il en advient demeure l'objet d'un vif débat. Stephen Hawking et Roger Penrose pensent tous deux que, lorsqu'un trou noir rayonne, il perd l'information qu'il contenait. Toutefois Stephen Hawking prétend que cette perte est irrémédiable, tandis que Roger Penrose affirme que la perte est compensée par des mesures spontanées des états quantiques qui réintroduisent de l'information dans le système.

S'ils s'accrochent à la théorie quantique de la gravité pour décrire la nature, ils divergent sur certains aspects de cette théorie. R. Penrose pense que, même si les forces fondamentales de la

physique des particules sont symétriques dans le temps – inchangées après renversement du sens du temps –, la gravité quantique violera cette symétrie. Cette asymétrie temporelle expliquera alors pourquoi l'Univers était quasi uniforme au début, ainsi qu'en témoigne le rayonnement fossile vestige du Big Bang, tandis qu'à sa fin l'Univers sera fortement hétérogène.

R. Penrose tente d'incorporer cette asymétrie temporelle dans son hypothèse de la courbure de Weyl. Albert Einstein découvrit que la présence de matière déformait l'espace-temps, mais l'espace-temps ne possède pas une courbure intrinsèque dénommée courbure de Weyl. Les ondes gravitationnelles et les trous noirs, par exemple, permettent à l'espace-temps de se courber, même dans des régions vides. Au début de l'Univers, la courbure de Weyl valait probablement zéro, mais selon R. Penrose, dans un Univers moribond, les très nombreux trous noirs entraîneront une courbure de Weyl importante. Cette propriété distinguera la fin de l'Univers de son commencement.

S. Hawking convient que l'explosion primordiale (Big Bang) fut extrêmement chaude et dense, mais il ne souscrit pas à une asymétrie temporelle des lois de la nature. Pour lui, la raison sous-jacente de cette différence réside dans la manière dont l'évolution de l'Univers est programmée. Il postule une sorte de démocratie, déclarant qu'aucun point de l'Univers ne peut être particulier ; pour cette raison, l'Univers ne peut avoir de frontière. S. Hawking affirme que cette absence de frontière explique l'uniformité du rayonnement cosmologique.

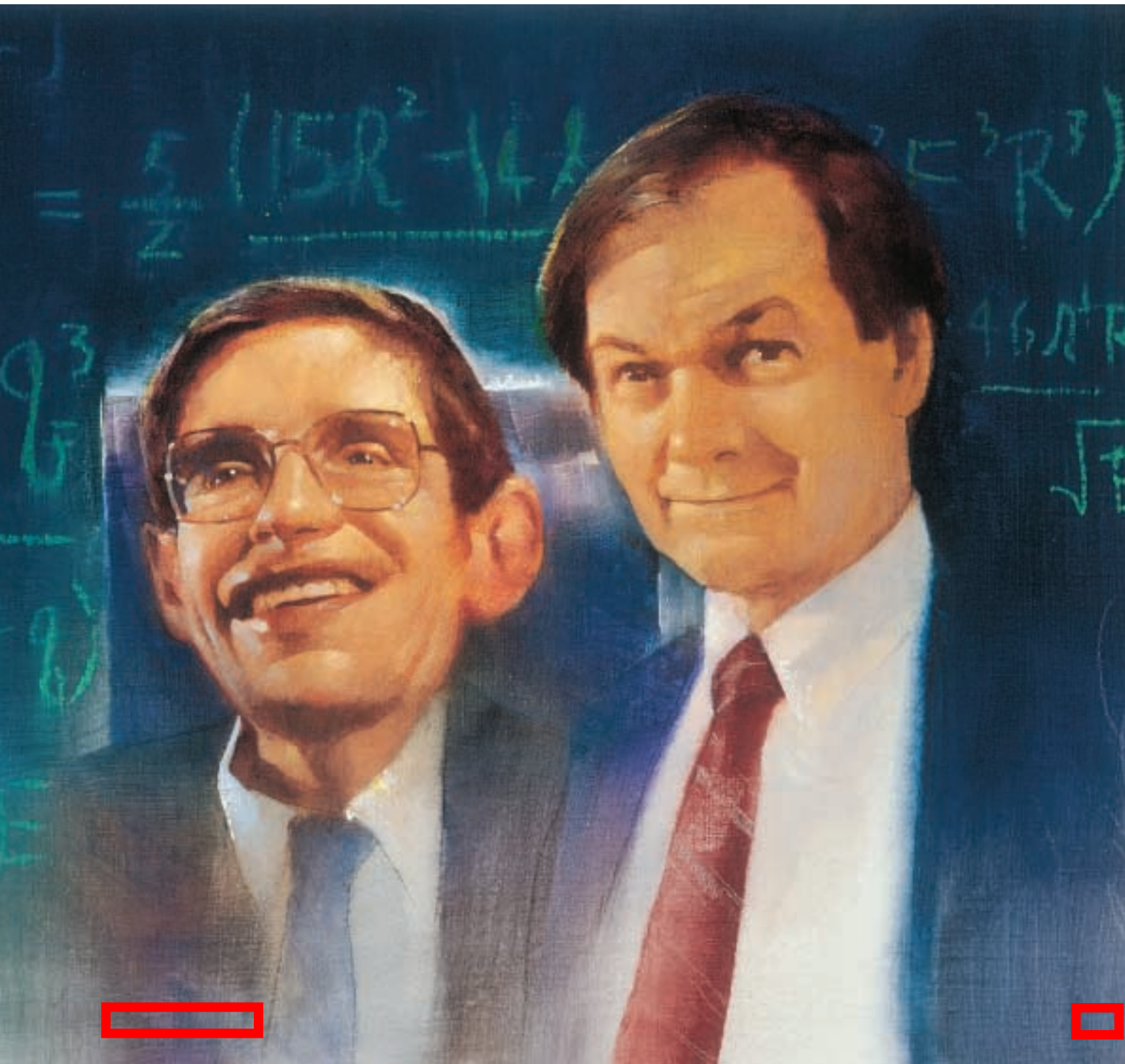
Les physiciens divergent, enfin, dans leur interprétation de la mécanique quantique. S. Hawking croit en l'interprétation dite « à la Copenhagen », selon laquelle les prédictions qui s'accordent aux données expérimentales. R. Penrose pense qu'une simple comparaison des prédictions et des expériences ne suffit pas à expliquer la réalité. Il fait remarquer que la théorie quantique requiert une « superposition » des fonctions d'onde, un concept qui peut conduire à des absurdités. Les physiciens reprennent donc les fils des célèbres débats entre Einstein et Niels Bohr sur les implications bizarres de la théorie quantique.

© 1996 Princeton University Press

© Éditions Gallimard, pour la traduction française établie par Françoise Balibar, à paraître dans la collection NRF Essais/Gallimard

Stephen Hawking, à propos des trous noirs quantiques

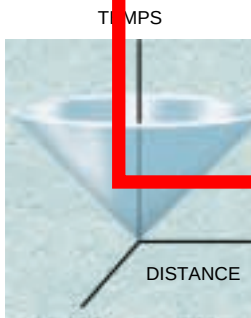
La théorie quantique des trous noirs [...] semble introduire un nouveau degré d'imprévisibilité en physique, au-dessus et par-delà l'incertitude habituellement associée à la mécanique quantique. Les trous noirs semblent avoir une entropie intrinsèque, qui mesure le nombre de configurations microscopiques possibles de l'Univers. Ces affirmations, il faut en convenir, sont controversées : nombre de ceux qui travaillent dans le domaine de la gravité quantique, ce qui inclut presque tous ceux qui y sont arrivés par le biais de la physique des particules, rejettent d'instinct l'idée que l'information sur l'état quantique d'un système physique puisse être perdue. Cela dit, leurs efforts pour montrer comment l'information peut sortir d'un trou noir n'ont guère été concluants. Je crois qu'au bout du compte ils seront obligés d'accepter ma suggestion selon laquelle de l'information est perdue, de même qu'ils sont convenus que les trous noirs rayonnent, à l'encontre de leurs opinions préétablies. [...]



PRESSION DE DÉGÉNÉRESCENCE

Deux électrons ou deux neutrons ne peuvent occuper le même état quantique. Donc, quand un ensemble de ces particules est comprimé dans un petit volume, celles qui occupent les états quantiques les plus élevés acquièrent beaucoup d'énergie. Le système résiste alors à toute compression supplémentaire, exerçant une poussée vers l'extérieur, appelée pression de dégénérescence.

CÔNES DE LUMIÈRE



Pour figurer l'espace-temps, les physiciens portent habituellement le temps sur un axe vertical et l'espace sur des axes horizontaux. Dans ce schéma, les rayons lumineux émanant de n'importe quel point de l'espace se déploient le long de la surface d'un cône vertical. Comme aucun signal ne peut couvrir une distance en un temps donné que la lumière, tout signal émanant de ce point est confiné à l'intérieur du volume du cône de lumière.

SURFACE NULLE

Une surface dans l'espace le long de laquelle voyage la lumière porte le nom de surface nulle. La surface nulle entourant un trou noir, appelée horizon des événements, est une coquille sphérique. Rien de ce qui tombe à l'intérieur de l'horizon des événements ne peut en sortir.

MOMENTS MULTIPOLAIRES

La dynamique d'un objet peut se résumer à la détermination de ses moments multipolaires. Chaque moment est calculé en divisant un objet en petits éléments, en multipliant la masse de chaque élément par une puissance de sa distance au centre et en sommant ces termes pour tous les éléments. Une sphère, par exemple, n'a qu'un moment monopolaire, alors qu'une haltère a un moment dipolaire, qui lui permet d'acquérir facilement un moment angulaire.

Comme la gravité est attractive, elle tend à rassembler la matière de l'Univers pour former des objets tels que les étoiles et les galaxies. Ceux-ci peuvent, pendant un certain temps, résister à la poursuite de la contraction, par leur pression thermique dans le cas des étoiles, ou par leur rotation et leurs mouvements internes dans le cas des galaxies. Finalement, la chaleur ou le moment angulaire ayant été évacués, l'objet stellaire se met à rétrécir. Si la masse est inférieure à environ une centaine de fois la masse du Soleil, l'objet est arrêté par la pression de dégénérescence des électrons ou des neutrons. L'objet se stabilise, donnant respectivement une naine blanche et une étoile à neutrons. Si la masse est supérieure à cette valeur limite, la contraction se poursuit. Quand l'objet, à force de rétrécir, atteint une certaine densité, les cônes de lumière sont inclinés vers l'intérieur. [...] On voit que même les rayons lumineux émergents sont courbés les uns vers les autres et finissent par converger au lieu de diverger. Cela signifie qu'il existe une surface fermée piégée. [...]

Il existe ainsi une région de l'espace-temps d'où il est impossible de s'échapper vers l'infini. À cette région, on donne le nom de trou noir. Sa bordure, dénommée horizon des événements, est une surface nulle du genre lumière formée par les rayons lumineux qui ne parviennent pas à s'échapper.

Une grande partie de l'information est perdue lorsqu'un corps s'effondre pour former un trou noir. Le corps qui s'effondre est décrit par un très grand nombre de paramètres, à savoir les différents types de matière et les moments multipolaires de la distribution de masse. Pourtant le trou noir qui se forme à partir de ce corps est complètement indépendant du type de matière et perd rapidement tous ses moments multipolaires, à l'exception des deux premiers : le moment monopolaire qui n'est autre que la masse, et le moment dipolaire, c'est-à-dire le moment angulaire.

Cette perte d'information n'avait guère d'importance en théorie classique. Comme le corps qui s'effondre était encore présente à l'intérieur du trou noir. Certes, il aurait été très difficile à un observateur extérieur du trou noir de décrire à quoi ressemble le corps qui s'effondre, mais, en théorie classique, c'était encore possible en principe. L'observateur était censé ne jamais perdre de vue le corps en train de s'effondrer. Celui-ci semblait ralentir et devenir de plus en plus pâle à mesure qu'il approchait de l'horizon des événements. L'observateur pouvait encore voir de quoi était fait le corps et comment était répartie la masse.

La théorie quantique des trous noirs change tout. Un corps qui s'effondre n'émet qu'un nombre limité de photons avant de traverser l'horizon des événements. Ces photons ne suffisent pas à transporter toute l'information relative au corps qui s'effondre. Autrement dit, en théorie quantique, il est impossible à un observateur extérieur de mesurer l'état du corps qui s'effondre. On pourrait croire que cela n'a guère d'importance, car l'information pourrait très bien se trouver encore à l'intérieur du trou noir, même s'il n'est pas possible de la mesurer à partir de l'extérieur. C'est là qu'intervient un second effet de la théorie quantique des trous noirs. [...]

La théorie quantique oblige les trous noirs à rayonner et à perdre de leur masse. Les photons émis emportent avec eux l'information contenue en leur sein. J'avancerai des arguments indiquant que cette information est réellement perdue et ne réapparaît pas sous une autre forme. Je montrerai que cette perte d'information devrait introduire en physique un nouveau niveau d'incertitude au-dessus et par-delà l'incertitude habituellement associée à la théorie quantique. Malheureusement, à la différence du principe d'incertitude de Heisenberg, la confirmation expérimentale de ce niveau supplémentaire est assez difficile à obtenir dans le cas des trous noirs.

Roger Penrose, sur la théorie quantique et l'espace-temps

Les grandes théories physiques du XX^e siècle ont été la théorie quantique, la relativité restreinte, la relativité générale et la théorie quantique des champs. Ces théories ne sont pas indépendantes : la relativité générale s'est édifiée sur la base de la relativité restreinte, et la théorie quantique des champs a été construite à partir de la relativité restreinte et de la théorie quantique.

On a pu dire que la théorie quantique des champs est la plus précise de toutes les théories jamais élaborées, sa précision étant d'environ 10^{-11} . Je voudrais pourtant faire remarquer que la relativité générale a maintenant été vérifiée à 10^{-14} près (et que cette précision n'est apparemment limitée que par celle des horloges terrestres). Je pense en affirmant cela au pulsar binaire PSR 1913 + 16 de Russell Hulse et Joseph Taylor, constitué de deux étoiles à neutrons en orbite l'une autour de l'autre, l'une d'entre elles étant un pulsar. La relativité générale prédit que cette orbite doit progressivement se rétrécir (et la période diminuer) parce que de l'énergie est perdue lors de l'émission d'ondes gravitationnelles. C'est effectivement ce qui s'est produit.

Le mouvement [...] est en accord avec la relativité générale (dans laquelle j'inclurai dorénavant la théorie newtonienne) ; et ce, avec la précision remarquable déjà signalée, sur une période de vingt ans. C'est à juste titre que l'on a décerné le prix Nobel aux deux « découvreurs » de ce système. Les physiciens quantiques ont toujours prétendu que, en raison de la précision atteinte par leur théorie, c'est la relativité générale de changer et de s'adapter à leur moule ; j'ai pensé qu'aujourd'hui c'est la théorie quantique des champs de changer.

Bien qu'ayant remporté des succès remarquables, les quatre théories citées ne sont pas sans poser des problèmes. [...] La relativité générale prédit l'existence de singularités d'espace-temps. En théorie quantique, il y a le « problème de la mesure », que je décrirai plus tard. On peut admettre que la solution de ces divers problèmes se trouve dans le fait que ces théories sont incomplètes en elles-mêmes. Par exemple, beaucoup de physiciens pensent par anticipation que la théorie quantique des champs pourrait « estomper » les singularités de la relativité générale. [...]

Examinons maintenant l'information qui est perdue dans les trous noirs, dont je soutiens qu'elle est reliée au dernier problème évoqué. Je suis d'accord avec presque tout ce que Stephen Hawking a dit. [...] L'information perdue du fait des trous noirs une incertitude supplémentaire introduite dans la physique au-dessus et par-delà l'incertitude de la théorie quantique, je la considère pour ma part comme une incertitude « complémentaire ». [...] Il se peut qu'une petite partie de l'information s'échappe au moment où le trou noir s'évapore [...] mais ce petit apport d'information sera bien inférieur à la perte d'information subie pendant l'effondrement (dans ce que je considère comme une représentation raisonnable de la disparition finale du trou).

Si nous enfermons ce système dans une grande boîte, c'est une expérience de pensée, mais elle est tout à fait réalisable dans l'espace des phases de la matière située à l'intérieur de la boîte. Dans la région de l'espace des phases correspondant aux situations où un trou noir est présent, les trajectoires de l'évolution physique convergent et les volumes le long de ces trajectoires rétrécissent. Cela à cause de l'information perdue dans la singularité à l'intérieur du trou noir. Ce rétrécissement contredit directement le théorème de la mécanique classique, qui porte le nom de théorème de Liouville, selon lequel les volumes dans l'espace des phases restent constants. [...] Un espace-temps contenant un trou noir ne

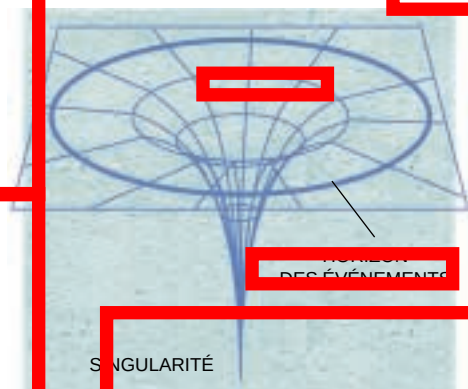
PULSARS

Certaines étoiles en fin de vie s'effondrent en étoiles à neutrons, objets massifs entièrement composés de neutrons entassés. Les étoiles à neutrons en rotation rapide deviennent des pulsars, ainsi appelés parce qu'ils émettent des impulsions de rayonnement électromagnétique à des intervalles extrêmement réguliers de quelques millisecondes. Un pulsar tourne parfois autour d'une autre étoile à neutrons, formant un système double.



SINGULARITÉS

Selon la relativité générale, dans des conditions extrêmes, certaines régions de l'espace-temps acquièrent des courbures infiniment grandes, devenant ainsi des singularités, où les lois normales de la physique ne s'appliquent plus. Les trous noirs, par exemple, devraient contenir des singularités dissimulées à l'intérieur de l'horizon des événements.



ESPACE DES PHASES

Un diagramme de l'espace des phases est un volume mathématique multidimensionnel. Dans cet espace, on représente, selon les axes de coordonnées, les positions et les quantités de mouvement de chaque particule. On peut alors représenter le mouvement d'un paquet de particules par un élément de volume mobile dans l'espace des phases.

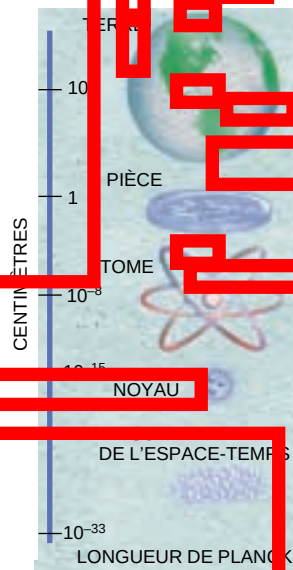
LE CHAT DE SCHRÖDINGER

Penrose évoque une expérience de pensée inventée par Einstein et utilisée par Erwin Schrödinger pour étudier les « boîtes conceptuelles » résultant de l'utilisation des fonctions d'onde. Avant toute mesure, un système est supposé se trouver dans une « superposition » d'états quantiques ou ondes, de sorte que la valeur de la vitesse, par exemple, est incertaine. Après la mesure, la valeur d'une quantité devient connue, et le système épouse soudainement l'un des états qui correspond au résultat. La signification de la superposition originelle et le processus par lequel le système se fige dans l'un des états sont les paraloges du chat de Schrödinger. Avant qu'on ne l'observe, le chat peut être à moitié mort et à moitié vivant.



LONGUEUR DE PLANCK

La longueur de Planck représente une distance très petite et inatteignable, reliée, par la mécanique quantique, à un intervalle de temps extrêmement bref et à une colossale énergie. Cette longueur émerge d'une combinaison des constantes fondamentales de l'attraction gravitationnelle, de la vitesse de la lumière et de la mécanique quantique. Cette longueur représente la distance à laquelle la relativité de l'espace, du temps et de matière ne s'appliquent plus et où une future théorie, la gravité quantique, doit prendre le relais.



INVARIANCE CPT (CHARGE-PARITÉ-TEMPS)

Ce principe posant requiert que les théories décrivant les particules doivent rester vraies, même lorsque la charge, la parité et le temps sont simultanément inversés. En d'autres termes, le comportement d'un électron de charge négative et de spin donné se déplaçant vers le futur est identique à celui d'un positon de charge positive et de spin inverse se mouvant vers le passé.

respecte donc pas cette loi de conservation. Toutefois, dans mon modèle, cette perte de volume de l'espace des phases est compensée par un processus de mesure quantique « spontanée » au cours duquel de l'information est gagnée et au cours duquel les volumes de l'espace des phases augmentent. C'est en ce sens que je considère l'incertitude due à la perte d'information dans les trous noirs comme « complémentaire » de l'incertitude de la théorie quantique : l'une est l'envers de la médaille de l'autre. [...]

Examinons l'expérience de pensée du chat de Schrödinger. Cette expérience décrit le sort tragique d'un chat enfermé dans une boîte où se trouve une arme à feu. Une source lumineuse émet un photon, la détection déclenche automatiquement la mise à feu d'un pistolet, qui tue le chat. Si l'isotope ne se désintègre pas, le chat reste vivant et bien-portant. (Je sais que Stephen Hawking a horreur qu'on maltraite les chats, même dans des expériences de pensée.) La fonction d'onde du système est une superposition de ces deux possibilités. [...] Comment expliquer que notre perception ne nous permette pas de percevoir ces superpositions macroscopiques, des états tels que « le chat est mort », et ne nous fasse percevoir que l'alternative macroscopique « le chat est mort » / « le chat est vivant » ? [...]

Je suggère que quelque chose ne marche pas dans les superpositions de géométries d'espace-temps alternatives, des superpositions qui doivent se produire dès lors que la relativité générale entre en jeu. Il se pourrait que la superposition de deux géométries différentes soit instable, et se décompose en l'un des deux termes de l'alternative.

Par exemple, les espaces temps d'un chat vivant ou d'un chat mort. À cette décomposition en l'un ou l'autre des deux termes de l'alternative, je donne le nom de réduction d'onde. Comment relie-t-on la longueur de Planck, 10^{-33} centimètre, à tout cela ? Il se pourrait que le critère qu'utilise la Nature pour déterminer quand deux géométries sont significativement différentes soit l'échelle de Planck, ce qui donne l'échelle de temps sur laquelle se produit la réduction sur l'un des deux termes de l'alternative.

La cosmologie quantique

Je terminerai cette conférence en évoquant un sujet sur lequel Roger Penrose et moi divergeons : la flèche du temps. Dans notre région de l'Univers, la direction du temps vers l'avant est nettement distincte de celle vers l'arrière. Il suffit de regarder un film passé à l'envers pour voir la différence. Les tasses, au lieu de tomber de la table et de se casser, se réparent toutes seules et sautent sur la table. Si seulement il en était ainsi dans la vie.

Les lois locales auxquelles obéissent les champs physiques sont symétriques par rapport au temps, ou plus précisément invariants par CPT (charge, parité, temps). La différence observée entre le passé et le futur doit donc provenir des conditions aux limites de l'Univers. Si l'Univers est infini, il n'y a pas de limites, qu'il se dilate jusqu'à atteindre sa taille maximale, puis s'effondre. Penrose a insisté sur le fait qu'il n'y a pas de limites, dans ce cas, l'Univers se comporte de façon très différente aux deux bouts de son histoire. Il serait uniforme et homogène au commencement de l'Univers. En revanche, au moment de son effondrement, il serait irrégulier et fortement hétérogène. Dans la mesure où il y a beaucoup plus de configurations désordonnées que de configurations ordonnées, cela signifie que les conditions initiales ont été choisies avec une précision incroyable.

Il apparaît que les deux extrémités du temps. Penrose a suggéré que le tenseur de Weyl doit s'annuler à l'une des extrémités du temps et pas à l'autre. Le tenseur de Weyl est cette partie de la courbure de l'espace-temps qui n'est pas déterminée localement par la matière via les équations d'Einstein. Elle doit être petite dans les premiers stades d'évolution régulière et doit être ordonnée, et grande pour un univers en effondrement. La suggestion de Penrose permet donc de distinguer les deux extrémités du temps ; elle est, de ce fait, susceptible d'expliquer la flèche du temps.

La proposition de R. Penrose m'apparaît irrecevable. Tout d'abord, elle n'est pas satisfaisante. R. Penrose a suggéré que le tenseur de Weyl doit s'annuler à l'une des extrémités du temps et pas à l'autre. Je soutiendrai dans un instant qu'il n'est pas nécessaire d'abandonner l'invariance CPT. Ensuite, si le tenseur de Weyl avait été exactement nul au début de l'Univers, ce dernier aurait été homogène et isotrope et le serait resté *ad vitam æternam*. Il n'aurait donc pas pu expliquer les fluctuations du fond de rayonnement cosmique, pas plus que les perturbations qui ont donné naissance aux galaxies et aux corps célestes, dont nous-mêmes.

Néanmoins, je pense que Penrose a mis le doigt sur une importante différence entre les deux extrémités du temps. Pour autant, le fait que le tenseur de Weyl ait été petit à l'une des extrémités ne doit pas être posé et imposé sous forme de condition *ad hoc*, mais être déduit d'un principe plus fondamental, la proposition «sans frontière», selon laquelle il ne doit pas y avoir de bord. [...]

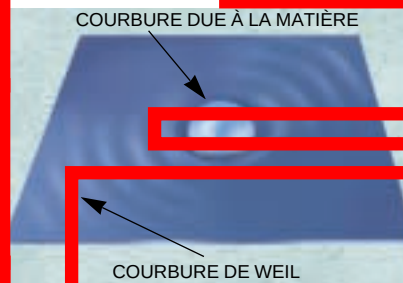
Comment les deux extrémités du temps peuvent-elles être différentes ? Pourquoi les perturbations sont-elles faibles à une extrémité et pas à l'autre ? La réponse est la suivante : il existe deux solutions complexes possibles des équations du champ. [...] Il est clair qu'une des solutions correspond à une extrémité du temps et l'autre à l'autre extrémité. [...] À l'une des extrémités, l'Univers était très régulier et homogène, et le tenseur de Weyl était très petit, voire exactement zéro, car cela aurait constitué une violation du principe d'incertitude. En revanche, il y avait de petites fluctuations qui par la suite se sont développées en galaxies et en corps tels que nous-mêmes. De façon toute différente, l'Univers devrait être très irrégulier et chaotique à l'autre extrémité du temps, avec un tenseur de Weyl grand. On pourrait ainsi expliquer la flèche du temps telle qu'elle est observée et pourquoi les tasses tombent de la table et se cassent, pourquoi elles ne se réparent pas toutes seules et ne sautent pas du sol sur la table.

Penrose sur la cosmologie quantique

D'après ce que je comprends de la position de S. Hawking, il ne me semble pas que notre différend soit si grand sur ce point [l'hypothèse sur la courbure de Weyl]. Pour une singularité initiale, la courbure de Weyl est approximativement nulle. [...] S. Hawking estime qu'il doit exister de petites fluctuations quantiques dans l'état initial ; il en conclut que l'hypothèse classique selon laquelle la courbure de Weyl doit être exactement zéro ne peut être raisonnable. Je ne pense pas que nous soyons vraiment d'accord. L'hypothèse selon laquelle la courbure de Weyl soit nulle à la singularité initiale est une idée classique, et un énoncé précis de l'hypothèse admet une certaine marge de manœuvre. De mon point de vue, rien n'interdit de petites fluctuations, certainement envisageables en régime quantique. Il faut simplement disposer d'un moyen de les astreindre à être très proches de zéro. [...] Peut-être la proposition selon laquelle il n'y a pas de bord de James Hartle et S. Hawking constitue-t-elle une candidature sérieuse à la description de la structure de l'état initial. Mais il me semble que, pour traiter l'état final, il nous faut autre chose, de très différent. En particulier, une théo-

TENSEUR DE WEYL

La courbure de l'espace-temps possède deux composantes. L'une découle de la présence de matière dans l'espace-temps, l'autre, mise en avant par le mathématicien allemand Hermann Weyl, apparaît même en l'absence de matière. La quantité mathématique décrivant cette courbure s'appelle le tenseur de Weyl.

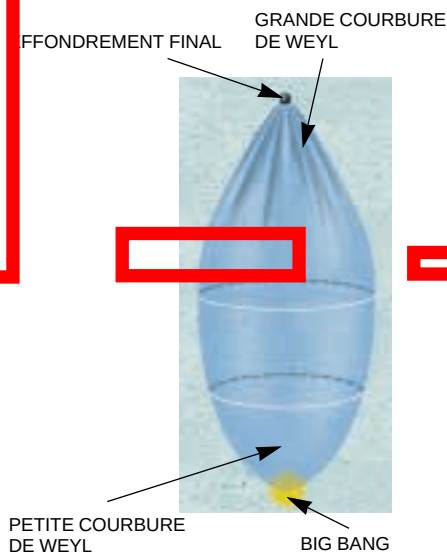


PROPOSITION «SANS FRONTIÈRE»

S. Hawking suggère que l'évolution de l'Univers est expliquée par la proposition «sans frontière», qu'il formule en 1983, avec James Hartle, de l'Université de Californie. L'idée que l'Univers ne possède pas de frontière impose des contraintes sur la résolution des équations de la cosmologie. S. Hawking croit que ces conditions conduiront à une fin de l'Univers différente de son état initial, déterminant ainsi la direction de la flèche du temps.

HYPOTHÈSE DE LA COURBURE DE WEYL

L'Univers, juste après le Big Bang, possède une petite courbure de Weyl, alors que, près de la fin du temps, la courbure de Weyl devient grande. R. Penrose suggère que cette courbure détermine ainsi la direction dans laquelle pointe la flèche du temps.



rie qui explique la structure des singularités devra violer [CPT et d'autres symétries] pour que puisse apparaître quelque chose de même nature que la courbure de Weyl. Cette brisure de la symétrie par renversement du temps pourrait prendre une forme extrêmement subtile et elle devrait être implicite dans la théorie à venir, qui doit aller au-delà de la mécanique quantique.

La physique et la réalité selon S. Hawking

Ces conférences ont été données par S. Penrose et moi. Il est platonicien ; je suis positiviste. Il est préoccupé par le fait que le chat de Schrödinger dans un état quantique est pour moitié vivant et pour moitié mort. Il a l'impression que cela ne peut correspondre à la réalité. Moi, cela m'est égal. Je n'exige pas d'une théorie qu'elle corresponde à la réalité, parce que je ne sais pas ce que c'est. La réalité n'est pas une qualité que l'on puisse tester avec du papier tournesol. Tout ce qui m'importe, c'est que la théorie prédise les résultats des mesures. C'est ce que fait à merveille la théorie quantique[...]

R. Penrose a introduit une violation de CPT dans son œuvre dans au moins deux situations : la cosmologie et les trous noirs. Je suis d'accord sur le fait que nous pouvons introduire l'asymétrie en temps dans la manière de poser les questions à propos des observations, mais je suis violemment opposé à l'idée qu'il existe un processus physique qui corresponde à la réduction de la fonction d'onde. Je suis opposé à l'idée de la réduction avec la gravité quantique ou avec la conscience. Pour moi, c'est de la magie, pas de la science.

La physique et la réalité selon R. Penrose

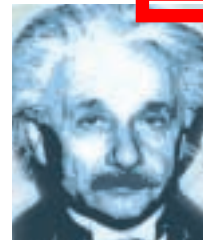
La mécanique quantique n'existe que depuis environ soixante quinze ans. C'est peu au regard, par exemple, de la théorie de la gravitation de Newton. Je ne serais donc pas étonné si la mécanique quantique devait être modifiée pour des objets très macroscopiques.

Lors de ce débat, S. Hawking a mentionné qu'il était positiviste et que j'étais réaliste. Qu'est-ce que ça veut dire ? Je ne sais pas, mais je crois en l'occurrence que ce qui est important c'est que je sois un réaliste. Si l'on compare ce débat au fameux débat qui a opposé Einstein et Bohr, il y a environ soixante-dix ans, il me semble que S. Hawking joue le rôle de Bohr et moi celui d'Einstein ! En effet Einstein soutenait qu'il devait exister un monde réel, non nécessairement représenté par une fonction d'onde, alors que Bohr insistait sur le fait que la fonction d'onde ne décrit pas un micromonde «réel», mais seulement la «connaissance» qui nous est nécessaire à la formulation de prédictions.

Bohr passe pour être sorti vainqueur de la discussion. De fait, si l'on en croit les biographies d'Einstein par Abraham Pais (1994), Einstein aurait tout aussi bien fait d'aller à la pêche à la ligne à partir de 1925. Il est vrai qu'il n'a plus accompli de grandes avancées, même si ses critiques pénétrantes ont été très utiles. Je pense que la raison pour laquelle Einstein n'a pas continué à faire avancer la théorie quantique tient à ce qu'il manquait à la théorie quantique un ingrédient essentiel. Cet ingrédient essentiel, S. Hawking l'a découvert cinquante ans plus tard : c'est le rayonnement du trou noir. Cette perte d'information, liée au rayonnement du trou noir, est un nouveau tournant.



NIELS BOHR



ALBERT EINSTEIN

Les éditeurs remercient de son aide Gary T. Horowitz de l'Université de Californie à Santa Barbara.

La prochaine génération de disques compacts

ALAN BELL

Un nouveau format de disque compact, nommé DVD, est né d'un accord entre les fabricants de produits électroniques. Les premiers lecteurs et les disques à ce format apparaîtront début 1997.

Depuis leur apparition, en 1982, six milliards de disques compacts audio (CD) et 400 millions de lecteurs de disques ont été vendus. Les CD-ROM, disques pour ordinateur analogues aux disques audio, ont le même succès : plus de 35 millions de lecteurs de CD-ROM auront été vendus en 1996. Des perfectionnements de ces disques apparaîtront dans les prochains mois : ils sont fondés sur un nouveau format, le DVD (l'acronyme de *digital versatile disc*, soit «disque numérique multimédia»). Au début de l'année 1997, dix grosses sociétés d'électronique présenteront leurs produits DVD, notamment des lecteurs de DVD-ROM et des lecteurs de DVD pour la projection de films.

Le format DVD est le résultat d'un accord sans précédent qui s'est conclu, à la fin de 1995, entre deux groupes concurrents de multinationales de l'électronique et des médias. Tous les participants à l'accord ont mis en commun les meilleurs de leurs produits ou de leurs systèmes, qui avaient été mis au point séparément. Les lecteurs de disques optiques de nouvelle génération liront aussi bien les disques compacts actuels que les DVD. Grâce à plusieurs innovations, les DVD stockeront jusqu'à 25 fois plus d'informations que leurs homologues classiques. En outre, les lecteurs de DVD de la première génération liront 11 millions de bits par seconde, neuf fois plus rapidement que les premiers lecteurs de CD-ROM.

Naturellement, de telles capacités de stockage et ces performances accrues favoriseront la mise au point

d'applications nouvelles. Sur les DVD comme sur les disques compacts, on enregistrera aussi bien de la musique que des films, des jeux ou d'autres produits multimédias. Toutefois, les DVD auront une capacité bien supérieure et restitueront leurs données avec une meilleure qualité. De surcroît, ils devraient inspirer des produits nou-

Par exemple, un film pourra être accompagné d'images prises sous des angles différents, de sous-titres ou de doublages dans plusieurs langues, ou bien encore de programmes interactifs de karaoké. Dans quelques années, des DVD-R (enregistrable une fois) et des DVD-ER (enregistrable et effaçable à volonté) seront commercialisés. Puis des caméscopes numériques stockant leurs informations sur des DVD-RAM devraient voir le jour.

Des petits trous, des petits trous

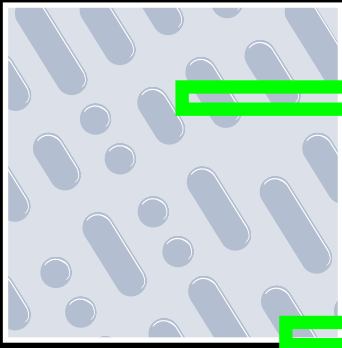
Les formats DVD et CD partagent la même technique de stockage optique : l'information est représentée par des cavités microscopiques, formées à la surface d'un disque de plastique

un modèle. La face «gravée» du disque est ensuite recouverte d'une mince couche d'aluminium, puis, dans le cas d'un CD, d'une couche de laque protectrice et d'une étiquette. Pour lire les données, le lecteur émet un faisceau laser très fin à travers le disque, vers la surface contenant les données, tandis que le disque tourne. L'intensité de la lumière réfléchie par la surface du disque varie en fonction de la profondeur (ou de la présence) de cavités sur la piste. Lorsqu'une cavité se trouve directement sous le faisceau de lecture, moins de lumière est réfléchie que lorsque le faisceau frappe une partie plane de la piste. Un photomètre convertit cette variation d'intensité lumineuse en chiffres binaires 0 et 1, qui codent numériquement l'information stockée.

Il existe deux différences essentielles entre les CD et les DVD. Tout d'abord, les DVD ont des pistes plus

petites : elles ne mesurent que 0,4 micromètre (millionième de mètre) de diamètre, contre 0,83 micromètre pour celles d'un CD. Ensuite, les pistes de données des DVD ne sont distantes que de 0,74 micromètre, tandis que 1,6 micromètre sépare les pistes d'un CD. Aussi, bien qu'un DVD ait presque la même taille qu'un CD, la piste qui y

1. LES NOUVEAUX DISQUES OPTIQUES DE STOCKAGE DE DONNÉES La différence des disques compacts actuels, deux couches de cavités qui codent les données (ces cavités sont montrées, grossies, dans le cartouche, en haut à gauche). Quand le disque tourne, ces indentations minuscules passent sous le faisceau d'un laser rouge, modifiant la quantité de lumière réfléchie. Un photomètre et un système électronique transforment ces variations en 0 et 1, qui codent les données. Le réglage de la position de la lentille permet au lecteur de lire les informations de la couche supérieure ou de la couche inférieure d'un DVD (disque numérique multimédia). La lumière traversant un hologramme, au centre de la lentille, se focalise en un second point, ce qui permet de lire les CD actuels.

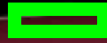
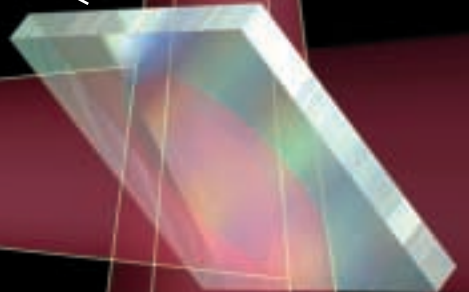


CAVITÉS DE DONNÉES

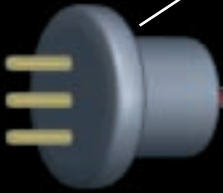
PHOTOMÈTRE



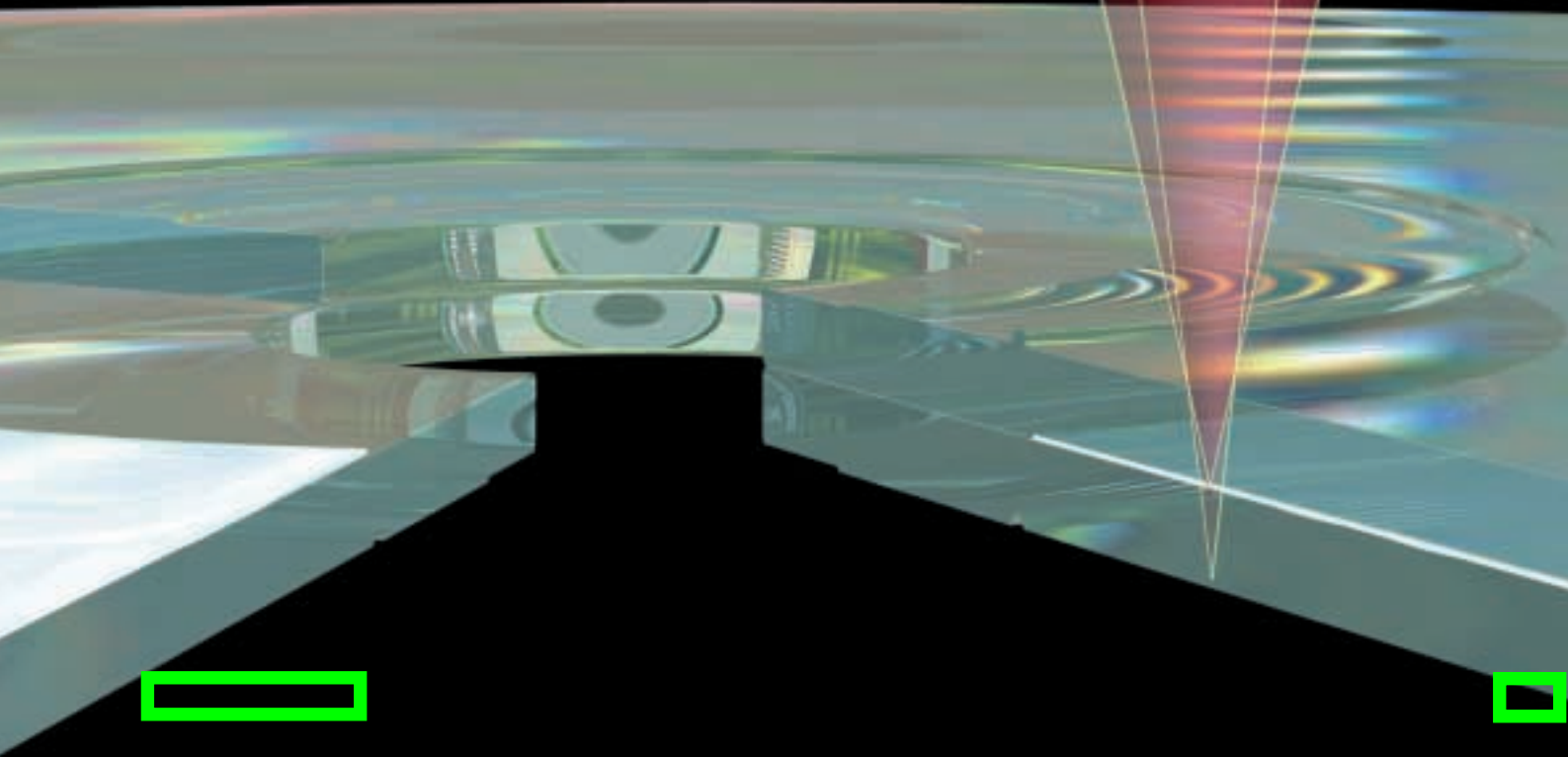
MIROIR



LASER



LENTILLE



stocke les données est longue de plus de 11 kilomètres, plus du double de celle d'un CD.

Naturellement, pour lire les plus petites cavités du DVD, le faisceau de lecture doit être mieux focalisé que celui d'un lecteur de CD. Il est émis par une diode laser rouge de longueur d'onde égale à 0,635 ou à 0,650 micromètre, tandis que les lecteurs de CD utilisent des lasers infrarouges de longueur d'onde supérieure (0,780 micromètre). En outre, les lecteurs de DVD utilisent une lentille possédant une ouverture numérique supérieure à celle des lecteurs de CD. Comme la focalisation maximale d'un système optique est proportionnelle au quotient de la longueur d'onde de la lumière par l'ouverture

par l'ouverture de la lentille, la focalisation supérieure permet de faire converger la lumière dans les petites cavités de la couche supérieure. Ces différences, alliées à l'efficacité supplémentaire du format DVD décrit dans la suite, expliquent la capacité de 4,7 gigaoctets de chaque couche d'informations d'un DVD.

Cette capacité de 4,7 gigaoctets – pour atteindre 9,4 gigaoctets – et presque doublée encore, jusqu'à 17 gigaoctets – grâce à deux autres inno-

vations. Bien que les DVD et les CD aient tous deux une épaisseur de 1,2 millimètre, les DVD possèdent deux couches superposées pouvant stocker les informations, alors que les CD n'en ont qu'une. Les couches d'un DVD sont disposées de façon à ce que la couche supérieure soit lue d'abord. Cette disposition protège les surfaces des poussières ou des rayures. Pour lire la couche supérieure du DVD, on lit la seconde face du DVD en retournant manuellement le disque dans le lecteur. Avec les disques multicouches, on peut lire les deux surfaces qui stockent l'information sans retourner le disque.

Une structure en sandwich

Dans un disque multicouches, la couche supérieure est recouverte d'un dépôt semi-réfléchissant. La réflexion

suffit à renvoyer le faisceau laser vers la couche inférieure, lorsque la lumière laser est réfléchi par la couche inférieure, les cavités de la couche supérieure sont floues. Comme elles réfléchissent alors peu de lumière, une er-

n'interfère pas avec la lecture de la couche inférieure. Pour compenser la faible perte de qualité de lecture inhérente à cette approche, on a ramené la capacité à 8,5 gigaoctets (au lieu de 9,4), ce qui explique pourquoi un DVD double face, double couche contient environ 17 gigaoctets. On assemble les deux couches à l'aide d'une pellicule transparente.

Le DVD à double couche a d'autres avantages que sa capacité supérieure : il réduit les erreurs dues à l'inclinaison et au voilage des disques. Tous les disques compacts finissent par se voiler et, lorsque la surface n'est plus perpendiculaire au faisceau laser, des erreurs de lecture surviennent. La dégradation du faisceau de lecture due à l'inclinaison est plus problématique à l'épaisseur des couches. Les couches d'un DVD épaisses de 0,6 millimètre

sont sensibles aux problèmes d'inclinaison que les CD, avec leur unique couche à une épaisseur double. Il existe toutefois d'autres raisons pour lesquelles le DVD est moins sensible à certaines formes de voilage.

Par exemple, les changements brusques de température ou d'humidité peuvent dilater ou contracter le

Un pour tous, tous pour un

Au début de 1995, il semblait encore peu probable que les disques compacts de seconde génération soient tous à la même norme : deux groupes de sociétés d'électronique grand public – l'un mené par les Sociétés *Sony* et *Philips* (co-inventeurs des premiers disques compacts), et l'autre conduit par les Sociétés *Toshiba*, *Matsushita* et *Time Warner* – avaient chacun leur propre projet. *Sony* et *Philips* proposaient le disque compact multimédia (CDMM), qui aurait contenu 3,7 gigaoctets sur un disque à une seule face, assez semblable au disque compact d'aujourd'hui, tandis que le groupe dirigé par *Toshiba* avait conçu un format nouveau, nommé SD (pour superdensité), capable de contenir cinq gigaoctets sur chaque face d'un disque double face.

Initialement, *Toshiba* reçut l'appui d'une partie de l'industrie du cinéma, qui pensait que le format SD était le seul qui permette de stocker sur un disque des films entiers avec une bande-son de haute qualité. D'un autre côté, beaucoup de fabricants se sentaient plus à l'aise avec le CDMM, une extension prudente du format CD, solidement éprouvé. Toutefois, ni les studios ni les sociétés informatiques ne voulaient deux formats incompatibles, car ils craignaient la répétition désastreuse de la bataille qui opposa les normes VHS et *Betamax* pour les vidéocassettes : l'introduction des deux formats avait été très lente jusqu'à ce que le format VHS domine, et les consommateurs infortunés ayant investi dans la technique *Betamax* furent lésés lorsque les fabricants de cassettes se rallièrent au format dominant. Un groupe de spécialistes du stockage de données, réuni par *Sony* et *Philips*

pour examiner leur format, élargit sa mission en examinant également le projet de *Toshiba*. Ces examens durèrent 18 mois. D'emblée, le groupe technique fixa clairement ses objectifs : parvenir à un seul format pour une famille de disques compatibles, à lecture seule et enregistrable.

En août 1995, un premier rapport était rendu : chaque format était acceptable pour les applications informatiques, mais il était inacceptable que les formats ne soient pas unifiés. Pourrait-on combiner les meilleurs éléments de chaque projet ? Les deux groupes en concurrence finirent par accepter qu'*IBM* arbitre les négociations et le 15 septembre, ils acceptèrent un format unique, qui empruntait au projet de *Toshiba/Time Warner* le disque mince et le programme correcteur d'erreurs, et au projet de *Sony/Philips* l'algorithme de modulation du signal.

Le 8 décembre, les derniers détails du format unifié étaient entérinés, et le nouveau format pour les disques à lecture seule était finalement annoncé sous le nom de DVD. Depuis, le groupe de travail poursuit son étude en collaboration avec les sociétés de la coalition pour le DVD, en se concentrant sur les aspects techniques des formats enregistrables, pour le DVD-R (DVD-Réwritable) et le DVD-RW (DVD-Réwritable une fois). Le groupe encourage aujourd'hui les sociétés à maximiser la compatibilité entre les DVD-ROM, DVD-RAM et DVD-R et leurs produits dérivés, y compris pour les divers environnements des applications, notamment les ordinateurs personnels et les systèmes de divertissements (consoles de jeux, livres électroniques, appareils photo numériques, etc.).

matériau du DVD. Cependant, comme celui-ci est symétrique, les changements dans une couche compensent ceux de l'autre, ce qui minimise le défaut total d'inclinaison.

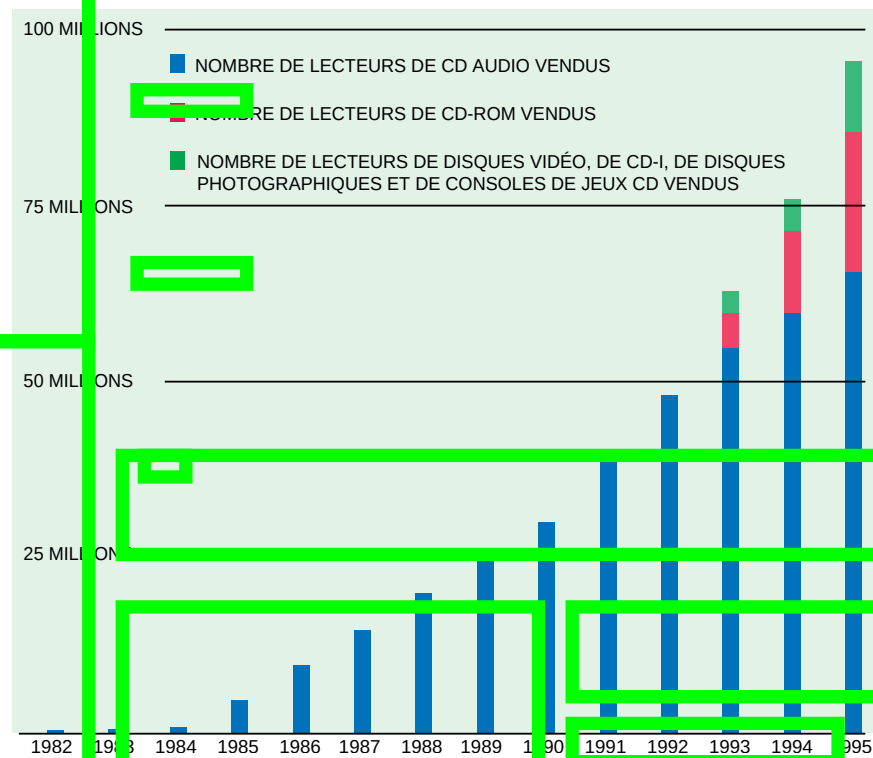
Comme les consommateurs ont déjà acheté beaucoup de CD audio et de CD-ROM, les fabricants ont voulu que les lecteurs de DVD lisent aussi bien les CD que les nouveaux disques. Cette polyvalence des lecteurs de DVD nécessitait des solutions techniques spécifiques. La solution la plus simple consistait à monter deux lentilles sur une tête optique unique – l'une prévue pour une couche de 1,2 millimètre d'épaisseur (CD, CD-ROM), l'autre pour une couche de 0,6 millimètre d'épaisseur (DVD) –, et à laisser l'utilisateur choisir celle qui serait utilisée, à l'aide d'un commutateur.

La solution retenue est plus élégante : une lentille moulée comprenant un hologramme en son centre est interposée entre le disque et le photomètre (voir la figure 1). La lumière traversant l'anneau

Plus de bits

Si les DVD contiennent plus de cavités que les CD, ils ont en outre plus d'informations par nombre de cavités, grâce à de nouvelles méthodes de codage. Quelle que soit la forme originelle des informations à enregistrer – donnée texte, son, image ou succession d'images –, les chiffres binaires 0 et 1 qui représentent directement l'information nommés bits utiles, doivent être protégés des erreurs introduites au cours de la fabrication : rayures, déformations, de rayures ou de la corrosion. Des programmes de contrôle et de correction

Néanmoins, les codes correcteurs d'erreurs des formats DVD sont extrêmement puissants : ils peuvent ainsi



LES VENTES DE LECTEURS DE DISQUES COMPACTS ont régulièrement augmenté depuis 1982, année de leur première commercialisation. Les CD-ROM, introduits en 1993, ont un succès considérable.

corrige une erreur s'étendant sur 2 000 octets, soit une erreur sur 100 000 de piste. Dans le format DVD, les données servant à corriger les erreurs occupent 10 pour cent de la capacité du disque contre 30 pour cent sur les CD). L'efficacité accrue des codes correcteurs de lecteur DVD résulte pour une large part de l'augmentation de la puissance de calcul des puces électroniques d'aujourd'hui.

Lors de l'enregistrement, les données utiles combinées aux données de correction d'erreur sont converties en «bits de modulation», qui sont les bits réellement représentés par les cavités à la surface du disque. Cette étape crée des cavités de tailles différentes, ce qui assure un suivi fiable lors de la lecture. Par exemple, on ne code pas une suite de zéros par une absence de cavités le long de la piste ; des cavités spéciales permettent au faisceau

de codage du format CD transforme huit bits (un octet) utiles en 17 bits de modulation. Le DVD utilise une méthode améliorée, qui transforme huit bits utiles en seulement 16 bits de modulation, tout en gardant la qualité originelle des CD. Comme moins de bits sont nécessaires pour représenter les bits utiles, le DVD contient plus d'informations utiles. Cette

particularité permet d'améliorer l'efficacité de stockage d'environ six pour cent par rapport au format CD.

Un film en disque

Le format DVD permettra pour la première fois le visionnage de films entiers munis d'un son numérique. Les bandes numériques utilisées dans les cinémas. Cette caractéristique soulève d'importants problèmes de protection des droits d'auteur (voir *Les droits d'auteur de œuvres numériques*, par Ann Okerson, page 74), mais le visionnage des films est l'utilisation principale pour laquelle les capacités et les performances du DVD ont été choisies.

Malgré la capacité accrue des DVD, les films ne peuvent être enregistrés que s'ils sont numérisés sous une forme comprimée (sans compression, un DVD de 4,7 gigaoctets de capacité ne pourrait contenir qu'un seul film).

On utilise à cette fin un mode de compression à débit variable, nommé MPEG2 : le degré de compression est ajusté en fonction de la complexité de la scène ; les scènes avec de nombreux détails et les actions rapides sont codées par plus de bits que les parties moins complexes. De ce fait, le débit des données comprimées varie

au cours de la lecture. Le mode de compression MPEG2 permet également à l'utilisateur de choisir le format d'image ou de film : soit le format ordinaire de la télévision (dont largeur et hauteur sont dans un rapport 4/3), soit le format 16/9 de type cinéma.

L'augmentation de la capacité des disques permettra aussi d'améliorer la qualité du son. Comme le sait quiconque a vu *Le grand bleu* ou *Diva* dans un bon cinéma, une bande-son de haute qualité accroît le plaisir du spectateur. Le format de film sur DVD offrira deux méthodes de codage du son : soit le système AC-3 multivoies (5.1) des Laboratoires *Dolby*, soit la méthode de modulation par impulsions codées (méthode DPCM), la compression à débit variable des signaux audio (le codage MPEG audio). Le système *Dolby* code le son avec un signal au débit de 448 000 bits par seconde, pour créer cinq pistes audio indépendantes de qualité équivalente à celle d'un CD, ainsi qu'une sixième voie consacrée aux effets sonores basse fréquence. Ainsi s'explique la désignation «5.1» : cinq canaux, une spécification de DVD pour les disques

purement audio – successeurs des disques compacts audio – ne sont pas encore complètement établies, dans l'attente d'informations venant de l'industrie de l'enregistrement des disques musicaux et d'institutions indépendantes telles que la Société internationale des ingénieurs en acoustique (*Audio Engineering Society*).

La capacité accrue des DVD permettra le perfectionnement ou la création de jeux vidéo et de produits de divertissement ou éducatifs, à un coût de production inférieur à celui des actuels *Amiga* des *Seem* à réduire leurs coûts à quelques malheureux 680 mégaoctets, les auteurs d'applications multimédias auront bien sûr le luxe de chercher à remplir des disques double couche de 8,5 gigaoctets de couches d'une capacité totale de 17 gigaoctets.

Disques inscriptibles à lasers bleus

Jusqu'ici, nous n'avons considéré que les disques à film. Les disques à laser sont enregistrés sous forme de petites cavités, mais

des DVD enregistrables devraient être commercialisés en 1998. Ces DVD-RAM, ainsi que des DVD-R (enregistrables une fois), promettent d'être bien plus puissants et pratiques que les CD correspondants : alors que les systèmes d'enregistrement optique de ces derniers se fondent principalement sur la technique magnéto-optique, le support d'enregistrement des DVD-RAM sera plus probablement un matériau qui change de phase : un film mince, polycristallin, déposé à la surface d'un substrat du disque. Pour enregistrer chaque bit, une impulsion laser, intense mais brève, fond une région sub-micrométrique du film. Comme le matériau se refroidit très vite, la région fondue se recristallise pas et se fige dans un état amorphe, désordonné, qui réfléchit moins bien la lumière que la phase cristalline. Cette différence de réflexion assure ensuite le décodage des données par un faisceau laser «lecteur» de faible intensité, qui ne refond pas le matériau.

Les ingénieurs ont trouvé plusieurs matériaux assez sensibles pour enregistrer des données, assez stables pour conserver celles-ci et assez durables pour supporter des centaines de milliers de cycles d'enregistrement et d'effacement. L'enregistrement à changement de phase a plusieurs avantages : comme le codage correspond simplement à des variations d'intensité de la lumière réfléchie par le disque, on peut lire des DVD-RAM à l'aide des mêmes têtes optiques que celles des lecteurs de DVD-ROM (la lecture magnéto-optique, elle, requiert des changements de la polarisation du faisceau de lecture). Aussi, le lecteur enregistreur de DVD-RAM n'a pas besoin de matériaux à changement de phase et serait pas beaucoup plus cher que le lecteur de DVD-ROM. En outre, il n'y a pas d'impossibilité technique à ce que les DVD-RAM soient lus par les lecteurs de DVD-ROM.

La variété des supports amovibles de stockage est aujourd'hui déroutante : disquettes de petite ou de grande capacité, disques durs amovibles, disques magnéto-optiques, plusieurs sortes de bandes magnétiques... Personne ne prévoit que les lecteurs-enregistreurs DVD-RAM remplaceront les disques durs magnétiques, dont les performances sont extraordinaires, mais ces systèmes

Comparaison entre le DVD et le CD			
Caractéristique	Ancien format (CD)	Nouveau format (DVD)	Remarque
Diamètre du disque	120 millimètres	120 millimètres	
Structure du disque	Une couche de 1,2 millimètre d'épaisseur	Deux couches de 0,6 millimètre d'épaisseur chacune	
Taille minimale des cavités	0,83 micromètre	0,4 micromètre	
Longueur d'onde du laser	0,780 micromètre (infrarouge)	0,635 et 0,650 micromètre (rouge)	
Capacité	Une couche, 700 mégaoctets au total	Deux couches, 8,5 gigaoctets par face, soit 17 gigaoctets au total	
Ouverture numérique	0,45	0,60	
Densité de piste	6 000 pistes par centimètre	13 000 pistes par centimètre	
Densité en bits	17 000 bits par centimètre	38 000 bits par centimètre	
Débit de transfert des données	1,2 à 4,8 mégabits par seconde	11 mégabits par seconde	
Densité des données	105 mégabits par centimètre carré	508 mégabits par centimètre carré	

seront de bons supports amovibles de lecture et d'écriture de données. Comme le coût de stockage sur des DVD enregistrables pourrait descendre à un centime par mégaoctet, les nouveaux lecteurs-enregistreurs pourront s'imposer comme le format universel de distribution de données.

Un unique lecteur-enregistreur de DVD-RAM pourrait alors accueillir de nombreuses applications actuelles et futures des ordinateurs personnels, notamment les programmes de traitement de texte, la PAO (publication assistée par ordinateur), le transfert de données, l'archivage et la sauvegarde de données.

Les concepteurs du format DVD ont prévu les progrès futurs. Par exemple, des lasers de plus courtes longueurs d'onde (émerillon bleu) permettront peut-être de doubler encore la densité des données (voir *Les lasers bleus* par Robert Gunshor et Arto Nurmikko, page 60). Ainsi des dérivés de la technique de base du DVD pourront nous servir 50 gigaoctets sur un plateau de 1,2 millimètre d'épaisseur, soit une petite bibliothèque sur un seul disque.

De nombreux spécialistes paracheveront les spécifications de la famille unifiée des formats DVD. Ils s'efforcent de faire les choix techniques qui sont les plus compatibles avec la fonctionnelle aux applications futures, dont beaucoup ne sont même pas conçues. De la même façon que la télévision a rapidement évolué pour devenir bien plus qu'une radio avec des images, les applications issues du nouveau format devraient évoluer de façon surprenante et imprévisible dans les années à venir.

Alan BELLI, ingénieur de la Société IBM, était président du groupe d'experts qui spécifia les caractéristiques des DVD.

Ken C. POOLMANN, *The Compact Disc Handbook*, in *The Computer Music and Digital Audio Series*, vol. 3, A-R Editions, Madison, Wisconsin, 1992.

Des informations sur les DVD :

- <http://www.sel.sony.com/SEL/consumer/dvd/index.html>
- <http://www.toshiba.com/tacp/SD/>
- <http://www.philips.com/pkm/laseroptics/dvd/>

Chers lecteurs,

POUR LA

SCIENCE

a le plaisir de vous annoncer pour répondre à vos attentes, le lancement, dès son édition d'octobre 1996, d'une nouvelle section :

«CARRIÈRE, EMPLOI, CONFÉRENCE ET FORMATION»

L'objectif de cette section d'annonces classées est de vous proposer, chaque mois, des offres d'emploi, des formations, de vous informer sur les prochains événements en relation avec vos divers domaines d'activités.

Nous vous invitons donc à nous consulter dès le 1^{er} octobre prochain. Si vous avez des postes à pourvoir, des conférences à annoncer, des formations à présenter, n'hésitez pas à contacter :

FABIEN SAVENAT

POUR LA SCIENCE / nature

RUE JOSEPH GARNIER 75008 PARIS

TÉL : 43 67 42 21 / FAX : 43 67 42 19

Afin d'obtenir un complément d'informations et bénéficier de notre offre exceptionnelle !

*Date limite de réservation, pour le numéro spécial lancement, le 6 septembre 1996

Les lasers bleus

ROBERT GUNSHOR • ARTO NIEMI

De nouveaux semi-conducteurs permettent de fabriquer des lasers miniatures qui émettent de la lumière bleue. Ces lasers bleus liront des disques compacts contenant bien plus d'informations qu'aujourd'hui.

L'élément essentiel des lecteurs de disques compacts est un laser minuscule, mais puissant, qui émet un faisceau lumineux très fin. Celui-ci, tel le diamant de nos vieux tourne-disques, lit les données du disque et lit des informations gravées sous la forme de minuscules cavités, dont la taille minimale est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière émise par le laser ; plus la longueur d'onde est courte, plus les cavités peuvent être petites et plus la quantité d'informations enregistrables sur un seul disque est importante.

Aujourd'hui, les lasers des lecteurs de disques compacts sont fabriqués à partir d'arséniure de gallium et d'autres semi-conducteurs qui, lorsqu'ils sont excités, émettent un rayonnement infrarouge d'environ 0,82 micromètre de longueur d'onde. Ce rayonnement permet de détecter des cavités dont la taille est d'environ un micromètre (un cinquième de l'épaisseur d'un cheveu). Comme le décrit l'article précédent (voir *La prochaine génération de disques compacts*, par Alan Bell, page 54), des améliorations des lasers semi-conducteurs rouges augmentent déjà cette densité d'informations, mais des diodes laser qui émettaient une lumière bleue de 0,46 micromètre de longueur d'onde détecteraient des cavités dix fois plus petites que les meilleurs lasers rouges. Gravé avec ces cavités plus petites, un disque compact contiendrait les neuf symphonies de Beethoven gravées sur une seule aujourd'hui. Les applications multimedias, qui nécessitent la numérisation de grandes quantités de données audiovisuelles, se développeraient plus facilement.

Pourquoi l'industrie ne dispose-t-elle pas encore de lecteurs de disques compacts à laser bleu ? L'examen du fonctionnement des lasers à semi-

conducteurs le révèle. Ces systèmes sont des puits cristaux de grande pureté et de grande perfection cristalline, séparés en deux régions principales dont les caractéristiques électriques sont différentes. Dans la zone de type *n*, le courant électrique est transporté par des électrons ; dans la zone de type *p*, ce sont des trous, des défauts électroniques analogues à des particules chargées positivement, qui assurent la conduction. Lorsqu'une tension électrique positive est imposée entre la zone de type *p* et la zone de type *n*, les électrons et les trous circulent en sens inverse, en direction de l'interface des deux zones.

Cette interface est une couche très mince nommée « puits quantique » : les électrons et les trous qui y entrent y restent piégés, se combinent deux à deux et disparaissent. Dans certaines conditions favorables, leur combinaison s'accompagne de l'émission d'un photon ou particule de lumière. Quand l'émission de photons est couplée à un mécanisme de réinjection, assuré par un paire de miroirs très réfléchissants placés de chaque côté du dispositif, une émission laser se produit : tous les photons sont émis à la même longueur d'onde et avec la même phase, selon la même direction.

La longueur d'onde de la lumière, dépend d'une grandeur électronique intrinsèque du matériau, la bande interdite, c'est-à-dire l'énergie minimale qu'il faut fournir au matériau pour créer simultanément un électron et un trou.

La largeur de la bande interdite de l'arséniure de gallium est de 1,45 électron-volt. Pour obtenir une lumière bleue, la bande interdite doit être presque deux fois plus large : on doit utiliser d'autres semi-conducteurs, des matériaux à large

bande interdite, tels le sélénium de zinc et le nitride de gallium. Ces matériaux de types respectifs II-VI et III-V (les éléments qui les constituent sont repérés d'après leur position dans le Tableau périodique de Mendeleiev) devraient être nommés « semi-isolants » plutôt que semi-conducteurs : leur résis-

1. LES LASERS BLEUS permettront d'enregistrer et de lire beaucoup plus d'informations qu'aujourd'hui sur les disques compacts. Pour évaluer leur potentiel, on utilise des cristaux qui transforment le rayonnement d'un laser infrarouge en lumière bleue. À l'avenir, de minuscules cristaux de semi-conducteur produiront directement un faisceau laser bleu.

tivité électrique est l'un des principaux obstacles à leur utilisation.

Les débuts des bleus

Au début des années 1980, des physiciens et des chimistes ont commencé à fabriquer des cristaux semi-conducteurs II-VI en utilisant la technique d'épitaxie par jet moléculaire : des jets des atomes à réunir sont envoyés dans une enceinte à ultravide, vers un substrat. Là, le cristal souhaité se forme par empilement des atomes, exactement comme on construit un mur brique par

gée de briques après rangée de briques. On a ainsi fabriqué des matériaux de formule chimique précise, avec une grande qualité cristalline. La mise en œuvre de la technique a amélioré la compréhension du comportement des couches qui servent de puits quantique, et l'on a obtenu des matériaux qui émettaient des photons bleus et verts (la lon-

gueur d'onde du vert est un peu supérieure à celle du bleu). Toutefois, la mise au point de diodes laser bleues et vertes n'était pas achevée, car ces premiers dispositifs n'émettaient de la lumière que lorsqu'ils étaient excités par un autre laser, beaucoup plus gros.

L'étape suivante, c'est-à-dire la réalisation de diodes laser bleues et vertes activées par une tension électrique, a pris dix ans. Les physiciens savaient fabriquer des cristaux de sélénure de zinc qui contenaient un excès d'électrons, mais pas de cristaux de ce maté-

autrement dit, on ne savait pas fabriquer de véritable diode. En 1990, une équipe a perfectionné l'incorporation d'atomes d'azote, lors de l'épitaxie, fabriquant du sélénure de zinc qui contenait un excès de trous. L'année suivante, des ingénieurs de la Société 3M et nos équipes, aux Universités Purdue et Brown, ont obtenu les premières diodes laser bleues

et vertes. Ces lasers ne fonctionnaient pas en continu, et nous devions les refroidir par de l'azote liquide, à une température de 77 kelvins (-196°C). Ces dispositifs ont toutefois été améliorés rapidement, afin qu'ils fonctionnent en continu à 77 kelvins et par impulsions à la température ambiante.

À l'automne 1993, des physiciens de la Société Sony et de notre équipe ont fait fonctionner en continu, pendant plusieurs dizaines de secondes et à température ambiante, une diode laser excitée par une tension de seulement cinq volts. Cette réalisation était un véritable

diodes laser bleues et verts nécessitaient une tension de 30 volts) résultait de nouvelles et astucieuses techniques de fabrication des matériaux. Plus récemment, la Société Sony a fabriqué une diode laser qui émet une lumière verte de longueur d'onde égale à 0,52 micromètre, en continu pendant environ 100 heures à température ambiante. Nous avons



réalisé un laser bleu qui émet à la longueur d'onde de 405 nm, dans le mode pulsé, à température ambiante. Ces durées de fonctionnement sont insuffisantes pour des applications pratiques, mais nous restons optimistes : les mêmes difficultés se sont présentées lors de la mise au point des diodes laser infrarouges en arséniure de gallium qui équipent aujourd'hui tous les lecteurs de disques compacts.

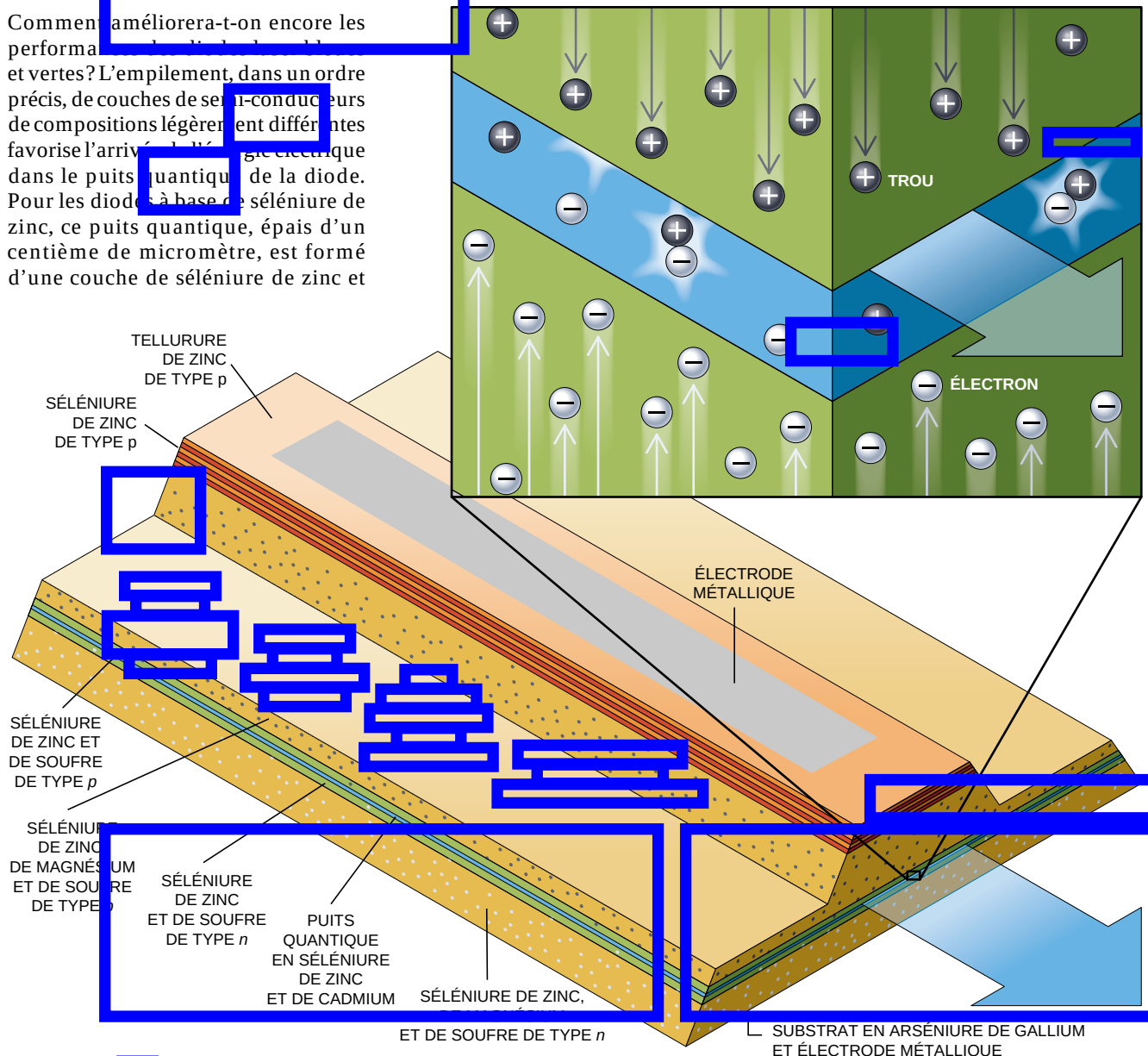
La ligne bleue des lasers

Comment améliorera-t-on encore les performances de ces diodes bleues et vertes ? L'empilement, dans un ordre précis, de couches de semi-conducteurs de compositions légèrement différentes favorise l'arrivée d'énergie électrique dans le puits quantique de la diode. Pour les diodes à base de sélénium de zinc, ce puits quantique, épais d'un centième de micromètre, est formé d'une couche de sélénium de zinc et

de cadmium, entourée de deux couches de sélénium de zinc et de soufre, matériel qui a des propriétés isolantes (voir la figure 2). Cet empilement guide les photons émis et engendre le mécanisme de réinjection.

Intuitivement, l'interaction d'un électron et d'un trou semble aboutir inéluctablement à une recombinaison, mais les étrangetés du monde microscopique, décrites par la physique quantique, compliquent un peu le mécanisme : les élec-

trons et les trous forment des paires nommées excitons, dont la cohésion est due à l'attraction électrostatique entre charges de signes opposés. Normalement, à température ambiante, les vibrations du cristal brisent ces paires ; de même, si beaucoup de particules sont accumulées dans une petite région, leurs collisions brisent les excitons. Toutefois, dans une couche mince de semi-conducteur à large bande interdite tel que le sélénium de zinc et le cadmium, les



2. LES CRISTAUX SEMI-CONDUCTEURS n'émettent une émission laser que si leur structure est perfectionnée (ci-dessus) : deux couches minces de sélénium de zinc et de soufre (en vert) doivent entourer une fine couche de sélénium de zinc et de cadmium (en bleu). La couche supérieure de sélénium de zinc et de soufre contient un excès de trous ; la couche inférieure, un excès d'électrons. Quand une tension électrique est appliquée aux couches extérieures du cristal, les électrons et les trous se déversent dans la couche de sélénium de zinc et de cadmium, où ils se combinent en émettant des photons (à droite).

Des couches de sélénium de zinc, de magnésium et de soufre forment un guide optique. La couche inférieure de sélénium de zinc, de magnésium et de soufre comporte un excès d'électrons ; elle est déposée sur un substrat d'arséniure de gallium, relié à une électrode métallique de potentiel électrique négatif. Au-dessus de la couche de sélénium de zinc, de magnésium et de soufre qui contient un excès de trous, on dépose une alternance de couches de sélénium de zinc et de tellure de zinc qui assurent le contact électrique avec une électrode métallique de potentiel positif.

Les bleus français

En France, depuis 1993, le Centre de recherches sur l'hétéroépitaxie et ses applications (CRHEA) du CNRS, à Valbonne, dirigé par Jean-Pierre Faurie, étudie des semi-conducteurs à large bande interdite pour obtenir une émission laser aux longueurs d'onde du violet au rouge. Les deux filières, séléniure de zinc et dérivés, et nitrure de gallium et dérivés, sont explorées en parallèle. Au premier trimestre de 1995, nous avons fabriqué (à base de séléniure de zinc) la première diode laser bleue française, qui émettait en mode pulsé à basse température.

Nous recherchons à la fois à améliorer le fonctionnement des diodes laser et à comprendre les propriétés physiques des semi-conducteurs. Comme l'interface du substrat en arséniure de gallium et de la structure à base de séléniure de zinc est une source de défauts cristallins qui finissent par détruire les diodes laser, nous cherchons à optimiser cette interface ou à contourner le problème, en utilisant un substrat en séléniure de zinc, sur lequel nous réalisons une homoépitaxie. Le Laboratoire CNRS de physique des solides, à Bellevue, nous a fourni des monocristaux massifs de séléniure de zinc de qualité suffisante pour être utilisés comme substrats. Nous avons mis au point une méthode de préparation de ces cristaux, nous avons étudié l'épitaxie du séléniure de zinc sur ces cristaux : nous obtenons des couches homoépitaxiales de qualité supérieure à celles qui sont déposées sur d'autres substrats. Nous pouvons maintenant commencer la fabrication de dispositifs opto-électroniques sur substrats de séléniure de zinc.

Nous cherchons aussi à utiliser un autre élément chimique, le béryllium, dans les structures à base de séléniure de zinc. Nous espérons doper et créer des images de selenium, zinc, magnésium et béryllium de bande interdite plus large que le séléniure de zinc, de magnésium et de soufre. Les électrons et les trous y seraient mieux confinés, ainsi que le faisceau laser. En outre, le

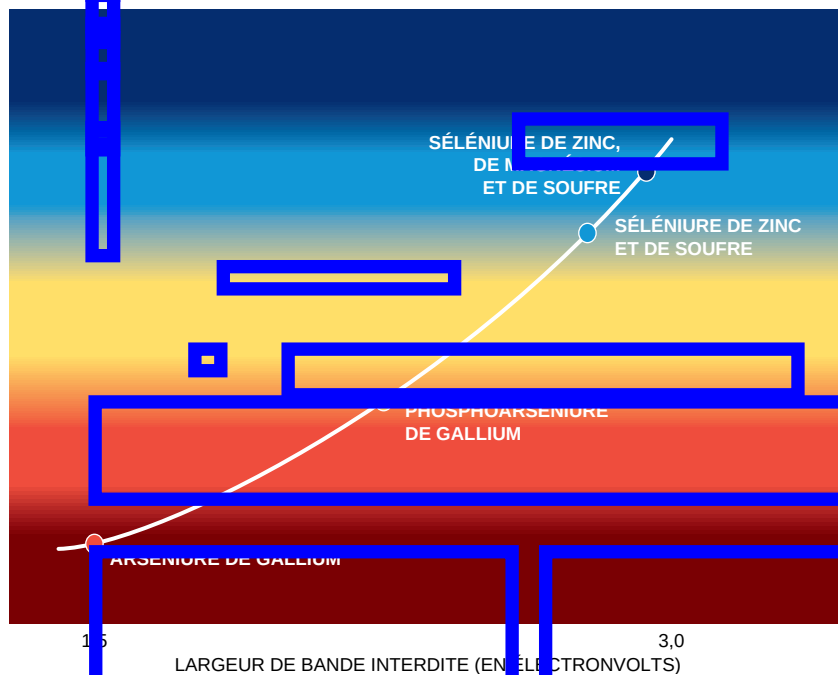
caractère de ces couches de béryllium dans le séléniure de béryllium nous permettrait de contrôler le dopage du réseau, qui rendrait les diodes laser moins vulnérables à la propagation de défauts cristallins. Le béryllium, lui, est prometteur pour la fabrication des couches de contact.

La Société japonaise *Nichia* a démontré l'intérêt du nitrure de gallium et de ses dérivés pour fabriquer des diodes laser bleues avec ces matériaux. Toutefois, le nitrure de gallium de ces diodes, déposé par épitaxie sur un substrat en saphir, présente de nombreux défauts de surface (environ dix milliards par centimètre carré) : la réduction de ces densités de défauts améliorerait les performances des diodes.

L'originalité du projet du CRHEA consiste en la réalisation de structures laser à base de nitrures sur des substrats en nitrure de gallium. Ces substrats sont élaborés par épitaxie en phase vapeur à partir de chlorures : la croissance atteint 30 à 80 micromètres d'épaisseur par heure. La qualité des couches de nitrure de gallium que nous déposons sur ces substrats est, pour l'instant, équivalente à celle des couches fabriquées par la Société *Nichia* et par d'autres équipes.

Nous savons réaliser les dopages en trous et en électrons. Les différents éléments de la structure laser, le puits quantique en nitrure de gallium et d'indium, et les couches de confinement en nitrure d'aluminium et de gallium, seront prochainement réalisés. Au-delà du défi technique que constitue la réalisation d'une diode laser au nitrure de gallium, bien des problèmes fondamentaux restent à élucider : origine naturelle des dopages, dopage intentionnel des couches, mécanismes de recombinaison des porteurs de charge, rôle des défauts... Quel que soit le matériau utilisé pour fabriquer des diodes laser bleues, recherche fondamentale et recherche appliquée sont confondues.

Éric TOURNIÉ et Pierre GIBART,
CRHEA, CNRS



3. LA LARGEUR DE LA BANDE INTERDITE d'un cristal semi-conducteur détermine l'énergie des photons qu'il émet, inversement proportionnelle à la longueur d'onde de la lumière. Un matériau ayant une large bande interdite, tel le sélénium de zinc et de soufre, produit une lumière de courte longueur d'onde située dans la partie bleu-vert du spectre.

excitons sont si comprimés qu'ils subsistent malgré l'énergie thermique et la surpopulation. La probabilité qu'une paire électron-trou se recombinent en émettant un photon est d'autant plus grande que sa durée de vie est longue : le puits quantique en élimination de zinc et de cadmium favorise donc la recombinaison avec émission de photons, au détriment de la recombinaison par transfert d'énergie au réseau cristallin. Le rendement énergétique du laser est ainsi amélioré.

Un guide bleu

Dans un tel laser, la longueur d'onde de la lumière (bleue ou verte) est 50 à 100 fois supérieure à l'épaisseur du puits quantique : la lumière n'y est donc pas confinée. On la piège alors dans la direction verticale avec deux couches d'un autre matériau, le sélénium de zinc, de soufre et de magnésium. En 1993, des physiciens de la Société *Philips* ont montré que ces couches de confinement améliorent les performances du laser : par les méthodes de la micro-électronique, ils ont retiré de la matière dans la direction latérale, afin de créer un guide d'onde optique surélevé. L'indice de réfraction de l'air est beaucoup plus petit que celui du semi-conducteur : les photons restent donc confinés dans le matériau. De la sorte, la structure entière

canalise la lumière bleue ou verte, et le rayonnement est réfléchi à chaque extrémité, sur des faces clivées, qui forment des miroirs presque parfaits ; il sort finalement par l'une de ces faces.

Les premières diodes laser bleues au monde ne pouvaient pas fonctionner en continu sans être refroidies : elles surchauffaient rapidement lorsqu'on leur appliquait une tension électrique. L'échauffement se produisait dans le contact électrique entre l'électrode métallique et le sélénium de zinc et de soufre de type *p* : une barrière électronique, dite de Schottky, empêchait le courant électrique de passer. Nous avons résolu ce problème en intercalant un empilement de couches de sélénium de zinc et de tellure de zinc alternées et d'épaisseur variable : la barrière électronique entre le métal et le sélénium de zinc et de soufre est remplacée par un « pan incliné », que les électrons franchissent plus facilement.

Les surchauffes étant évitées, la durée de vie des diodes laser bleues au sélénium de zinc reste limitée par les défauts cristallins qui se forment lors du dépôt des premières couches semi-conductrices sur un substrat d'arséniure de gallium (les réseaux cristallins de l'arséniure de gallium et du sélénium de zinc ont à peu près les mêmes dimensions) : quelques atomes, un sur un million environ, s'alignent mal et provoquent l'éta-

blissement d'un plan atomique supplémentaire dans le cristal. Lorsque le cristal croît et que l'on dépose les autres couches semi-conductrices, ce défaut d'empilement se propage. S'il atteint un puits quantique, il crée des sites où les électrons et les trous peuvent se recombinaison sans émission de photon. En outre, chacune de ces recombinaisons non radiatives libère, sous forme de chaleur, une énergie d'environ 2,5 électronvolts dans le réseau cristallin environnant. Cette énergie est proche de celle qui maintient la cohérence du cristal : de nouveaux défauts sont créés, qui libèrent encore plus de chaleur, conduisant finalement à la détérioration du cristal. Les physiciens du solide utilisent des techniques telles que la microscopie optique à haute résolution et la microscopie électronique à transmission pour comprendre la formation de ces défauts dans les cristaux et tenter d'y remédier.

Les lasers qui équiperont demain les lecteurs de disques compacts seront-ils en sélénium de zinc ? C'est probable. D'autres matériaux, comme le nitride de gallium, tels les semi-conducteurs à large bande interdite de la famille du nitride de gallium. Leurs liaisons chimiques sont plus solides : ils sont moins détériorés par les forts courants électriques. Toutefois, dans les nitrures que nous savons fabriquer aujourd'hui, les défauts cristallins sont si nombreux qu'ils entravent l'obtention de l'effet laser.

La Société *Nichia* a malgré tout obtenu, à température ambiante, une émission laser bleue, sous haute tension (30 volts) à partir de diodes en nitride de gallium ; le puits quantique était en nitride d'indium et de gallium tandis que les couches de confinement électronique et optique étaient respectivement formées de nitride de gallium et de nitride d'aluminium et de gallium. Quel que soit le semi-conducteur utilisé dans le futur, l'avenir des lasers bleus est assuré.

Robert GUNSHOR est professeur de micro-électronique à l'Université Purdue. Artur KORKMANN est professeur de physique à l'Université Brown.

A.V. NURMIKKO, R.L. GUNSHOR, *Physics of Gallium Nitride and Gallium Arsenide Visible Light Emitters*, in *Solid State Physics* (Academic Press), vol. 49, pp. 205-282, 1995.

Govind AGRAWAL, *Semiconductor Lasers : Past, Present and Future*, American Institute of Physics Press, 1995.

Les secrets des bières lambic

JACQUES DE KEERSMAECKER

Une ancienne technique de brassage produit une boisson si complexe que la science l'explore encore.

Depuis 2 000 ans, la région qui est aujourd'hui la Belgique est un des lieux les plus traversés d'Europe. Initialement occupée par les Celtes, elle est envahie par les Romains. Au 5^e siècle, les Francs, puis plus tard, les Normands y déferleront. Au fil des siècles, les envahisseurs viennent et repartent : après les Romains, ce sont les Mérovingiens francs, les Germains, les Hollandais, les ducs de Bourgogne, les Autrichiens, les Espagnols, les Français et à nouveau les Hollandais. Chacun d'eux contribue à la culture belge, célèbre pour ses peintres,

ses orfèvres, ses cuisiniers et ses brasseurs de bière.

Les historiens supposent que l'un de ces envahisseurs, peut-être les Romains, apporta dans la région un procédé de brassage très ancien : les brasseurs exposaient leur décoction à l'air, l'enseménant ainsi (ou, plus précisément, l'inoculant) avec toutes les levures sauvages emportées par le vent. Toutefois, c'est seulement dans une région d'environ 500 kilomètres carrés autour de Bruxelles et dans le Payottenland (autour de la Senne, à l'Ouest de la ville) que le

mélange adéquat de spores en suspension dans l'air permet une fermentation spontanée et correcte.

Après bien des siècles, nombre de bières sont toujours produites suivant ce procédé de brassage, considéré comme le plus ancien de ceux qui sont encore appliqués commercialement. Certaines de ces bières sont à la fois aci-

1. LES DIVERS LAMBICS ont leur verre particulier. Les lambics à la cerise, à la pêche, à la framboise ou à la mirabelle sont mis dans des flûtes. Les gueuzes et les faros sont servis en bocks.



dulées et... ont subi une maturation plus longue, ont un bouquet plus complexe et plus développé. Certaines variétés ont été refermentées en présence de fruits et d'autres sont édulcorées au sucre candi. Elles ont toutes un goût particulier, lié au terroir, une rémanence légèrement musquée qui surprend même l'amateur de bières le plus averti.

Jadis, toutes les bières étaient fermentées avec des levures sauvages, comme le sont les lambics encore aujourd'hui. Un breuvage fermenté, nommé *sakar*, était ainsi fabriqué il y a 5 000 ans par les Sumériens de Mésopotamie. Le houblon était inconnu, mais la bière était parfumée avec des écorces d'arborescences.

fil des siècles, les brasseurs perfectionnèrent des techniques qui réduisaient les aléas de l'ensemencement sauvage. Puis, au XIX^e siècle, l'utilisation de cultures de levures isolées s'imposa. La fermentation devint alors plus efficace et prédictible... mais les lambics perpétuèrent les anciennes traditions.

Dans la Belgique du XVI^e siècle,

devenir rapidement un fondement de la vie sociale. Nombre de peintres contemporains de Pieter Bruegel l'Ancien peignirent des villageois qui vidaient d'énormes cruches de lambic, alors nommée bière jaune. Cette bière reste aujourd'hui au cœur des festivités locales de Bruxelles et de ses environs.

Les grands brasseurs belges produisent également et exportent même des lambics, comptant sur la curiosité alimentaire grandissante des consommateurs et sur leur goût pour des produits du terroir. Très répandus en Belgique et dans certaines parties de la France et de la Hollande, les lambics deviennent très appréciés dans l'ensemble de l'Europe et en

méthode de production en limite la disponibilité : la production de l'ensemble des brasseries de lambic s'élève à environ 370 000 hectolitres par an (en comparaison, le premier brasseur français, le groupe *Danone*, produit 25 millions d'hectolitres de bières par an).

L'intérêt scientifique pour des analyses d'évolution de goûts et d'arômes,

ainsi que pour la compréhension des différentes étapes de fermentation est assez récent. S'il est clair que le profil gustatif d'une bière résulte directement de la souche de levure utilisée, une fermentation complexe comme celle du lambic donne des résultats difficiles à cerner. Le goût particulier des lambics résulte d'une série d'étapes où l'activité des bactéries... industriel moderne... se superpose à la fermentation luxurieuse, réduisant les dextrines... drant les nombreux composés aromatiques. Ainsi les recherches qui ont commencé au milieu des années 1970, à l'Université de Louvain, ont finalement élucidé une grande partie de la chimie de cette fermentation séculaire.

Naissance d'une bière

On connaît si mal les origines des bières lambic que leur nom même a trois étymologies concurrentes. Certains soutiennent que le mot «lambic» vient du nom de l'un des quatre villages belges suivants : Lembeek, Borcht-Lombeek, Onze-Lieve-Wrouw-Lom-



beek ou St. Mary's Lambic. D'autres supposent qu'il vient du mot espagnol *lambicado*, qui signifie «préparé avec soin». Enfin l'invention des lambics a été attribuée au duc Jean IV de Brabant qui, fatigué de boire toujours la même bière, aurait eu l'idée de faire macérer et bouillir de l'orge et du houblon dans un alambic, d'où le nom.

Les vieux lambics non coupés, proches de ceux du XVIII^e siècle, ne se trouvent aujourd'hui facilement qu'aux environs de Bruxelles et dans le Payottenland. Acidulés et à peine gazeux, ils ressemblent plus à de bons xérès qu'aux bières courantes. La gueuze, le faro et les divers lambics édulcorés et parfumés aux fruits sont beaucoup plus communs.

La gueuze, comme le champagne, résulte d'une fermentation secondaire qui a lieu dans les bouteilles. Le brassage de lambics jeunes et vieux. Apparemment la gueuze a été commercialisée pour la première fois au début du XIX^e siècle : pour l'exportation, on voulait une boisson plus pétillante, ressemblant davantage à la bière. Des documents datant de 1844 attestent l'exportation de gueuze vers Constantinople et Rio de Janeiro.

Le faro est un mélange de lambic et de bière de mars, liquide pâle, faiblement alcoolisé, obtenu en rinçant les drêches, c'est-à-dire la matière solide résultant du brassage du lambic. Le faro est généralement additionné de sucre canni. Il doit son nom aux soldats du Corps des Carabiniers qui le maient «liquide doré» ou «liqueur d'orge», *faro* en espagnol. Les lambics fruités comprennent les lambics flamands (qui signifie «cerise») et à la framboise (simplement nommés framboise). D'autres fruits ont été utilisés : la pêche, le raisin, le cassis, la mirabelle et la banane.

Au commencement, il y a le moût

Les bières sont toutes fabriquées à partir d'ingrédients de base communs, tels que le malt d'orge, le malt de blé, le malt de maïs, qui a été trempé dans l'eau, a germé, puis a été séché dans une touraille. Plus le malt est grillé, plus il est foncé et à haute température, plus le malt grille et, de blond, vire au brun. Le maltage produit, dans les grains d'orge, les enzymes qui transforment l'amidon en sucres, durant le brassage. Selon les conditions de traitement, on obtient des caractéristiques

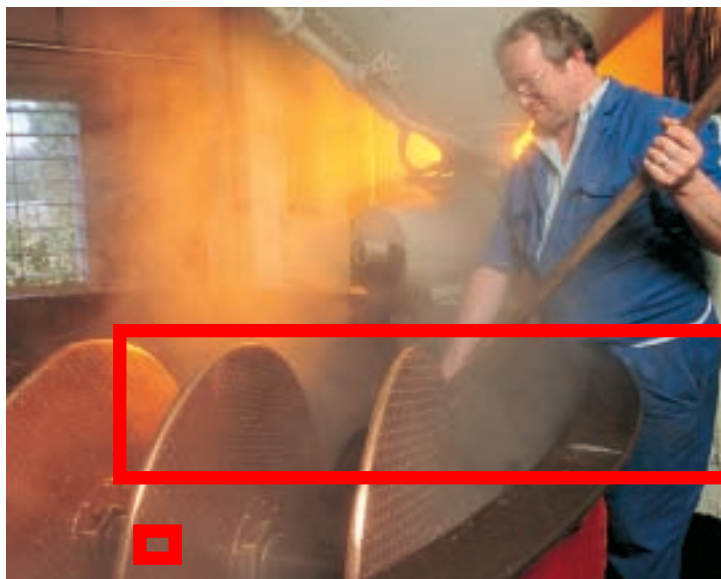
variées, ainsi le malt de lambic est pâle et riche en enzymes. Le houblon est une plante grimpante cultivée en France depuis le Moyen Âge. Elle est utilisée dans la fabrication de la bière, à laquelle il confère son parfum, son amertume et sa digestibilité. Elle a été découverte par Hildegarde, abbesse de l'abbaye de Bingen, au XI^e siècle. Il est disponible dans des dizaines de variétés et sous de nombreuses formes. Pour le brassage du lambic, on utilise généralement les fleurs séchées, nommées cônes.

Toutes les fabrications de bière commencent de la même façon. Après avoir été séché (touraillé) et dégermé, le grain malté est trempé dans l'eau, germé, puis séché, tels que le maïs, le riz ou le froment, peuvent également être utilisés comme source de matières amylacées (amidon). Après mouture, ces grains sont additionnés d'eau chaude (dont la qualité contribue au goût final), le réchauffement est effectué à l'aide d'un chauffage indirect.

les enzymes du malt restent actives : c'est le brassage.

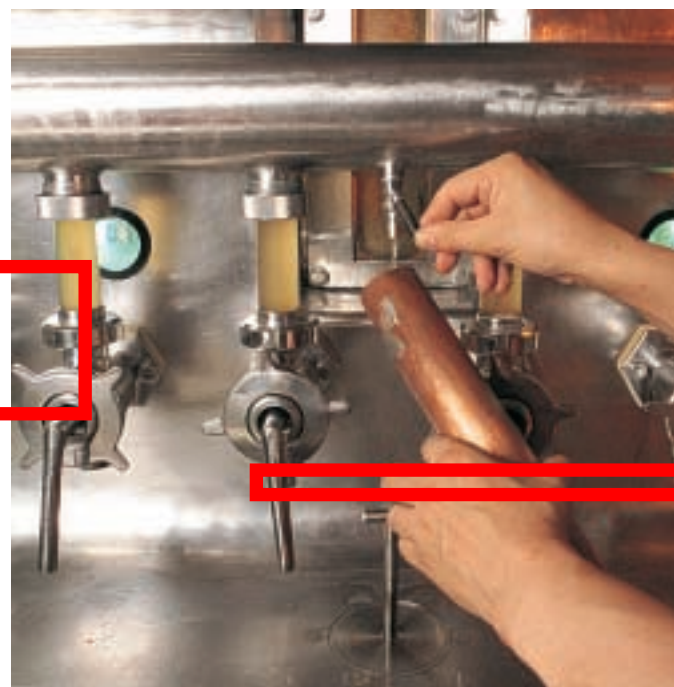
Le liquide résultant du brassage est appelé moût : ce moût est filtré, puis transféré dans une chaudière à moût. C'est là qu'a lieu l'ébullition, opération durant une heure ou plus, au cours de laquelle sont ajoutés le houblon et, éventuellement, d'autres épices. Le brassage

La fabrication d'une bière



Le brassage commence par le mélange de malt d'orge, de blé et d'eau tiède dans une cuve-matière (ci-dessus). Des disques métalliques remuent l'infusion, favorisant l'extraction des composés aromatiques et des enzymes. Puis le brasseur ajoute de l'eau chaude à ce mélange, et il décante le liquide dans une chaudière à moût. Un chauffage active alors les enzymes.

Après le débourbage, le liquide où ont infusé les grains est filtré. Le brasseur contrôle continuellement la limpidité du liquide par transparence dans des conduits de verre (ci-dessous).



pose les fondements des deux éléments gustatifs essentiels d'une bière finie : son fruité et sa douceur, conférés par le malt et le blé, sa siccité et son amertume, données par le houblon.

Après le brassage vient la fermentation : des colonies de levures dissocient les sucres issus du malt et du grain, et les transforment en éthanol, en dioxyde de carbone et en d'autres composés. Cette fermentation se déroule en l'absence d'oxygène. Les diverses

rent chacune un parfum caractéristique. D'ailleurs l'une des nombreuses différences entre les ales et les lagers est le type de levures utilisées pour inoculer le moût ; suivant la souche utilisée, les levures se retrouvent en haut ou en bas de la cuve après la fermentation. Les brasseurs conservent jalousement leurs souches de levures : elles

ont un rôle primordial dans le développement de la saveur de la bière.

Si toutes les fabrications sont analogues, la durée du brassage et les détails de fabrication : les variétés et les proportions d'eau, de malt, de céréales, de houblon et de levures, la durée du brassage et la fermentation, la maturation et, éventuellement, le coupale. Les brasseurs de lambics, secrets et possessifs, gardent précieusement des recettes affinées depuis des siècles.

Les lambics ont plusieurs particularités. Ils sont toujours brassés avec une proportion relativement élevée de blé non malté, habituellement autour de 35 pour cent (les bières allemandes, en revanche, ne comprennent jamais de grain non malté). Cette céréale est riche en protéines et en amidon, qui sont habituellement indésirables dans le brassage

D'importantes teneurs en protéines rendent les lambics légèrement troubles, mais elles engendrent une mousse crémeuse et stable. En outre, l'amidon du blé conduit à de fortes concentrations en dextrines, que les levures ne peuvent pas dissoudre. L'activité bactérienne réduit progressivement

tions : pour les lambics ayant fermenté moins d'un an, les dextrines donnent du moût ; puis, après trois ans de garde, toutes les dextrines disparaissent. En fin de compte, les lambics contiennent

en enzymes requises pour un brassage réussi, les brasseurs de lambics comptent sur le malt d'orge pâle, très riche en enzymes.

Le brassage des lambics fait également un emploi particulier du houblon : non seulement ce dernier parfume, comme dans les autres bières, mais il contribue également à la conserva-



Le liquide est ensuite bouilli dans la chaudière à moût pendant quatre ou cinq heures, durant lesquelles le brasseur ajoute le houblon (*en haut à gauche*). Pour les lambics, les brasseurs préfèrent les fleurs de houblon (*en bas à gauche*), souvent importées d'Angleterre. Le houblon libère des composés qui assurent la conservation ainsi que la saveur de la bière lambic. Avec des houblons surannés, la bière n'est pas excessivement amère. Durant l'ébullition, on mesure les concentrations en sucres dans des échantillons (*à droite*).



tion, car certains de ses composés inhibent la prolifération des bactéries qui feraient pourrir le moût, riche en sucres et autres substances énergétiques. Comme la conservation par le houblon habituel imposerait l'emploi de quantités excessives, qui rendraient la bière trop amère, les brasseurs de lambics utilisent seulement des houblons âgés, de plus de trois ans. L'âge provoque l'oxydation des acides alpha, responsables de l'amertume, en composés moins amers ; simultanément l'oxydation du houblon développe des arômes désagréables, mais qui disparaissent à la longue. L'ébullition du moût élimine ensuite ces faux goûts. Le houblon traditionnel était la variété Coigneau, cultivée dans la région d'Asse-Alost, en Belgique, mais les surfaces cultivées de houblon ont fortement diminué en Belgique, rarifiant cette variété ; des houblons anglais de la région du Kent leur sont souvent substitués.

La méthode de brassage traditionnelle, nommée méthode à moûts troubles, a peu changé depuis sa description par G. Lacambre, en 1851 : dans un récipient nommé cuve-matière, le brasseur place un mélange de 40 pour cent de blé et de 60 pour cent de malt d'orge, avec de l'eau, à une température comprise entre 40 et 45 °C. L'ajout d'eau

bouillante porte ensuite la température à 62 °C, puis le liquide est décanté dans une chaudière à moût. Le brasseur verse à nouveau le moût dans la cuve-matière pour obtenir une température de 72 °C, et il mélange à nouveau. Après une nouvelle décantation, la partie liquide est ajoutée à la chaudière à moût. Le contenu de cette chaudière (le liquide produit par les deux extractions successives) est ensuite bouilli pendant 20 minutes et reversé dans la cuve-matière pour être filtré.

Le moût résultant de cette filtration est filtré à nouveau. Les drêches restant dans la cuve-matière sont rincées à l'eau chaude. Le liquide obtenu est le moût, qui servira de base à la bière de lambic. Le moût du lambic, lui, retourne dans la chaudière à moût, où on lui ajoute des cônes de houblon et où on le fait bouillir pendant quatre ou cinq heures (un procédé similaire donne la bière de pils).

À ce stade, le brassage est achevé, et la fermentation commence ; cette dernière est une succession de réactions

Que la fermentation commence !

À ce stade, le brassage est achevé, et la fermentation commence ; cette dernière est une succession de réactions

bactériennes, levuriennes et chimiques qui créent le lambic. Pour la fabrication des lambics, le moût chaud est pompé jusqu'à une cuve ouverte (série), peu profonde. Les brasseurs aèrent la surface du moût au maximum, éventuellement à l'aide de ventilateurs, et ils laissent refroidir le liquide toute la nuit. C'est pendant cette opération de refroidissement que les levures sauvages et d'autres micro-organismes présents dans l'air ambiant viennent inoculer le moût.

Les conditions locales sont de toute première importance : non seulement la fermentation spontanée ne donne le résultat attendu que dans une petite région autour de Bruxelles, mais cette fermentation n'a lieu qu'entre octobre et avril, quand la température extérieure est inférieure à 15 °C. Quelle est l'importance exacte des conditions de la fermentation ?

la place aux superstitions et aux conjectures. On raconte qu'un brasseur de lambic a refusé d'abattre le toit branlant qui abritait ses bacs refroidissoirs, parce qu'il était convaincu que celui-ci abritait certaines colonies de micro-organismes importants ; plutôt que de remplacer le vieux toit, il fit construire un nouveau toit par-dessus l'ancien.



Après l'ébullition, le liquide est pompé jusqu'à une cuve de refroidissement, dans le grenier de la brasserie (à gauche). Cette opération n'est pas pratiquée pour les bières classiques. La microflore locale, notamment des levures sauvages, inoculent le brassin. Des ventilateurs font circuler l'air au-dessus du liquide, tandis que sa température descend à 15 °C environ (cartouche ci-dessus).

Quand le moût inoculé est froid, des ouvriers le versent dans des tonneaux de bois, où il fermente et vieillit. On utilise toujours des fûts de chêne ou de châtaignier qui ont déjà contenu auparavant du vin, parce que le bois neuf contient trop de tannins astringents (le vin les extrait au cours de sa maturation). Avant l'emploi, les tonneaux sont soigneusement nettoyés : on y a fait brûler une mèche au soufre afin d'éliminer les moisissures indésirables, qui donneraient de mauvais goûts. Toutefois ces traitements n'éliminent pas complètement des fibres du bois les levures, sous forme de cellules ou de spores ; ces micro-organismes contribuent au démarrage de la fermentation.

La fermentation, complexe même avec les levures spécialement cultivées utilisées pour les ales et les lagers, l'est encore plus avec les levures sauvages et les bactéries présentes dans les lambics. L'activité bactérienne ne présente pas de danger pour la santé humaine, car l'acidité du liquide, la présence des résines du houblon, la forte concentration en alcool éthylique évitent la prolifération des micro-organismes pathogènes. Cette propriété explique pourquoi les consommateurs de bières et de vins échappèrent à bien

des épidémies et des intoxications, au Moyen Âge.

Festins de levures

Hubert Verachtert et ses collègues de l'Université de la fermentation des lambics depuis les années 1970. Ils ont identifié 100 souches différentes de levures, 27 souches de bactéries acétiques (qui forment de l'acide acétique en présence d'oxygène) et 38 souches de bactéries lactiques (qui forment de l'acide lactique) dans un seul type de lambic.

La fermentation du lambic peut être schématisée en quatre étapes principales qui se superposent. Des levures sauvages (*Kloeckera apiculata*, et des entérobactéries sont les premiers micro-organismes installés. Les entérobactéries apportent un arôme doux, fruité et végétal. Elles ne jouent pas un rôle nouveau d'influence sur le goût, mais leurs enzymes dissocient les protéines, ce qui améliore la limpidité de la bière à basse température. Puis des levures *Saccharomyces* produisent l'alcool éthylique qui sera présent dans le produit fini, ainsi que les esters aromatiques qui confèrent aux lambics des saveurs semblables à celles des ales. Des bac-

téries lactiques font alors de l'acide lactique, qui donne à la bière sa légère acidité. Enfin, des levures *Brettanomyces* engendrent de nombreux autres esters, qui forment la spécificité des lambics : un goût fruité et vineux.

La première étape de la fermentation commence, trois à sept jours après la mise en fût, par la prolifération des entérobactéries et des levures sauvages. Les entérobactéries se multiplient très rapidement et donnent lieu à une fermentation acide mixte, où les molécules de glucose sont transformées à la fois en alcool éthylique et en dioxyde de carbone, et aussi en acide lactique et en acide acétique. Cependant ces entérobactéries ne survivent pas dans l'acide acétique ou dans l'alcool éthylique ; elles meurent progressivement en 30 à 40 jours. La levure *Kloeckera apiculata* se développe en consommant le glucose, mais pas les sucres plus complexes ;

après avoir épuisé le glucose et après avoir produit une petite quantité d'alcool éthylique et l'essentiel de l'acide acétique trouvé dans le produit final.

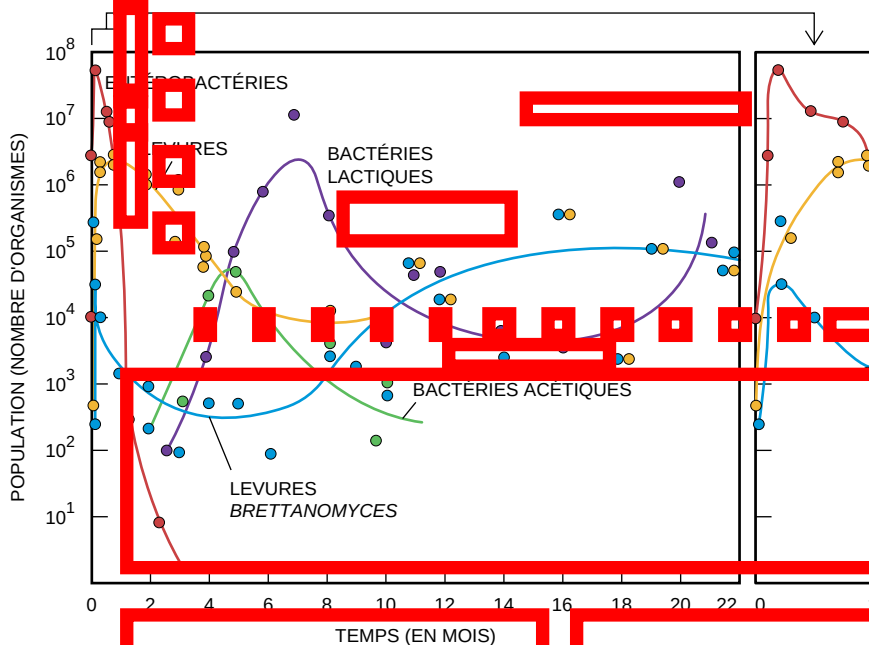
Après 10 ou 15 jours, c'est le début de la fermentation principale, productrice d'alcool éthylique. Les levures sauvages sont supplantées par les levures *Saccharomyces*, du même genre



Quand le brassin a refroidi, habituellement toute une nuit, il est versé dans des fûts de bois (à gauche) qui ont contenu du vin (le bois de fûts neufs conférerait un goût déplaisant). Même après avoir été nettoyés et désinfectés, les tonneaux contiennent encore des spores de levures qui favorisent la fermentation. Après une semaine environ, la fermentation est si violente que de la mousse jaillit de l'orifice de dégazage des fûts.



La bière vieillit durant un an ou plus. Puis, sur la seule base de dégustations, elle sera éventuellement coupée avec des lambics plus jeunes ou plus âgés.



2. LA FERMENTATION DES BIÈRES LAMBIC résulte de la prolifération et du déclin de plusieurs populations de micro-organismes, au cours de quatre étapes principales. Dans la première, les bactéries entériques et des levures sauvages prédominent, dissociant le glucose en alcool éthylique, en dioxyde de carbone et en acides organiques variés. Puis diverses levures produisent plus d'alcool éthylique. Lors de la troisième étape, des bactéries lactiques et acétiques produisent davantage de ces acides respectifs. Enfin les levures *Brettanomyces* créent les nombreux esters qui rendent la bière particulièrement aromatique.

taxonomique que les levures utilisées pour la fabrication des ales – bières de fermentation haute – (*Saccharomyces cerevisiae*) ou des lagers – bières de fermentation basse – (*Saccharomyces carlsbergensis*). Seulement une ale ou une lagerne fermentent que pendant une semaine.

Dans les lambics, les levures *Saccharomyces* assimilent et fermentent la plupart des molécules de sucre, qu'elles transforment en alcool éthylique et en dioxyde de carbone. Cette fermentation se manifeste pendant quelques jours par des émissions de mousse et des débordements par le trou d'évacuation du gaz carbonique; puis la fermentation se poursuit, plus calmement, pendant sept mois environ. Elle ne donne pas aux lambics leur goût caractéristique mais elle met le moût dans un état qui permet leur mélange.

La troisième étape, qui chevauche la deuxième, se poursuit pendant

quatre mois : les bactéries lactiques et acétiques prolifèrent, avec une activité maximale six à huit mois après le début de la fermentation. On commence d'ailleurs le brassage du lambic entre octobre et avril, parce que ce pic d'activité a lieu lors des chaleurs estivales, quand les températures sont supérieures à 20-25 °C.

Les bactéries sont responsables de la légère acidité du lambic. Elles appartiennent principalement au genre *Pediococcus*, qui transforme les sucres en acide lactique. Certaines souches de *Pediococcus* ont une fâcheuse tendance à rendre le lambic visqueux – on dit qu'il devient filant. Cette viscosité finit par disparaître, ne laissant qu'une légère turbidité, qui est éliminée par filtration.

Parfois les bactéries acétiques donnent également une acidité excessive, quand elles forment de l'acide acétique à partir de l'alcool éthylique. Toutefois cette acidité ne devient gênante qu'avec les fûts endommagés ou fuyards, qui permettent à l'air d'alimenter les bactéries aérobies *Acetomonas*.

Après huit mois de fermentation, une nouvelle prolifération de levures marque le début de la quatrième et dernière étape de la fermentation. Ces

levures, qui appartiennent principalement au genre *Brettanomyces*. Elles déterminent le goût de la bière. Le profil aromatique est déterminé par les concentrations respectives en esters, dont la synthèse est favorisée par les *Brettanomyces* : ces levures fabriquent une enzyme qui transforme les acides et l'alcool éthylique en esters. Les

plus puissants de ces esters sont le lactate d'éthyle et l'acétate d'éthyle, sous-produit de l'étape précédente.

En présence d'air, les levures *Brettanomyces* et d'autres levures forment un voile à la surface de la bière. Sans ce voile, la bière s'oxyderait et les bactéries acétiques proliféreraient, faisant du vinaigre au lieu de la bière. Malgré les efforts des brasseurs, cet accident survient parfois.

Une autre fermentation

Même après cette fermentation complexe de près d'un an, la bière n'est généralement pas bonne à boire. Nous l'avons vu, le plus commun des lambics non parfumés, la gueuze, est un mélange de bières jeunes et vieilles, dont le goût va du doux (quand les bières jeunes dominent) à l'acidulé et riche (quand les vieilles dominent). Après l'assemblage, qui se décide par dégustation, une fermentation supplémentaire a lieu, parce que les sucres présents dans le jeune lambic sont alors au contact de levures plus développées, d'un lambic âgé d'environ deux ou trois ans. Dans la traditionnelle, cette fermentation a lieu en bouteille.

Si le lambic âgé prédomine, les levures *Brettanomyces* assimilent les sucres complexes, formant un produit fini très sec et très aromatique (en raison de l'activité estérificatrice des levures *Brettanomyces*). Les lambics dont l'âge moyen est inférieur sont plus doux et plus moelleux. Les écarts de goût sont dus à des compositions de spécialistes qui, connaissant très bien les normes classiques, obtiennent un produit final aux caractéristiques reproductibles en coulant des lambics très différents. Quel que soit le type de lambic, il diffère des ales et des lagers par ses acides organiques et ses esters abondants.

La plupart des produits actuels sont assez doux, filtrés et pasteurisés. Les lambics traditionnels, non pasteurisés, nécessitent des manipulations soigneuses et un stockage en cave sombre et fraîche pendant plus d'un an.

Les lambics fruités subissent également une fermentation secondaire, due au sucre des fruits. Le lambic à la cerise est sans doute le plus traditionnel. On utilisait jadis la cerise de Schaerbeek, petite cerise noire très acide, mais

celle-ci n'est presque plus cultivée, et les brasseurs emploient généralement la cerise norsem, plus grosse, plus juteuse, qui confère un goût plus moelleux. Lors de la cueillette des cerises, en juillet, les ouvriers brasseurs préparent tous les tonneaux nécessaires pour la production de kriel d'une année entière : ils mettent environ 80 kilogrammes de fruits entiers, avec leur noyau, par fût de 650 litres, où ils versent le lambic jeune de l'année ; la fermentation repart pour un à deux ans.

Les lambics survivront-ils ? Ce sont des anachronismes vivants, dont les spécificités sont aussi des handicaps commerciaux. Avant les travaux de Louis Pasteur, les lambics étaient les seules bières qui se conservaient pendant des mois, grâce à leur faible coût relativement faible, les brasseurs pouvaient en produire d'importantes quantités durant l'hiver et vendre leur produit toute l'année. Aujourd'hui toutefois, la conservation n'est plus un problème mais le vieillissement de grandes quantités de bière rend difficile la bilise les capitaux. L'avantage des lambics est devenu un inconvénient.

En outre, de nombreuses lois et réglementations sur les produits alimentaires imposent un contrôle minutieux de l'ensemble du procédé de préparation. Or, par sa nature même, la fermentation spontanée n'est pas véritablement contrôlable.

Le futur des bières lambic est entre les mains d'amateurs aventureux, petit groupe qui s'efforce de préserver les traditions gastronomiques traditionnelles. Ce groupe semble se développer et de plus en plus de consommateurs délaisent les nourritures industrielles pour les grands classiques : fromages au lait cru, pains à l'ancienne, vins fins, bières trappistes et véritables bières. Qui sait ? Si cette tendance continue, la lambic pourrait encore perdurer un nouveau demi-millénaire.

Jacques de KEERSMAECKER est directeur de la Brasserie Belle-Vue, à Bruxelles.

Les mémoires de la bière, La technique belge éditions, Bruxelles, non daté.

Jean-Xavier GUINARD, *Lambic, Classic Beer Style Series*, Brewers Publications, Boulder, Colorado, 1990.

Michael JACKSON, *Michael Jackson's Beer Companion*, Running Press, 1993.

Martin LODAHL, *Lambic : Belgium's Unique Treasure*, in *Brewing Techniques*, vol. 3, n° 4, pp. 34-46, juillet-août 1995.



ONDES ET ONDELETTES

Barbara Burke Hubbard

L'élaboration des ondelettes est une saga moderne.

Fourier a inventé la décomposition d'un signal en éléments simples ; pour les besoins de l'analyse du signal, physiciens et mathématiciens ont inventé une nouvelle décomposition en ondelettes. Celle-ci est utile dans de nombreuses applications et ses richesses ne sont pas toutes explorées.

Barbara Burke Hubbard est écrivain scientifique : elle retrace avec simplicité et chaleur comment les scientifiques pensent et hésitent avant que n'écloie une idée, et comment ils coopèrent. Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Les droits d'auteur des œuvres numériques

ANN OKERSON

Les réseaux d'ordinateurs défient la législation sur les droits d'auteur, mais certains remèdes proposés pourraient être pires que le mal.



Depuis 1926, des millions de lecteurs ont adoré l'histoire de Winnie l'ourson et de ses amis. Aussi n'est-il pas surprenant que James Milne (en s'inspirant de l'Université de l'Iowa sans relation avec A. Milne, qui créa ces histoires) ait voulu mettre Winnie l'ourson sur le Web, le réseau d'information mondial véhiculé par Internet : dans un ordinateur relié au réseau, il plaça quelques fichiers de texte et d'image, permettant ainsi à tous les enfants du monde de découvrir ces charmantes histoires. En avril 1995, peu de temps après la création de ce site Web, J. Milne reçut une lettre polie de la Société E. Dutton, qui détient les droits d'exploitation du texte et des images de Winnie l'ourson ; il y était invité à cesser ses poursuites judiciaires, le site devait être fermé.

Vers la même époque, un livre narrant la vie privée de François Mitterrand était interdit de diffusion en France. Il réapparut sur Internet peu de temps après, sans que personne puisse s'opposer à sa dissémination numérique rapide.

Comment contrôler le fonctionnement du réseau ? Certains fanatiques du réseau Internet prônent une liberté totale de l'information, mais d'autres prétendent que le réseau soutiendrait son avenir par le contrôle et la facturation de chaque information qui y transite. Comment les institutions légales et culturelles réagiront-elles ? Les

lecteurs d'Internet ont-ils le droit d'être autorisés à feuilleter les livres numériques ou les réseaux informatiques comme ils le font pour les livres et magazines classiques dans les librairies ? Pourront-ils emprunter des ouvrages dans des bibliothèques virtuelles ? Les auteurs, les éditeurs, les bibliothèques et les États débattent encore de ces questions.

Les nouveaux droits

Qui aurait pensé, voilà seulement cinq ans, que la reconnaissance des droits d'auteur sur les réseaux informatiques donnerait lieu à une controverse internationale ? Pourtant, aujourd'hui, les sommes à gagner – ou à perdre – grâce aux échanges numériques sont devenues considérables. Aux États-Unis, au début des années 1990, les branches d'activités liées au droit d'auteur, qui couvrent principalement les secteurs de l'édition, de l'audiovisuel et de la musique, annonçaient un chiffre d'affaires annuel de plus de mille milliards de francs, soit approximativement 3,6 pour cent du produit intérieur brut américain.

En 1988, lorsque la Société des OVC et Viacom se disputèrent la Paramount, l'enjeu était les droits d'auteur des films d'archives. Depuis 1981, la Société américaine des auteurs a poursuivi en justice des sociétés d'édition comme celle du New York Times pour la vente non autorisée de copies informatiques des œuvres de ses membres. Même les universités cher-

1. DANS LES LIBRAIRIES ET LES BIBLIOTHÈQUES, on admet la consultation gratuite des ouvrages. Des modifications de la loi sur la protection des droits d'auteur limiteraient les possibilités analogues d'exploration électronique et pourraient même les interdire, sauf après

chent aujourd'hui à augmenter leurs revenus en conservant les droits des travaux qu'elles produisent, plutôt que de les laisser aux éditeurs.

La majeure partie des droits de reproduction concerne des produits de grande diffusion comme les livres, les films et les produits dérivés (le roman *Jurassic Park*, par exemple, a donné naissance à un film, à une cassette vidéo, à une cassette audio, à des T-shirts, à des jouets et à divers produits). Au sein des universités et des institutions universitaires et littéraires, qui sont la mémoire scientifique, critique et artistique de la société, ne représentant qu'un demi pour cent de l'ensemble, soit cinq milliards de francs par an environ. Les publications financées par l'État et distribuées librement jouent un rôle négligeable dans ce marché.

Les chercheurs préfèrent souvent la large diffusion de leur travail à des rémunérations. Le réseau *Internet* leur convient bien, parce qu'il transmet les informations plus rapidement que les supports imprimés et à un coût inférieur ; de surcroît, la copie numérique d'un document ou d'un programme est en tous points identique à l'original.

Toutefois ces auteurs ne sont que les passagers d'un gigantesque paquebot de transferts de données, obligés de s'adapter. L'enthousiasme des éditeurs pour les nouveaux produits est tempéré par la crainte qu'une seule vente, à une bibliothèque ou à un particulier, ne soit suivie de la reproduction du document sur tout le réseau *Internet*, ruinant les espoirs d'exploitation commerciale et de développements ultérieurs.

Les problèmes posés par l'application des lois sur la propriété littéraire et artistique dans l'utilisation des nouveaux médias sont nombreux. Dans quel cadre les œuvres doivent-elles être protégées sur les réseaux ? Le cyberspace est-il un Far West moderne où chacun peut piller les créations des autres en numérisant les images ou en copiant des fichiers ? De nombreuses œuvres sont le fruit de collaborations : à qui appartiennent-elles et qui peut y avoir accès ? Comment peut-on déterminer l'étendue

de la propriété de chacun, en supposant même que la notion de propriété ait un sens ? Comment peut-on dédommager le propriétaire d'une œuvre lorsque son travail est dispersé mot par mot, phrase par phrase ou même pour la musique, note par note ? Quelle est la responsabilité des opérateurs du réseau *Internet*, qui devraient être attentifs aux risques de violation de la loi par le nouvel outil qu'ils mettent à la disposition du public ? En France, l'Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques a récemment publié sur les réseaux informatiques au regard des droits d'auteur, mais, aux États-Unis, l'Office des technologies américain (*Office of Technology Assessment*) recommandait, en 1986, de renoncer à la protection sur le droit d'auteur tel que nous le connaissons aujourd'hui et de chercher de nouveaux principes.

L'état de la loi

L'origine des lois sur le droit d'auteur est ancienne, et l'évolution de ce droit a été tumultueuse. L'un des tout premiers conflits eut lieu au VI^e siècle, en Irlande : saint Colomba avait recopié un manuscrit de l'auteur latin Psalter, alors que le propriétaire de l'original, Finnian de Druim Fircrois, avait écrit les termes : « De même que le veau appartient à la vache, la copie appartient à l'original. » Une guerre en résulta que les « pirates » remportèrent, conservant leur copie ; celle-ci devint l'ouvrage fétiche du clan Colomba, aujourd'hui conservé à la bibliothèque de l'Académie royale irlandaise, à Dublin.

Le décret de la reine Anne (*Statute of Anne*), promulgué en 1710 en Angleterre fut la première loi moderne pour la protection des droits d'auteur : auparavant, certains auteurs et éditeurs obtenaient des privilèges particuliers. Cette loi reconnaissait des droits aux auteurs et limitait leur durée. Elle servit de modèle pour la rédaction de la première loi régulant les droits d'auteur aux États-Unis, en 1790. Les premières lois françaises furent deux textes révolutionnaires, l'un relatif aux spectacles, en 1791, et l'autre aux droits de propriété des auteurs

obtention d'un accord préalable. Bien qu'il paraisse improbable qu'un éditeur interdise complètement aux utilisateurs de se promener dans leur catalogue de publications, les auteurs craignent qu'une ouverture même partielle ne les pénalise.



Droit français et droit international

Dans son article, A. Okerson pense que les écoles et les universités ne risquent guère d'être assignées en justice. Pourtant, le 1^{er} août 1996, les éditeurs de Jacques Brel et de Michel Sardou ont attaqué l'École nationale supérieure des télécommunications et l'École centrale de Paris pour avoir publié sur leurs sites Web, des textes de chansons de ces artistes sans en avoir demandé l'autorisation ni payé de droits. En France, que dit la loi au regard de la fixation d'une œuvre de l'esprit, de l'usage public et privé et de l'application du droit international?

La question de savoir si une œuvre doit être ou non «fixée» sous une forme tangible d'expression n'est pas discutée en France, contrairement aux États-Unis, car une œuvre de l'esprit est protégée en droit français, dès l'instant où elle est créée. Ainsi, une œuvre orale (un discours, par exemple) est protégée en dépit de son caractère évanescent. La seule difficulté pratique (parfois de taille) est d'apporter la preuve que l'œuvre a été contrefaite. C'est ainsi qu'un tribunal français a reconnu, dans les années 1950, qu'un reportage radiophonique était bel et bien une œuvre de l'esprit protégée par la loi. Dans un autre cas, un tribunal français a condamné le producteur d'un film documentaire à qui l'on reprochait d'avoir copié certains éléments sonores d'un reportage.

Aucune copie de l'émission de radio aux archives de la Radiodiffusion française, l'existence d'emprunts illicites n'a pas été prouvée. En droit français, une œuvre accessible sur Internet est donc protégée dès qu'elle est créée (qu'elle soit achevée ou non d'ailleurs) et sans se soucier de savoir si elle est «fixée».

En ce qui concerne le problème dit de l'usage loyal, la législation française sur le droit d'auteur (Code de la propriété intellectuelle) ne connaît pas ce concept en tant que tel. Il faut rappeler que l'usage loyal, aux États-Unis, est la liberté, reconnue à chacun, de reproduire une œuvre (par exemple, faire une copie d'un article de revue) ou de la représenter pour certains usages publics. Cette liberté est soumise à des conditions relatives à l'objectif de la reproduction ou de la représentation (but d'information, de pédagogie, de critique...), à l'ampleur de l'emprunt, au préjudice économique éventuellement subi par les titulaires des droits d'auteur et à la nature de l'œuvre (utilitaire, esthétique). Pour prendre un exemple, la Cour suprême des États-Unis a considéré que le plagiat d'un disque de la chanson *Oh, pretty woman*, par le groupe de rap 2 Live Crew, correspondait aux conditions légales de l'usage loyal. Pour sa part, le droit français prévoit une série d'exceptions aux droits d'auteur. En particulier, sont autorisés, les courtes citations, les analyses, les revues de presse, la diffusion de discours à titre d'informations d'actualité, la parodie, le pastiche et la caricature. On remarquera la différence d'approche entre les législations américaine et française. Les États-Unis posent une

règle générale (l'usage loyal), alors que la France fourmille de précises d'exceptions.

En vérité, en droit français comme en droit américain, la question fondamentale est celle de savoir jusqu'où sont les pouvoirs reconnus aux titulaires de droits d'auteur. Jusqu'à présent, le droit d'auteur s'arrêtait aux portes de l'usage privé, c'est-à-dire lorsqu'une ou plusieurs personnes prenaient connaissance d'une œuvre représentée ou reproduite pour leur usage personnel. Aujourd'hui, la consultation d'une œuvre de l'esprit sur un réseau informatique est une reproduction destinée à une consultation individuelle et non à une diffusion publique. L'équilibre de la propriété littéraire et artistique et, plus généralement, du point d'équilibre de l'économie de l'information. C'est dire qu'il est souhaitable que ce débat dépasse les seules discussions entre spécialistes pour prendre en compte les intérêts de l'ensemble de la société.

Il est clair que le débat est rendu particulièrement difficile car les enjeux sont internationaux. Ce phénomène est juridiquement très important, car il demande que soient réglées des situations liées à l'application de différents droits nationaux. Fort heureusement, la propriété littéraire et artistique est l'un des domaines où les aspects internationaux ont été le plus rapidement traités. La Convention de la propriété intellectuelle internationale, signée à Berne, date de 1886. Celle-ci a été rediscutée pour la dernière fois à Paris, en 1971, et ratifiée par la France et les États-Unis. De plus, une conférence diplomatique est prévue pour décembre 1996. Toutefois, il ne faudrait pas penser que seules les conventions internationales sont susceptibles de régler les situations internationales, car chaque droit national a vocation, dans certaines hypothèses, à régler de telles situations.

Deux exemples, empruntés au droit français, illustrent cette idée. L'un est relatif au droit d'auteur, l'autre au droit de la responsabilité civile. La Cour de cassation a ainsi considéré que l'atteinte au droit des créateurs d'une œuvre cinématographique réalisée en noir et blanc (*Quand la ville dort*, de John Huston) par un processus de «colorisation» relevait de l'application du droit français. En l'absence de convention internationale réglant deux publications scientifiques américaines à propos d'un éventuel dénigrement de l'une envers l'autre, la Cour d'appel de Paris a considéré que les «obligations extra-contractuelles sont régies par la loi du lieu où est survenu le fait qui leur a donné naissance». En l'occurrence, elle a considéré que le droit français devait être appliquée, car «les articles incriminés ont été écrits et diffusés aux États-Unis». La prolifération des œuvres numérisées pourra multiplier ces litiges.

Dominique BOUGEROL
Centre d'études sur la coopération juridique internationale (CECOJI) – Faculté de droit de Poitiers

d'écrivains, des compositeurs, des peintres et des dessinateurs, en 1793. Des deux côtés de l'Atlantique, les lois sur la protection des auteurs furent un compromis entre les intérêts privés et le besoin d'information de la société. Aujourd'hui encore, aux États-Unis, les règles qui définissent la propriété littéraire et artistique sont fondées sur leurs capacités à promouvoir les progrès des sciences, des arts et des lettres.

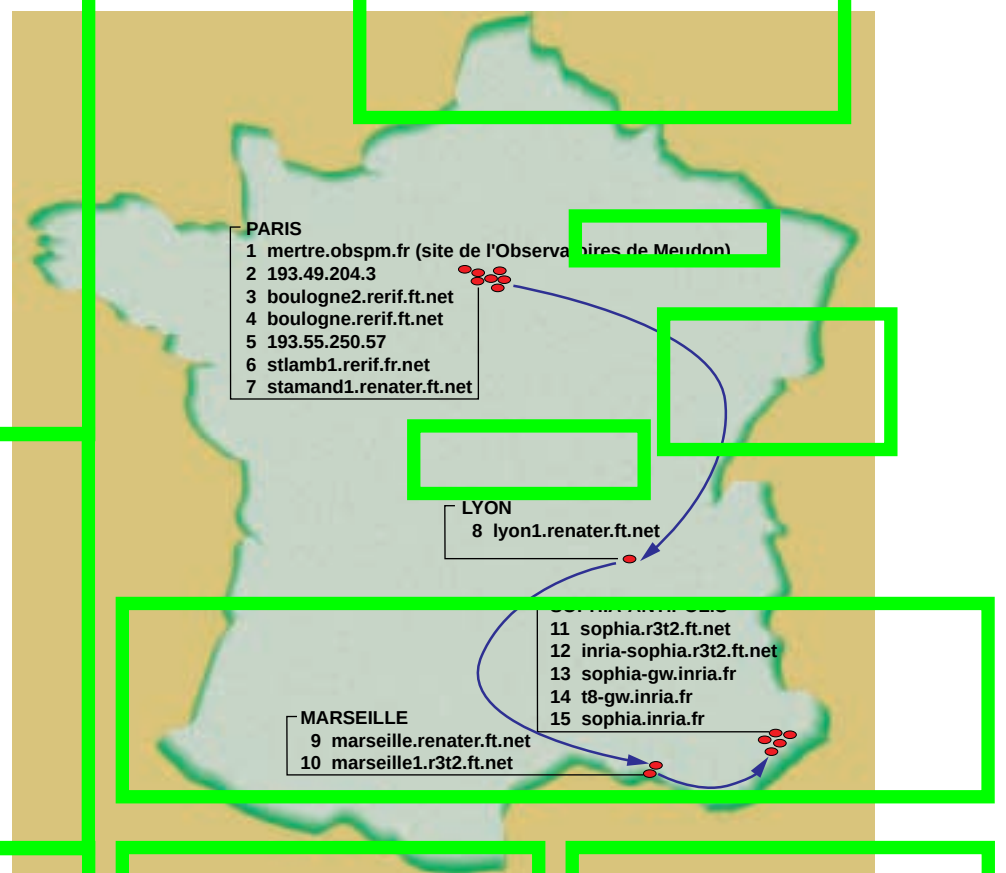
En France et aux États-Unis, au fil des réformes, les parlements ont augmenté la durée de la protection des auteurs. En France, l'application de la loi à de nouveaux types d'œuvres et ratifié des accords internationaux comme la Convention de Berne, 1886. Les signataires de cette convention s'engageaient à protéger légalement, dans leur pays, les auteurs dont les œuvres de l'esprit entrent dans le champ d'application de cette convention.

En 1976, la dernière réforme de la loi américaine sur la propriété littéraire et artistique a complété la précédente. Elle concerne les livres, les compositions musicales, les œuvres dramatiques, les pantomimes, les œuvres chorégraphiques, les œuvres de dessin, de peinture, d'architecture, de sculpture, de lithographie, les œuvres cinématographiques et autres créations audiovisuelles (les brevets et les marques sont régis par des lois spéciales, les inventions par des lois de fabrication).

La loi protège le titulaire d'une œuvre de l'esprit en lui octroyant le droit d'interdire à quiconque de la reproduire, de l'adapter à un autre mode d'expression, de procéder à la commercialisation d'une copie de l'œuvre, de la représenter ou de l'exposer sans autorisation préalable.

La loi limite toutefois les droits d'auteur de plusieurs manières. La plus importante est la reconnaissance de l'«usage loyal» (*fair use*), qui autorise, sous certaines conditions, la duplication sans paiement de droits ni de permission. L'usage loyal comprend la diffusion de copies à des fins de recherche, d'enseignement, de journalisme, de critique, de parodie ou de conservation par les bibliothèques.

La propriété littéraire et artistique est chaudement débattue dans tous les pays depuis plusieurs années, notamment parce que l'usage de la photocopie ou du prêt en bibliothèque ont



2. DE NOMBREUSES COPIES D'UN TEXTE INFORMATIQUE sont parfois réalisées lors de son transfert entre deux sites du réseau *Internet*. Dans l'exemple ci-dessus, le fichier traverse 15 ordinateurs différents, d'un site de l'Observatoire de Meudon jusqu'à un ordinateur situé à Sophia-Antipolis (identifiés par leur nom et leur localisation approximative) lors de son parcours. Certains spécialistes des droits d'auteur estiment que chaque copie ne peut être créée qu'après accord du détenteur des droits. Dans l'état actuel de la loi, les propriétaires de toutes les machines intermédiaires peuvent être tenus pour responsables de toute violation de la loi.

rendu caducs les accords anciens. Cependant le cyberspace s'est initialement développé en marge des secteurs où le droit d'auteur était protégé. De nombreux textes et images d'origines diverses transitaient vers le monde informatique sans que les droits d'œuvres informatiques faussent le chemin inverse. Cette dissymétrie a rapidement été érodée, et la copie de documents sur le réseau *Internet* par les autres médias au milieu des années 1990, a montré que les frontières étaient tombées. Le rapport d'une commission d'experts américains, en 1994, a avivé

envoyé et ainsi plus de 1 000 pages de commentaires. En septembre 1995, le groupe a remis la version définitive de son rapport sous la forme d'un livre blanc qui contient des propositions pour réactualiser les lois sur le droit d'auteur. Naturellement les débats qui ont eu lieu aux États-Unis ont été largement commentés dans les autres pays membres de l'Union de Berne.

D'une manière générale, les industries de l'information ont accueilli les recommandations du livre blanc avec enthousiasme et soulagement : la Commission Internationale de l'Union

des scénarios, qui ferait baisser les revenus des éditeurs et des auteurs au point que ces derniers n'auraient plus intérêt à produire de nouveaux ouvrages et à les mettre sur le marché. En effet, la Commission recommande des contrôles stricts de la duplication par moyens informatiques. En revanche, les bibliothèques et les

Le grand débat

Par courrier, par télécopie et par courrier électronique, cette commission, dirigée par Bruce Lehman, a reçu les réactions à la présentation de son premier rapport. Les principaux acteurs du marché des droits d'auteur

services éducatifs, les serveurs de réseau ou les bibliothèques. Les auteurs, craignant un monde où plus rien ne sera accessible, lisible ou reproductible sans autorisation préalable ou paiement. De nombreuses bibliothèques ont déjà des difficultés avec les coûts de l'information, particulièrement ceux des livres scientifiques, qui augmenteront d'environ dix pour cent chaque année.

Le budget de l'obtention d'informations par les réseaux, qui permettent aux bibliothèques d'accéder à des documents dont elles ne disposent pas directement, est devenu supérieur au budget consacré à l'achat des livres et des magazines. Aussi les bibliothécaires voient-ils d'un mauvais œil que l'on préconise une généralisation des licences d'utilisation. Du point de vue du prix, de la responsabilité et de la

durée de propriété, les licences d'utilisation ont des avantages et des inconvénients. Si les accords contribuent à maintenir un prix excessif pour l'utilisation de l'information électronique, les opérateurs des réseaux prospéreront, mais les bibliothèques n'auront plus les moyens d'y avoir accès... et les fournisseurs périliteront. Un compromis doit donc être trouvé.

De surcroît, aux yeux de nombreux citoyens et de représentants du milieu culturel, la Commission Lehman modifie l'équilibre que la loi actuelle avait instauré entre le respect des droits des auteurs et de la liberté des utilisateurs. La Commission propose, par exemple, que chaque information, dès lors qu'elle transite, pour un temps aussi court soit-il, sur la mémoire d'un ordinateur, soit considérée comme «fixée»

au regard du droit d'auteur. En vertu de la loi actuelle sur la propriété littéraire et artistique ne protège que les œuvres de l'esprit originales fixées sous une forme tangible, c'est-à-dire lorsque leur forme est suffisamment stable pour leur permettre d'être vues, reproduites ou communiquées.

Cette distinction est fondamentale. Si les recommandations de la Commission sont suivies, chaque personne qui transmettra, entre deux ordinateurs, une information protégée, sans avoir l'autorisation du possesseur, violera la loi. En effet, le groupe de travail recommande que la loi soit modifiée pour reconnaître que la transmission électronique

est exclue du possesseur des droits. Dans ces conditions, la seule consultation d'une page Web, qui implique la transmission entre un serveur et un ordinateur personnel, sera considérée comme un acte illégal si elle n'est pas précédée d'une autorisation.

La Commission refuse également d'étendre aux duplications électroniques la notion de première vente : le droit par la première vente : toute personne qui achète un livre ou un magazine peut revendre ou donner cet exemplaire sans payer de droits supplémentaires. Cette possibilité serait interdite pour l'information numérique.

Cette recommandation, illogique en apparence, est fondée sur la constatation que, lors d'un transfert électronique, le fichier est physiquement présent sur au moins deux ordinateurs, ne fût-ce que quelques millisecondes, et se trouve donc dupliqué plutôt que transféré. Les moyens légaux par lesquels le possesseur d'une œuvre électronique d'une œuvre pourrait la vendre ou la donner, un geste parfaitement légal pour un livre imprimé, restent à définir. Il en résulte que, dans le monde informatique, la possibilité de se faire une opinion en jetant un coup

À qui appartiennent les morceaux ?

Les créations multimédias sont composées de textes, d'images et de sons d'origines diverses. Ainsi une page Web (voir ci-dessous) peut appartenir à plusieurs propriétaires. Les problèmes de propriété et de rétribution sont alors compliqués, ce qui peut mettre en danger la création.

LOGO
Artiste, société de design ou éditeur du site Web

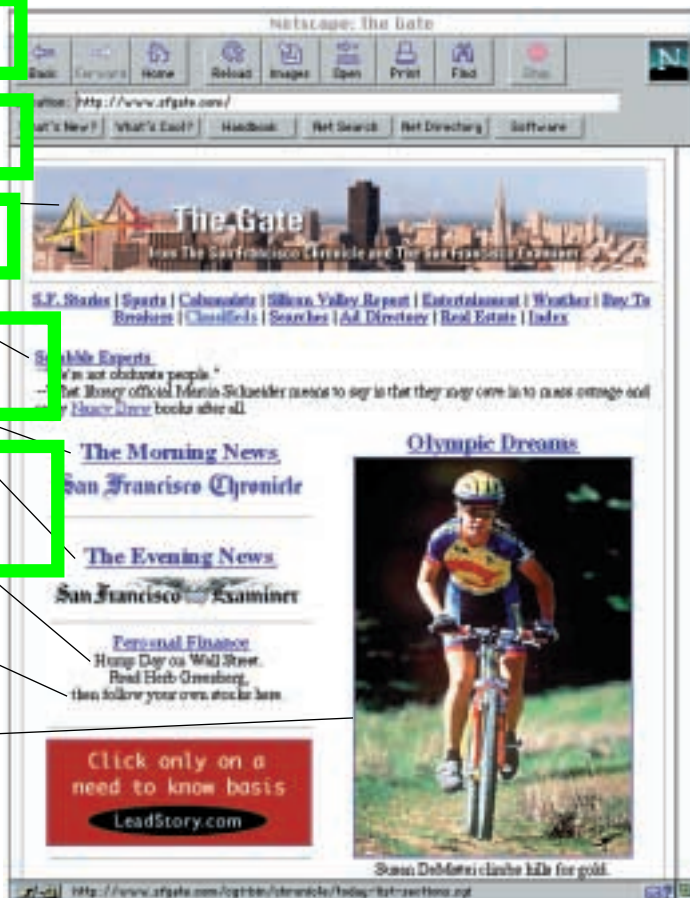
EXTRAIT D'ARTICLE
Écrivain ou éditeur du journal

CONTENU DU TEXTE
Écrivain ou éditeur du journal

ARTICLE
Écrivain ou éditeur du journal

INFORMATIONS SUR LA BOURSE
Bourse ou éditeur de la base de données

PHOTOGRAPHIE
Photographe, agence de photographie, photothèque ou éditeur du journal



d'œil sur un ouvrage (ce qui est admis dans les bibliothèques ou dans les librairies) disparaîtrait. Feuilleter des ouvrages « en ligne », sans autorisation préalable, serait considéré comme une violation de la loi.

Les universités et les autres organismes qui fournissent des accès au réseau *Internet* sont particulièrement préoccupés par cette proposition de la Commission, qui craignent qu'ils seraient responsables des infractions à la législation sur les droits d'auteur s'ils ne contrôlaient les utilisateurs. Cette situation les obligerait à faire la police informatique, en les obligeant de vérifier la légitimité de données que les étudiants, le personnel ou les utilisateurs lisent ou publient.

Un équilibre nécessaire

Si la Commission propose un futur très éloigné de la tradition d'un accès public aux données, des moyens techniques très simples pourraient contourner ces obstacles. La Commission insiste sur les aspects techniques de la protection des données, mais de nombreux spécialistes trouvent leur analyse insuffisante sur ce plan. Un examen plus complet de ces possibilités techniques de transfert de fichiers, qui inclut les méthodes de codage pour limiter le nombre de copies permanentes lors du transfert, pourrait étendre les travaux de la Commission.

D'autre part, pour que l'accès aux documents soit véritablement systématique de droits soit admis dans certains cas, on doit se préoccuper de l'usage loyal du copiste et tenir compte de ce droit pour déterminer un compromis entre le respect des droits des auteurs et ceux des utilisateurs. Un tel compromis fut déjà recherché dans le cas de la photocopie des ouvrages imprimés.

La définition de l'usage loyal du copiste reste toutefois ambiguë dans le cadre des réseaux informatiques. La Commission Lehman précise qu'elle précise que la notion d'usage loyal doit s'adapter dans le monde des connexions informatiques, et que sa nécessité diminuera avec la généralisation des licences et d'autres moyens de paiement automatique. Les représentants des utilisateurs et des lecteurs regrettent ces imprécisions troublantes. Si la Commission a pris

une position ferme en faveur des droits des auteurs, elle n'a pas su clarifier les droits des utilisateurs.

Elle a convoqué, chaque mois, des utilisateurs, des auteurs, des bibliothécaires, des avocats et des représentants des éditeurs, pour essayer d'élaborer des recommandations précises sur la notion d'usage loyal. Les premières discussions ont montré qu'un accord ne sera sans doute pas atteint avant les discussions devant les députés.

Portant ce désaccord n'est peut-être pas mauvais. Certes, les deux camps craignent qu'en l'absence de recommandations claires sur la notion d'usage loyal, les utilisateurs, telles les universités, ne se fassent justice de la loi. Toutefois, les lois doivent être élaborées dans le calme et la réflexion. L'absence de réglementation spécifique permet aux éditeurs, aux bibliothèques et aux autres organismes universitaires de procéder à des expériences sur la consultation électronique de documents, généralement dans le cadre d'accords écrits.

Les députés ont encore loin de poursuivre en justice les bibliothèques et les écoles. Les scientifiques ou les enseignants qui créent des pages *Web* sont parfois, formellement, dans l'illégalité, mais ils sont rarement poursuivis. Et s'ils l'étaient plus qu'aujourd'hui, l'avenir de la distribution électronique de l'information s'assombrirait.

Pour de nombreux participants des groupes informels de discussion, les débats méritent d'être entretenus.

Beaucoup de participants pensent qu'il n'est pas suffisamment au point pour que l'on établisse des directives claires sur la notion d'usage loyal. Ils rechignent à faire des recommandations législatives tant que toutes les implications ne sont pas claires. Il faudra encore attendre pour parvenir à un compromis acceptable sur la notion d'usage privé.

Malgré toutes les critiques que certains aspects du rapport Lehman ont suscitées, les débats ont été riches.

Dans de nombreux cas, les réactions provoquées par les recommandations ne concernaient pas leur adéquation au fond du problème, mais jusqu'à quel point elles devaient être codifiées dans les textes de loi. Si presque tout le monde juge illicite le piratage des programmes conçus pour empêcher la copie d'une œuvre, les seules questions

posées concernaient l'étendue des sanctions encourues pour ce délit et la possibilité de présumer l'existence d'une

De même, à l'exception de la petite minorité qui refuse les droits d'auteur sur *Internet*, la Commission Lehman reconnaît qu'il est urgent de mieux informer les citoyens sur leurs obligations face à la loi. À une époque où chacun est un éditeur potentiel pourvu qu'il possède un ordinateur et un modem, les textes qui régissaient le comportement de quelques entreprises s'appliqueront à des millions de personnes.

La prochaine loi sur la protection des droits d'auteur déterminera l'avenir des techniques d'information. La puissance de ces nouvelles techniques bouleverse les habitudes de travail du monde créatif et les moyens par lesquels les auteurs et les éditeurs publient les œuvres. Peut-on simultanément satisfaire les auteurs, qui veulent accéder simplement à une information bon marché, et les auteurs et éditeurs qui entendent tirer des publications les moyens honorables de leur subsistance? Nous devons agir sagement pour que tous les acteurs et les utilisateurs des nouvelles techniques profitent de la révolution de l'information.

Ann OKERSON, bibliothécaire adjointe de l'Université de Yale, travaille sur la consultation électronique des ouvrages.

ETHEL MANN, *La propriété littéraire et artistique*, Collection Que sais-je?, PUF.

A. LUCAS, *Propriété littéraire et artistique*, Collection Connaissance du droit, Dalloz, 1994.

P. SIRENEAU, *Industries culturelles et nouvelles techniques, Rapport de Commission*, ministère de la Culture et de la Francophonie/La documentation française, 1994.

O. IERANU, *Internet et le droit, Aspects juridiques du commerce électronique*, Eyrolles, 1996.

P. GOLDSTEIN, *Copyright's Highway: From Gutenberg to the Celestial Jukebox*, Hill and Wang, 1994.

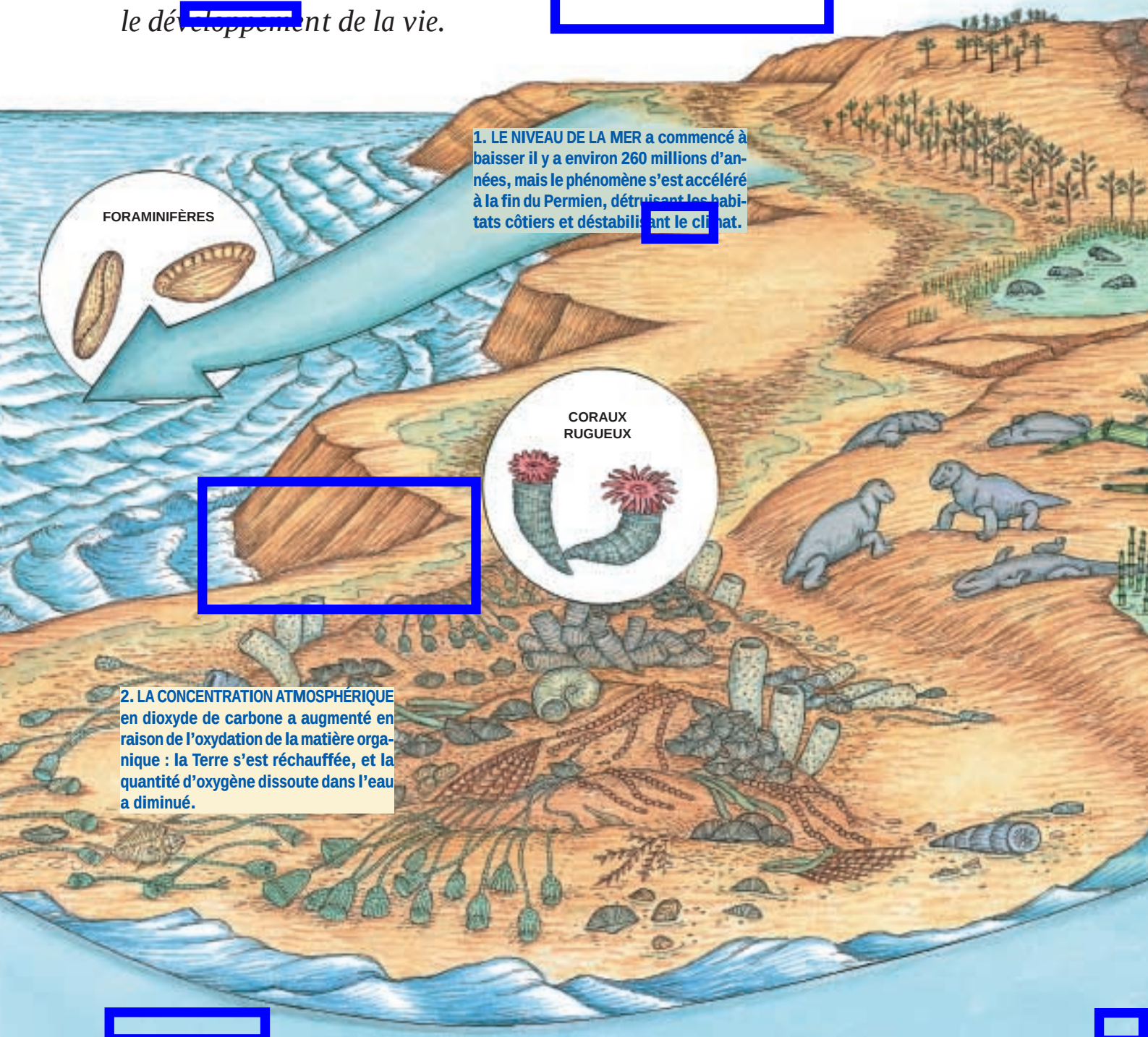
Pour plus d'informations sur les lois américaines concernant les droits d'auteur :

- <http://www.library.yale.edu/~okerson/copyproj.html>

La plus importante des extinctions en masse

DOUGLAS ERWIN

Une des plus grandes catastrophes qui a frappé la Terre il y a 250 millions d'années : une extinction massive d'espèces a notablement modifié le développement de la vie.

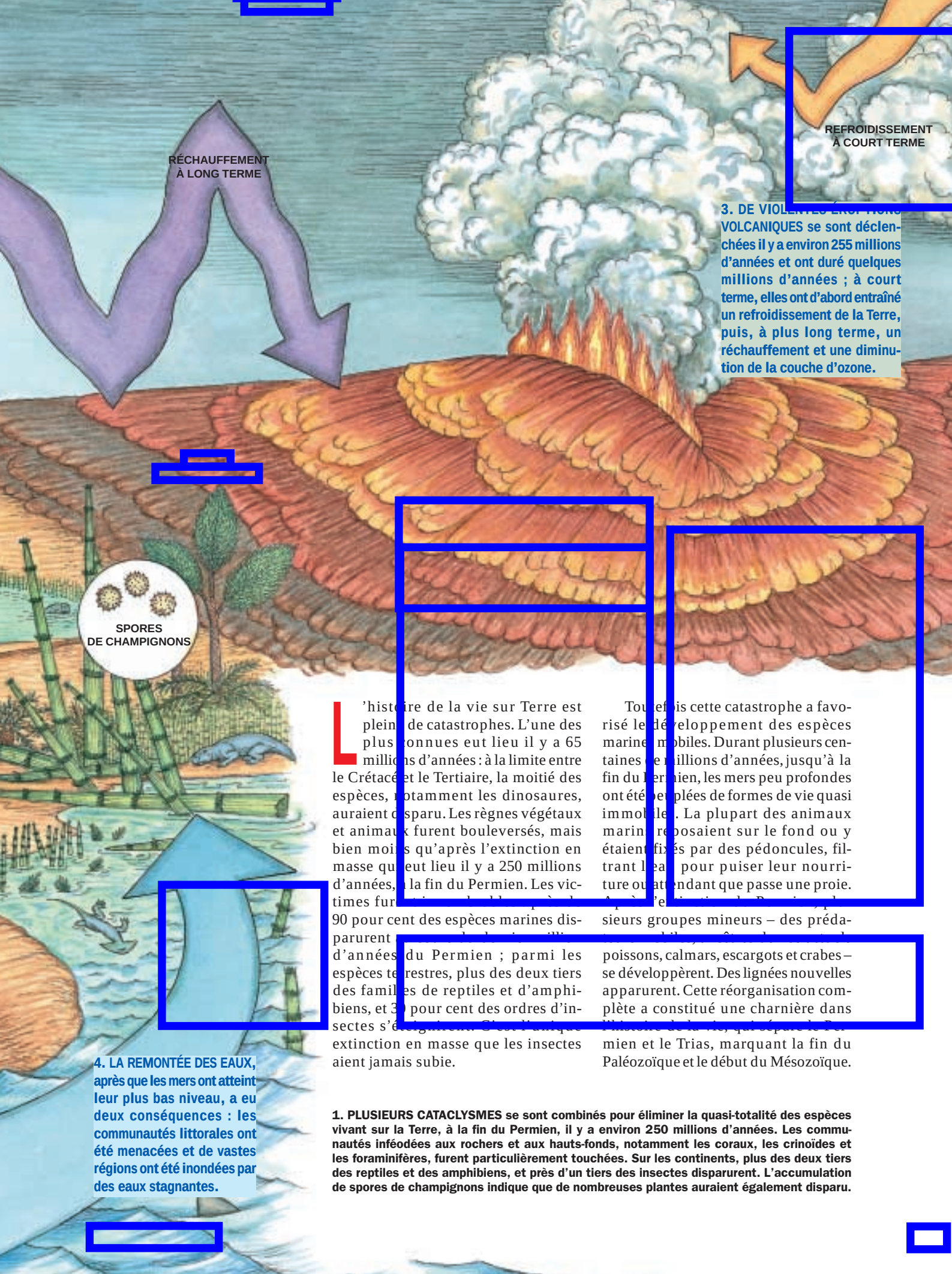


1. LE NIVEAU DE LA MER a commencé à baisser il y a environ 260 millions d'années, mais le phénomène s'est accéléré à la fin du Permien, détruisant les habitats côtiers et déstabilisant le climat.

FORAMINIFÈRES

CORAIL RUGUEUX

2. LA CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE en dioxyde de carbone a augmenté en raison de l'oxydation de la matière organique : la Terre s'est réchauffée, et la quantité d'oxygène dissoute dans l'eau a diminué.



RÉCHAUFFEMENT
À LONG TERME

REFROIDISSEMENT
À COURT TERME

3. DE VIOLENTE ERUPTIONS VOLCANIQUES se sont déclenchées il y a environ 255 millions d'années et ont duré quelques millions d'années ; à court terme, elles ont d'abord entraîné un refroidissement de la Terre, puis, à plus long terme, un réchauffement et une diminution de la couche d'ozone.

SPORES
DE CHAMPIGNONS

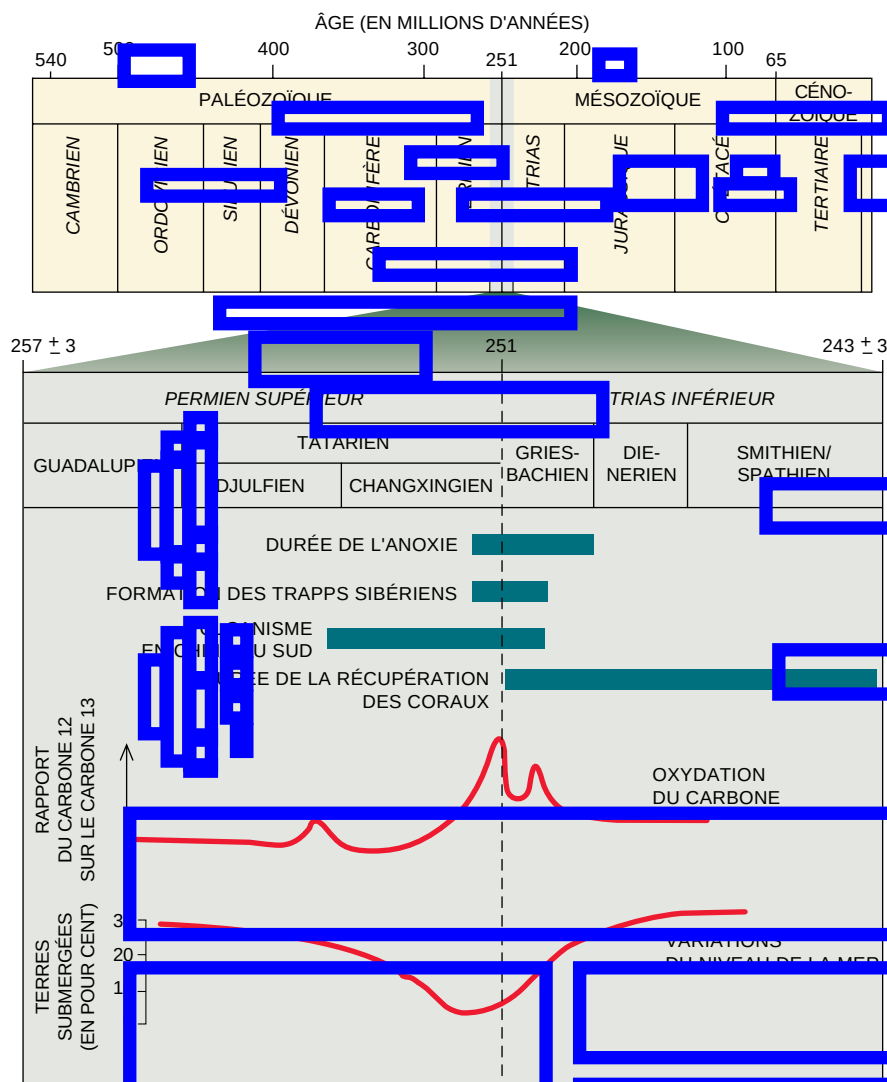
4. LA REMONTÉE DES EAUX, après que les mers ont atteint leur plus bas niveau, a eu deux conséquences : les communautés littorales ont été menacées et de vastes régions ont été inondées par des eaux stagnantes.

L'histoire de la vie sur Terre est pleine de catastrophes. L'une des plus connues eut lieu il y a 65 millions d'années : à la limite entre le Crétacé et le Tertiaire, la moitié des espèces, notamment les dinosaures, auraient disparu. Les règnes végétaux et animaux furent bouleversés, mais bien moins qu'après l'extinction en masse qui eut lieu il y a 250 millions d'années, à la fin du Permien. Les victimes furent nombreuses : 90 pour cent des espèces marines disparurent, ainsi que 70 pour cent des espèces terrestres ; parmi les espèces terrestres, plus des deux tiers des familles de reptiles et d'amphibiens, et 30 pour cent des ordres d'insectes s'éteignirent. C'est à l'unique extinction en masse que les insectes aient jamais subie.

Toutefois cette catastrophe a favorisé le développement des espèces marines mobiles. Durant plusieurs centaines de millions d'années, jusqu'à la fin du Permien, les mers peu profondes ont été peuplées de formes de vie quasi immobiles. La plupart des animaux marins reposaient sur le fond ou y étaient fixés par des pédoncules, filtrant l'eau pour puiser leur nourriture ou attendant que passe une proie.

Après l'extinction du Permien, plusieurs groupes mineurs – des prédateurs, des poissons, calmars, escargots et crabes – se développèrent. Des lignées nouvelles apparurent. Cette réorganisation complète a constitué une charnière dans l'histoire de la vie, qui sépare le Permien et le Trias, marquant la fin du Paléozoïque et le début du Mésozoïque.

1. PLUSIEURS CATACTYSMES se sont combinés pour éliminer la quasi-totalité des espèces vivant sur la Terre, à la fin du Permien, il y a environ 250 millions d'années. Les communautés inféodées aux rochers et aux hauts-fonds, notamment les coraux, les crinoïdes et les foraminifères, furent particulièrement touchées. Sur les continents, plus des deux tiers des reptiles et des amphibiens, et près d'un tiers des insectes disparurent. L'accumulation de spores de champignons indique que de nombreuses plantes auraient également disparu.



2. LA DÉGRADATION DE L'ENVIRONNEMENT, à la fin du Permien, est attestée par diverses données géochimiques et par les fossiles. Du carbone fut oxydé en grande quantité, le niveau des mers commença à baisser, et des éruptions volcaniques eurent lieu là où sont aujourd'hui localisées la Sibérie et la Chine. Certaines zones océaniques se sont appauvries en oxygène. Les coraux ont recommencé à abonder au milieu du Trias seulement.

Au cours des dernières années, la plupart des recherches ont contribué à la compréhension des causes et des conséquences de la crise de la fin du Permien. Les géologues, notamment, ont étudié les modifications rapides de la chimie des océans, établi des diagrammes d'extinction et montré que de violentes éruptions volcaniques avaient eu lieu entre la fin du Permien et le début du Trias.

Curieusement, cependant, au lieu de façonner l'évolution, je me suis interrogé sur les contributions respectives des extinctions en masse et des adaptations à long terme. Pourquoi les oursins, présents aujourd'hui dans tous les océans, étaient-ils rares durant le Permien? Un seul genre, *Miocidaris*, semble avoir survécu à l'extinction : est-ce un hasard, ou était-il mieux

adapté? Les oursins d'aujourd'hui sont-ils différents s'il n'y avait pas eu l'extinction de la fin du Permien?

Quelques bonnes roches

Pour répondre à de telles questions, on doit explorer les causes de la catastrophe et chercher quelles sont les différences entre les espèces qui ont survécu et celles qui ont disparu. Les

déchiffrent les géologues, mais les échantillons de la fin du Permien et du début du Trias sont rares. Les fossiles datant de la limite entre les deux périodes sont mal conservés ou difficilement accessibles. En raison d'une baisse notable du niveau des mers, à la fin du Permien, peu de roches marines sont déposées sur la terre ;

en outre, les géologues accèdent difficilement à certaines régions riches en roches intéressantes, telles que le Sud de la Chine.

Où et à quelle vitesse la vie s'est-elle éteinte? Erik Flügel et ses collègues de l'Université d'Erlangen, qui ont analysé des récifs en Chine du Sud et en Grèce, ont montré que certaines espèces, notamment les plus sensibles aux changements de l'environnement, disparaurent rapidement. D'autres espèces, la disparition fut plus progressive : en étudiant la faune très riche et bien conservée des affleurements calcaires de l'Ouest du Texas, du Nouveau Mexique et de l'Arizona, j'ai découvert que de nombreux escargots ont commencé à disparaître vers la fin du Permien moyen, bien avant le pic d'extinction proprement dit.

Découvert des récentes des couches de la limite entre le Permien et le Trias, l'authenticité dans le Sud de la Chine, ont montré que la durée de l'extinction a été plus courte qu'on ne l'avait cru : des conditions environnementales désastreuses se sont installées brusquement, et la période d'extinction, d'abord estimée à quelque cinq à dix millions d'années, n'aurait duré guère plus d'un million d'années.

Steven Stanley, de l'Université Johns Hopkins, l'extinction aurait été marquée par une série d'événements survenant à la fin du Permien moyen, l'autre à la fin du Permien supérieur. La datation de cendres volcaniques trouvées dans le Sud de la Chine devrait bientôt donner une meilleure idée de la durée de cette période d'extinction, qui semble avoir été aussi courte que les autres extinctions en masse.

Au cours de cet intervalle de temps, bref à l'échelle géologique, le schéma des extinctions et des spéciations a été complexe pour les groupes océaniques. La quantification des ordres, familles, genres et espèces qui ont disparus est difficile, mais on admet que 49 pour cent des familles et 72 pour cent des genres auraient été éliminés.

des espèces disparues sont moins précises. En Hongrie et ses collègues de l'Université chinoise de géosciences ont examiné, au Sud de la Chine, la couche rocheuse qui définit l'étage changxingien. Avec le Djulfien, cet étage caractérise la plus tardive des deux subdivisions du Permien supérieur ; ces étages sont nommés d'après

la région du monde où les fossiles sont les mieux conservés.

D'après cette étude, 435 des 476 espèces d'invertébrés du Permien supérieur disparurent (c'est-à-dire 91 pour cent). D'après une autre étude, les prises entre 80 et 95 pour cent, la limite inférieure de la catastrophe.

réaliste. Par comparaison, l'extinction qui eut lieu à la fin de la période ordovicienne, il y a 439 millions d'années, n'élimina que 57 pour cent des genres marins, et l'extinction qui fit disparaître les dinosaures toucha 47 pour cent de tous les genres.

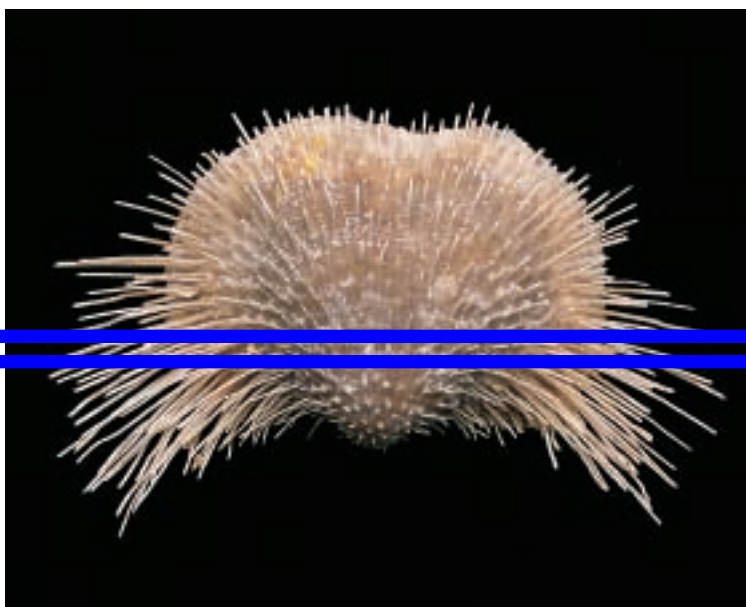
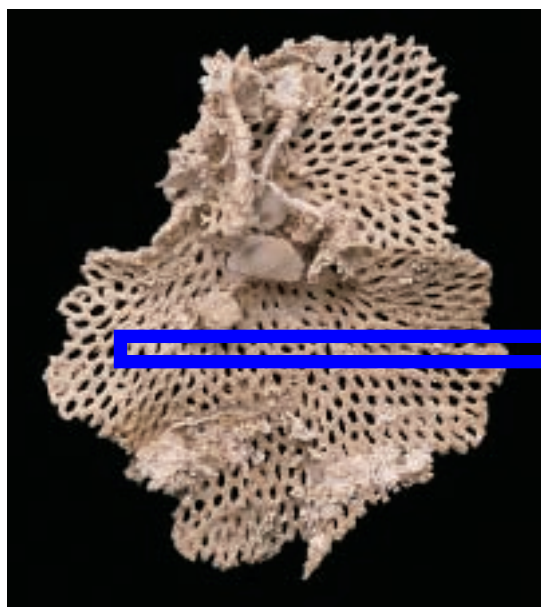
La catastrophe de la fin du Permien frappa certains animaux plus dure-

ment que d'autres. Les groupes fixés sur les fonds marins, qui filtraient la matière organique contenue dans l'eau pour se nourrir, furent particulièrement touchés. Il s'agit notamment des bryozoaires, des brachiopodes articulés (une sorte d'invertébrés à coquille), de bryo-

vivants en colonie) et de divers échinodermes (les crinoïdes ou lys de mer). Parmi les autres groupes marins décimés se trouvent les derniers trilobites, les foraminifères des eaux peu profondes (un des constituants du zooplancton) et les ammonoïdes (des espèces apparentées aux nautilus). Les escargots, les bivalves et les nautiloïdes

traversèrent assez bien cette période, ne perdant que quelques groupes. Les coralloporites furent les seuls animaux marins qui restèrent indifférents au chaos : ce sont des organismes primitifs dont les pièces buccales, bien conservées, sont très utiles pour la datation de la roche.

Les espèces terrestres furent également touchées. Les vertébrés et les insectes subirent des pertes notables : 78 pour cent des familles de reptiles et 67 pour cent de celles des amphibiens disparurent au cours du Permien supérieur. Toutefois la vitesse d'extinction reste débattue : d'après les premières études des fossiles de la région



3. AU PERMIEN, les bryozoaires (à gauche) et les brachiopodes (à droite) abondaient dans les océans (largeur : 40 millimètres environ).



4. PARMI LES VICTIMES DE LA CRISE DE LA FIN DU PERMIEN figure la faune de la région du Karroo, en Afrique du Sud, où l'on a retrouvé cet

Oudendon (un reptile mammalien) de 36 centimètres de long (à gauche). Cette ammonite de neuf centimètres (à droite) provient du Texas.

du Karroo en Afrique du Sud, on avait conclu que le déclin s'était étalé sur plusieurs millions d'années, avec deux périodes d'extinction particulièrement rapides, mais d'autres travaux, plus récents, montrent un déclin plus bref, semblable au rythme de l'extinction marine.

L'extinction de nombreuses espèces d'insectes a transformé cette faune. Sur les 27 ordres d'insectes connus au Permien, huit se sont éteints près de la limite Permo-Trias, quatre ont été décimés mais ont pu se reconstituer ensuite, et trois ont survécu difficilement jusqu'au Trias avant de s'éteindre. Unique exemple d'extinction en masse

d'insectes connu aujourd'hui, la crise du Permien a manifestement correspondu à une dévastation de l'environnement.

À quel moment s'est-elle produite ? On l'ignore, faute de données, mais les feuilles fossiles d'Australie montrent qu'elles ont disparu, et que les types de flores dominants en Australie en ont été modifiés. La disparition de certaines espèces végétales a peut-être également contribué à la disparition des insectes qui s'en nourrissaient.

Les paléobotanistes ont aussi étudié les pollens et les spores. Dans les strates de la fin du Permien, les pol-

lens de gymnospermes (les conifères) sont quasi absents, et dans les couches suivantes, on ne trouve que des cellules de champignons. Les cellules de champignons semblent apparaître dans la dernière partie du Permien – dans l'étage changxingien – et atteindre leur apogée à la limite Permo-Trias.

Les responsables de l'extinction

Tous les fossiles marins et terrestres témoignent qu'à la fin du Permien, la vie a été menacée. Pourquoi? Nous n'avons aucune idée de ce qui a heurté la Terre, comme ce fut peut-être le cas lors de l'extinction des dinosaures. Au milieu des années 1980, des géologues ont cru avoir trouvé d'infimes traces d'iridium (un indice de collision météoritique) à la limite Permo-Trias, dans le Sud de la Chine. Toutefois, personne n'a réussi à confirmer ces affirmations.

De nombreuses autres possibilités se présentent. Tout d'abord, les éruptions volcaniques auraient pu s'intensifier à la fin du Permien. Les trapps sibériens (du mot suédois qui signifie escalier), ces empilements de coulées de lave solidifiées, sont un vestige d'une telle activité. Ces escaliers de lave comptent au moins 45 coulées de 400 à 3 700 mètres d'épaisseur. Leur volume est de l'ordre de 1,5 million de kilomètres cubes. Ils s'étendent encore supérieur, car ils s'étendent apparemment vers l'Ouest, sous les roches plus récentes des montagnes de l'Oural. Comparée à cette éruption, celle du mont Pinatubo, en 1991, ne fut qu'un souffle léger, crachant des cendres, mais pas de lave, et, en 1783, l'éruption du mont Fagradalsfjall n'en fut que 16 kilomètres cubes de lave.

Toutes les laves des trapps sibériens auraient été rejetées en moins d'un million d'années, peut-être en 600 000 ans seulement, de la fin du Permien au début du Trias. En outre, leur rejet aurait contribué à la formation de volcans volcaniques trouvées dans le Sud de la Chine.

Une violente activité volcanique aurait-elle pu menacer la vie sur Terre à la fin du Permien? Les éruptions ont divers effets à court terme : un refroidissement dû à la fois aux poussières et aux sulfates éjectés dans la stratosphère, des pluies acides, des

Les extinctions sont-elles périodiques?

Selon la plupart des paléontologues, l'extinction survenue à la limite entre le Permien et le Trias, c'est-à-dire à la limite entre le Paléozoïque (ère primaire) et le Mésozoïque (ère secondaire), est la plus importante de l'histoire biologique de notre planète. Son impact sur l'évolution ultérieure de la biosphère est indéniable et, à ce titre, elle mérite amplement l'intérêt qu'on lui porte. Si beaucoup de spécialistes cherchent à expliquer les extinctions en masse par un événement unique (l'explication la plus fréquente est celle d'une météorite), Douglas Erwin montre de façon fort convaincante que la crise Permo-Trias est un phénomène complexe. Chaque élément pris séparément ne peut expliquer l'ampleur de cette crise, malheureux concours de circonstances... surtout pour ceux qui, comme les trilobites, ont disparu à cette époque.

Dès 1957, le paléontologue américain a proposé que le phénomène des grandes extinctions est cyclique, survenant tous les 32 millions d'années. Plus tard, en 1983, la période a été ramenée à 26 millions d'années. Pour expliquer ces extinctions cycliques, il a proposé que notre planète était régulièrement bouleversée par des météorites ou par des comètes.

Toutefois, tous les impacts ne sont pas responsables d'extinctions majeures. Un exemple en est le cratère d'impact de la Manicouagan, au Québec. Avec ses 70 kilomètres de diamètre, certains virent en lui la

signature de la météorite responsable de la crise de la fin du Trias, survenue il y a 205 millions d'années. Cependant, il est maintenant établi qu'il a précédé cette crise de près de cinq millions d'années, et qu'il ne saurait être tenu pour responsable.

Aujourd'hui, si un astéroïde semblable à celui qui a heurté la Terre à la fin du Crétacé entrerait en collision avec notre planète, il provoquerait certainement une crise majeure, non pas uniquement à cause de l'énergie destructrice qu'il transférerait, mais parce qu'il tomberait à un moment où nos écosystèmes sont fragilisés. Nous sommes en pleine ère glaciaire et les provinces biogéographiques actuelles ne sont pas encore stabilisées. À cela vient se greffer les effets désastreux de l'activité humaine sur l'environnement. Il est probable qu'à la fin du Crétacé, les écosystèmes étaient également plus fragilisés qu'à la fin du Jurassique, par exemple.

Si les crises semblent être complexes et résulter de l'interaction de plusieurs facteurs, peut-on parler de phénomène cyclique? Quelle est la probabilité que ces différents facteurs se combinent régulièrement pour ébranler tous les écosystèmes de la planète? L'évolution de notre biosphère doit beaucoup au hasard, et chaque crise qui la ponctue est un événement particulier, différent de tous ceux qui l'ont précédée.

Gilles CUNY
Université de Bristol

incendies, la libération de traces d'éléments toxiques et une augmentation du rayonnement ultraviolet par suite d'un amincissement de la couche d'ozone. À plus long terme, le dioxyde de carbone émis, présent dans l'atmosphère, provoque le réchauffement de l'atmosphère.

Toutefois, il semble difficile que le volcanisme ait pu tuer 90 pour cent des espèces marines. En effet, on a examiné des cendres volcaniques déposées, au cours des 100 derniers millions d'années, et on a constaté que leur

ampleur proche de celles qui ont eu lieu au Sud de la Chine, à la fin du Permien. Nous avons montré que ces événements n'ont pas réduit la diversité des formes de vie locales ou globales, sur terre ou dans les océans.

De surcroît, l'impact environnemental de ces éruptions dépend de plusieurs facteurs. L'estimation des

diverses conséquences d'une éruption qui s'est produite il y a quelque 250 millions d'années (la quantité de sulfate éjectée dans la stratosphère, par exemple) est difficile. Ces éruptions volcaniques n'ont peut-être été qu'un maillon de la chaîne complexe qui a abouti à la crise de la fin du Permien.

Les clés de la géochimie

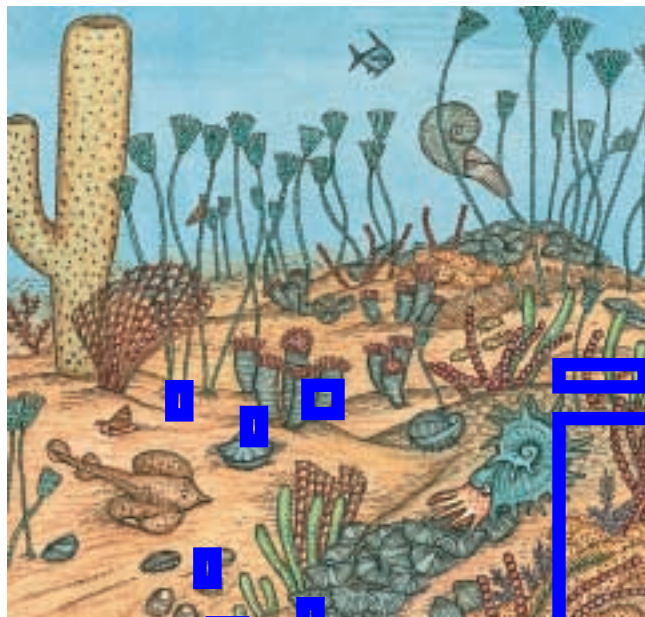
La géochimie a récemment apporté son lot d'indices éclairants. Elle a notamment

pu déterminer les variations des teneurs du carbone (le rapport entre les concentrations en isotope 12 et en isotope 13) ont varié à la fin du Permien : une quantité supérieure de matière organique semble avoir été déposée à cette époque.

Que signifie cette accumulation ? On l'ignore, mais elle correspond à une chute du niveau des mers. Au

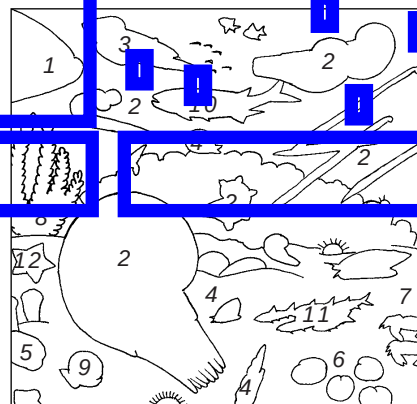
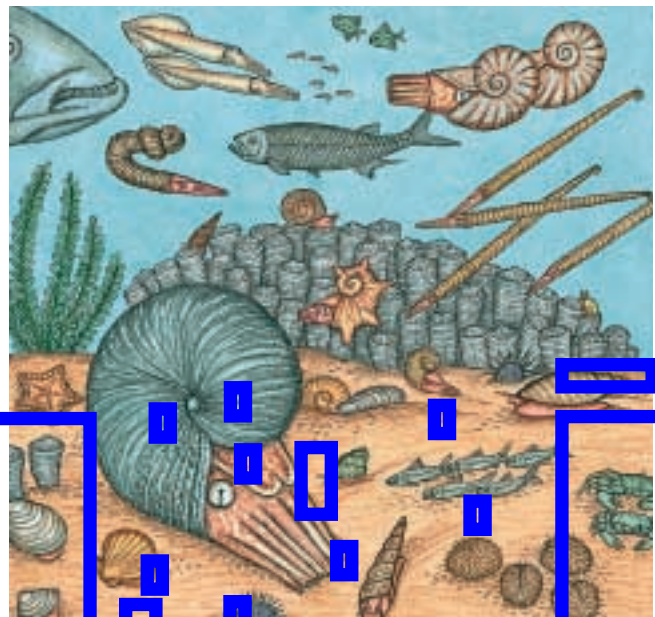
début du Permien, les continents se sont fondus en un unique supercontinent, la Pangée. Autour des plates-formes continentales, les récifs coralliens et diverses communautés des eaux peu profondes étaient florissantes. Puis, vers la fin du Permien, le niveau des mers a baissé, peut-être parce que les modifications de l'écorce terrestre ont élargi les bassins océaniques. La baisse du niveau de la mer a entraîné une réduction du littoral, ce qui intensifia l'érosion et l'oxydation de la matière organique. Cette oxydation réduisit la concentration atmosphérique en oxygène et augmenta celle du dioxyde de carbone. La planète se réchauffa probablement de près de deux degrés.

D'autres perturbations eurent lieu lorsque le niveau des mers remonta,



- PERMIEN**
- 1 ÉPONGE
 - 2 CRINOÏDE
 - 3 BRACHIOPODE
 - 4 NAUTILOÏDE
 - 5 ÉPONGE PERLÉE
 - 6 BRIOZOÏRE
 - 7 CORAIL
 - 8 TRILOBITE
 - 9 ALGUE
 - 10 ESCARGOT
 - 11 POISSON (Janessa)
 - 12 POISSON (Dorypterus)

5. LA STRUCTURE DE LA VIE MARINE changea notablement après l'extinction en masse de la fin du Permien. Au milieu du Permien (à gauche), les mers étaient essentiellement peuplées d'animaux immo-



- CRÉTACÉ**
- 1 CÉLACANTHE
 - 2 AMMONOÏTES
 - 3 BÉLEMNITES
 - 4 ESCARGOT
 - 5 BIVALVE
 - 6 CRABE
 - 7 CRABE
 - 8 ALGUE
 - 9 COQUILLE ST. JACQUES
 - 10 POISSON (Thirissops)
 - 11 POISSON (Davichthys)
 - 12 ÉTOILE DE MER

biles ; les poissons et les trilobites y étaient rares. En revanche, dès le Crétacé (à droite), l'océan avait un aspect moderne, avec des organismes mobiles : des bivalves, des gastéropodes et des poissons.



6. CET OURSIN DU PERMIEN, *Miocidaris*, de quatre centimètres de diamètre, est l'un des rares d'échinodermes à avoir survécu à la crise du Permien.

sans doute quelques centaines de milliers d'années plus tard. Les océans engloutirent les habitats côtiers et les îles. De nombreuses communautés côtières périrent sans doute.

La rareté de la vie marine pendant l'atmosphère a dû aggraver la situation : la quantité d'oxygène dissoute dans l'eau de mer aurait diminué, asphyxiant les espèces marines. N'a-t-on pas observé que ce sont plutôt les organismes les plus sensibles à l'anoxie (ou manque d'oxygène) qui disparaissent, tandis que les plus résistants ont survécu ?

Ainsi diverses causes ont peut-être contribué à la crise de la fin du Permien. Aucune, à elle seule, n'aurait pu provoquer une extinction de cette envergure, mais, malheureusement pour la faune du Permien, elles se sont alors combinées.

L'extinction se serait produite en trois phases : au cours de la première, le niveau des mers a baissé autour du continent pangéen, si bien que l'habitat a été modifié, que le climat est devenu instable et que de nombreuses espèces se sont éteintes.

Lors de cette régression océanique, de violentes éruptions volcaniques ont libéré dans l'atmosphère beaucoup de dioxyde de carbone : l'instabilité climatique s'est renforcée et a fragilisé l'environnement – c'est la deuxième phase. À la fin du Permien et au début du Trias – la troisième phase –, le niveau des mers est

remonté et les continents ont été inondés par de l'eau pauvre en oxygène. Les habitats côtiers ont été détruits et de nombreux groupes qui avaient survécu ont disparu.

La vie après la mort

Les événements qui ont suivi l'extinction sont aussi très intéressants. Après les autres extinctions en masse, la vie a repris le dessus en un million d'années environ, mais, dans le cas de la crise du Permien, il a fallu plusieurs millions d'années pour que la vie marine se reconstruise et s'épanouisse. Toutefois, la récupération paraît peut-être plus longue qu'elle ne l'a réellement été, en raison d'une mauvaise conservation des fossiles.

Quelle qu'ait été la durée nécessaire à son rétablissement, la vie sur terre a notablement progressé. Les données indiquent que les animaux immobiles (brachiopodes, bryozoaires et échinodermes) ont été les plus touchés par la crise permienne. Les animaux mobiles – poissons, bivalves, céphalopodes (la famille des calmars) et gastéropodes (les escargots) – ne représentaient qu'une faible proportion de la communauté.

Peu après l'extinction, pendant le Trias inférieur, les quelques espèces qui avaient survécu abondèrent :

palourdes, ammonoïdes, gastéropodes... *Leptosauros*, un ancêtre des mammifères proche des reptiles, était le vertébré le plus commun sur toute la Pangée. La palourde *Claraia* abondait dans les océans. Vers le milieu du Trias, quelques autres groupes ne vivant qu'en mer commencèrent à réapparaître, sans doute parce qu'ils retrouvaient des conditions marines plus normales. Ces «groupes Lazare», resuscité du royaume des morts, commencèrent à remplacer les faunes disparues.

Les océans ressemblaient alors à ceux d'aujourd'hui : les créatures les plus mobiles, tels les bivalves, les gastéropodes et les crabes, dominaient. Les céphalopodes et les prédateurs capables de nager se diversifièrent. Des organismes plus petits, incapables de se protéger des prédateurs. Une course évolutive s'amorça entre les prédateurs et leurs proies, modifiant l'architecture squelettique au cours du Mésozoïque et produisant une faune plus complexe que celle du Paléozoïque. Des écosystèmes plus élaborés sont apparus : la nourriture était plus abondante et plus variée.

Les changements évolutifs qui ont eu lieu sur la terre ferme sont moins bien connus, parce que les fossiles n'ont pas encore été étudiés systématiquement. Plusieurs groupes de reptiles et d'amphibiens s'éteignirent. Les insectes, cependant, du type libellule, dont les ailes peuvent être repliées le long du corps, vers des formes capables de replier les ailes. Ces nouvelles formes, qui représentent 98 pour cent des insectes actuels, avaient des stades larvaires adulte différenciés, adaptations permettant la colonisation de nouveaux habitats et la résistance aux variations climatiques.

Les espèces qui échappèrent à la crise du Permien étaient-elles dotées d'adaptations qui ont assuré leur survie ou n'ont-elles survécu que par hasard ?

Les palourdes *Claraia* sont emprisonnées dans des roches qui témoignent de conditions anoxiques. La quantité et l'omniprésence de *Claraia* montrent que cette espèce résistait aux faibles concentrations en oxygène. D'autre part, *Miocidaris*, le seul survivant apparent des échinodermes (les oursins), n'a que deux colonnes de plaques

interambulacraires (les zones entre les «pétales» de la coquille d'un oursin) ; d'autres échinides du Permien avaient entre une et huit colonnes de plaques. Comme *Miocidaris* fut le seul genre à survivre, les échinides évoluèrent des formes ayant un nombre variable de plaques à celles qui n'en avaient que deux. Selon certains paléontologues, le squelette d'un échinide est plus solide quand il est composé de deux colonnes de plaques : il aurait ainsi été mieux adapté pour résister aux prédateurs du monde postpermien.

Toutefois ces observations n'indiquent pas si la crise de la fin du Permien a ou non sélectionné certaines caractéristiques. Pourquoi les échinides auraient-ils des plaques à deux colonnes même si l'extinction de la fin du Permien n'avait pas eu lieu ? La faune survivante est-elle constituée des groupes qui étaient les plus abondants et les plus répandus avant l'extinction, et qui avaient, par conséquent, le plus de chances de survivre ? On l'ignore.

En revanche, on sait que l'extinction en masse de la fin du Permien a eu, sur l'histoire de la vie, des conséquences supérieures à tout autre événement survenu pendant le Permien : animaux complexes. Sans cette extinction, la composition du milieu littoral serait très différente. À l'école, les enfants apprendraient ce que sont les crinoïdes et les brachiopodes, et non les étoiles de mer ni les oursins. Sur la plage, ils pêcheraient les trilobites piégés, par la marée descendante, dans des flaques.

Douglas H. ERWIN est conservateur dans le Département de paléobiologie du Musée américain d'histoire naturelle de l'Institut Smithsonian.

David M. LAUP, *Extinction : Bad Genes or Bad Luck ?*, W.W. Norton, 1991.

Permo-Triassic Events in the Eastern Tethys : Stratigraphy, Classification and Relations with the western Tethys, sous la direction de Walter C. Sweet, Yang Zunyi, J.M. Dickins et Yin Hongfu, Cambridge University Press, 1992.

Douglas H. ERWIN, *The Great Paleozoic Crisis : Life and Death in the Permian*, Columbia University Press, 1993.

Douglas H. ERWIN, *The Permo-Triassic Extinction*, in *Nature*, vol. 367, pp. 231-236, 20 janvier 1994.

Les capteurs du mouvement

SASHA ZILL • ERNST-AUGUST SIEBARTH

Grâce à des capteurs qui mesurent les contraintes, les blattes, les crabes et les araignées coordonnent leurs mouvements. Leurs modes de locomotion inspirent les constructeurs de robots.

Une araignée avance lentement vers une mouche prise dans sa toile ; un crabe progresse latéralement, luttant contre le ressac ; une blatte se faufile dans une fissure pour s'abriter de la lumière. Les trois animaux ont un point commun : ils se déplacent en se fondant sur les informations enregistrées par des capteurs situés dans leur exosquelette, l'enveloppe rigide qui les protège (chez ces animaux, le squelette est à l'extérieur). Sur les pattes de ces arthropodes, ces organes détectent les moindres déformations de l'exosquelette ; ils fonctionnent comme des jauges de contrainte, qui mesurent le rapport entre la variation de longueur d'un objet et sa longueur d'origine.

Depuis plusieurs dizaines d'années, les ingénieurs ont imité ces remarquables capteurs : les jauges de contrainte sont des lames métalliques ou semi-conductrices souples, dont la résistance électrique varie avec la contrainte subie. L'appareil le plus courant qui en utilise est sans doute le pese-personne électronique. Lorsque nous montons sur la balance, nous déformons un fléau mécanique ; une jauge de contrainte,

qui en est solidaire, transforme la déviation du fléau en un signal électrique, traduit à l'affichage en une valeur de poids. D'autres jauges surveillent la déformation des ponts, des bâtiments, des automobiles ou des avions.

Ces questions intéressent les spécialistes de robotique, qui construisent des machines qui marchent. De telles machines serviraient dans les environnements où les systèmes roulants sont inutilisables, sur la Terre ou sur d'autres planètes. Toutefois, elles n'ont pas encore satisfait pleinement leurs concepteurs : le robot *Dante*, doté d'un mécanisme à huit pattes articulées que l'on avait envoyé dans des cratères de volcans en Antarctique et en Alaska, avait été endommagé quand il était maladroite : la compréhension des jauges de contrainte des arthropodes permettrait une meilleure coordination de ses pattes.

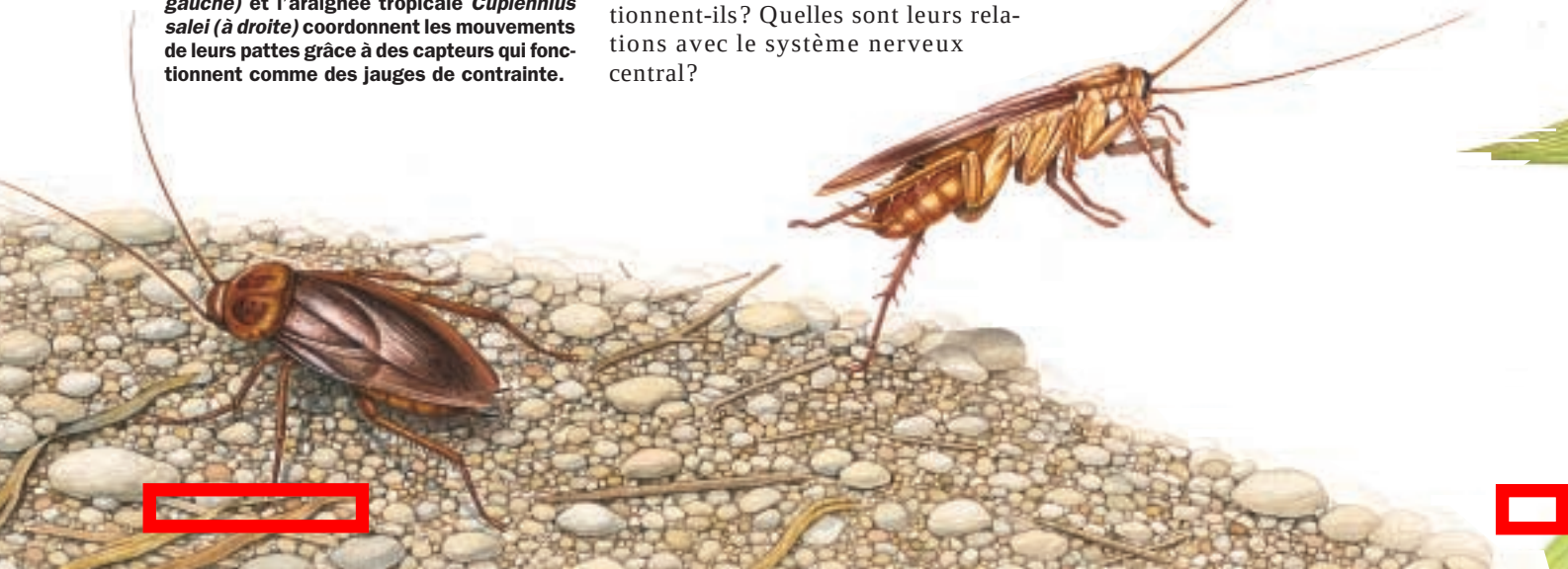
Les jauges modernes font pâle figure devant les capteurs des arthropodes, qui assurent une double fonction de mesure et de commande dans la coordination des pattes : les jauges de contrainte de certains animaux leur permettent même de mémoriser des itinéraires. Comment ces organes fonctionnent-ils ? Quelles sont leurs relations avec le système nerveux central ?

Des canaux sensibles

Chacun des trois principaux groupes d'arthropodes, les insectes, les arachnides et les crustacés, possède des organes spécifiques, qui détectent les contraintes exercées sur l'exosquelette. Chez les insectes, cet organe est la sensille campaniforme, ainsi nommée à cause de sa forme en cloche (en latin, *campana* signifie cloche). Chez les araignées, l'organe correspondant est une sensille en forme de fente : un étroit canal traverse la cuticule, le tissu rigide de l'exosquelette, et aboutit, sur la face externe, à une mince membrane. Les organes sensibles aux forces des crabes ressemblent à des canaux dont l'extrémité est juste au-dessous de la surface de l'exosquelette (voir la figure 2).

Malgré des différences de détail, ces trois types d'organes sensoriels communiquent les informations au système nerveux central. Chacun d'eux est relié à un neurone, sous l'exosquelette, lorsqu'une contrainte déforme l'exosquelette aux alentours d'une sensille, l'extrémité du neurone à laquelle celle-ci est attachée se

1. LA BLATTE *Periplaneta americana* (à gauche) et l'araignée tropicale *Cupiennius salei* (à droite) coordonnent les mouvements de leurs pattes grâce à des capteurs qui fonctionnent comme des jauges de contrainte.



déforme simultanément. Le neurone émet alors des signaux électriques, qui se propagent vers le système nerveux central.

Bien que l'on connaisse depuis longtemps l'anatomie des capteurs des arthropodes, leur fonctionnement n'a été découvert que dans les années 1930, lorsqu'on a appris à enregistrer l'activité des neurones, à l'aide d'amplificateurs électroniques. John Pringle, de l'Université d'Oxford, a été le premier à étudier les arthropodes de cette façon. Il a remarqué que les capteurs étaient orientés dans des directions précises et il a supposé qu'ils étaient sensibles aux contraintes dans une direction particulière. En outre, les capteurs de certaines espèces sont situés à proximité des articulations et aux extrémités des pattes, zones de l'exosquelette particulièrement soumises à des contraintes, et près de points de l'exosquelette solidaires des tendons des muscles : les sensilles des arthropodes réagissent probablement aux contraintes créées par les contractions des muscles internes.

Plus récemment, Reinhard Blickhan et Friedrich Barth, de l'Université de Francfort, ont montré la grande sensibilité des jauges de contrainte des arthropodes. En attachant des jauges miniatures à la patte d'une araignée, ils ont directement mesuré les contraintes exercées sur la patte de l'araignée tropicale *Cupiennius salei*. Ils ont notamment observé que la cuticule d'un arthropode est presque aussi dure qu'un os humain, à masse égale : la cuticule et l'os ont un module d'élasticité (le rapport entre la pression subie et la déformation relative) de l'ordre

de dix milliards de newtons par mètre carré. Pour déceler les déformations d'une structure aussi rigide, il faut des capteurs remarquablement sensibles : leur sensibilité au déplacement est du même ordre que celle de l'oreille humaine vis-à-vis du son.

Des études physiologiques ont prouvé la sensibilité directionnelle de ces capteurs des arthropodes. La sensille campaniforme des insectes réagit plus, à intensité égale, à une force qui la comprime qu'à une force qui la tire. Chez les araignées, les canaux sensoriels sont également très directionnels. Des canaux de différentes longueurs sont regroupés sur les pattes en des ensembles en forme de harpe. Cette disposition favorise l'aptitude de l'araignée à trouver la direction des forces appliquées. Les sensilles campaniformes ont des capacités similaires.

Si les arthropodes sont pourvus de jauges de contrainte, comment les utilisent-ils pour se déplacer ? Pour répondre à cette question, la blatte est un sujet de choix : dépourvue de tout moyen de défense, elle ne doit sa survie qu'à sa capacité à se déplacer de façon particulièrement bien coordonnée.

Les sensilles campaniformes des blattes sont fixées à l'exosquelette par un capuchon dur de la cuticule. Les sensilles sont situées sur le segment tibial de la patte, autrement dit l'avant-bras, forment un réseau et sont réparties en deux sous-groupes : la partie des capuchons la plus proche du corps

est orientée perpendiculairement à l'axe longitudinal de la patte, et l'autre partie pointe parallèlement à l'axe de la patte. Il est intéressant de remarquer que les ingénieurs disposent souvent leurs jauges de contrainte de la même façon sur les structures qu'ils veulent surveiller ou analyser.

Flexion et extension !

Pour connaître les relations entre ces sensilles et les muscles, nous avons entravé des blattes, en agrafant leurs pattes sur un support, puis nous avons stimulé les capuchons de chacun des organes avec un filament de tungstène de quelques micromètres de diamètre. Simultanément nous enregistrions l'activité des muscles du tibia. Les capteurs dont les capuchons sont

perpendiculaires à l'axe de la patte réagissent à l'extension (vers le bas) ; ils excitent le muscle extenseur (dont la fonction est la même que celle du muscle extenseur de la cuisse relié à la rotule, chez l'homme). Les sensilles dont les capuchons sont parallèles à la patte réagissent aux flexions ventrales (vers le haut) et inhibent le muscle extenseur.

De plus, les récepteurs réagissent aux contraintes créées par les contractions des muscles



de l'animal. Les sensilles aux capuchons perpendiculaires ne réagissent que lors de la contraction des muscles fléchisseurs (situés à l'arrière de la cuisse chez l'homme).

Les insectes qui possèdent des capuchons parallèles ne réagissent qu'à celle des muscles extenseurs.

Dans ces expériences, les blattes étaient entravées. Comment les sensilles participent-elles à la marche en conditions normales? Pour répondre à cette question, nous avons enregistré

l'activité des récepteurs chez des insectes qui se déplaçaient librement, l'activité des récepteurs chez des insectes qui se déplaçaient librement,

muscles du tibia. Lorsqu'elles marchent, les blattes utilisent leurs pattes comme presque tous les animaux : elles soulèvent d'abord une patte, puis l'avancent au cours d'une phase de balancement ; elles baissent ensuite la patte en poussant vers l'arrière, pendant une phase d'appui. C'est pendant cette dernière phase que la patte soutient effective-

ment l'animal et le propulse. Les muscles fléchisseurs sont actifs pendant la phase d'appui.

que les muscles extenseurs se contractent pendant la phase de balancement.

Pour enregistrer l'activité électrique des sensilles, nous avons implanté des sondes dans une patte, près du nerf qui contient les neurones reliés aux récepteurs. Au début de la phase d'appui, l'animal place une patte sur la surface de marche et

BLATTE



CRABE



ARAIGNÉE



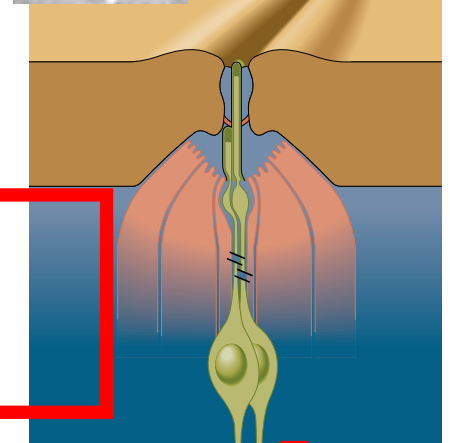
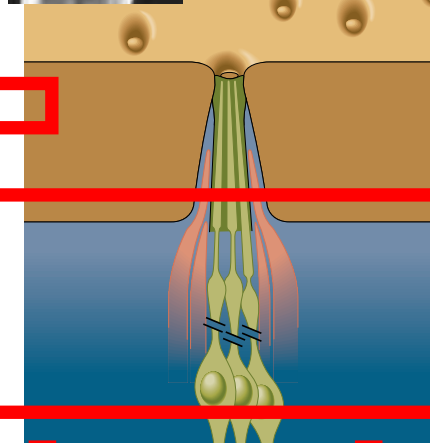
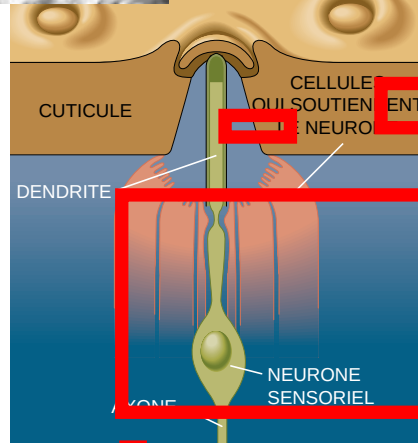
ORGANE SENSIBLE
EN FORME HÉMISPHÉRIQUE
20 MICROMÈTRES
DE DIAMÈTRE



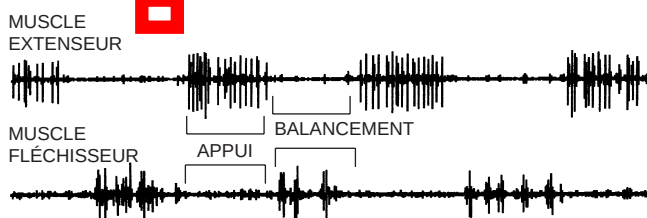
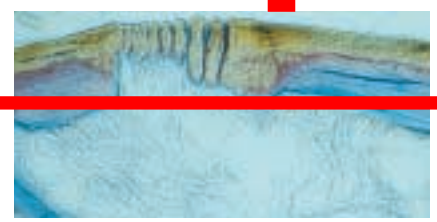
ORGANE SENSIBLE
AUX FORCES
5 MICROMÈTRES
DE LONG



ORGANE SENSORIEL
EN FORME DE HARPE
GRAND AXE :
17 MICROMÈTRES



2. LES CONTRAINTES QUI S'EXERCENT sur l'exosquelette des arthropodes sont détectées par des organes sensoriels, situés en divers endroits des pattes (flèches rouges, rangée du haut). Les micrographies en montrent la forme (cartouches en noir et blanc). Ces organes sont caractérisés par la présence de canaux traversant la cuticule (dessins au milieu). Des neurones traversent ces canaux et sont reliés à des membranes minces situées près de la surface de l'exosquelette. Chaque neurone est prolongé par un axone, qui le relie au système nerveux central. Une coupe en couleurs d'une partie de la cuticule d'une patte d'araignée (en bas, à droite) montre les fentes des canaux, d'une largeur de quelques micromètres.



3. LA MARCHÉ DE LA BLATTE résulte d'un ensemble de cycles à deux temps : l'appui et le balancement de chaque patte. On a représenté ici le cycle de la patte arrière droite (en rose). Dans la phase d'appui, la patte prend appui sur une surface et propulse l'insecte (1,2) ; dans la phase de balancement, la patte est soulevée et ramenée vers l'avant (3,4). Des mesures d'activité musculaire (à gauche) montrent que les muscles extenseurs sont actifs pendant la phase d'appui, tandis que les muscles fléchisseurs prennent le contrôle pendant la phase de balancement.

s'appuie sur elle de tout son poids. Cette force courbe la face supérieure (dorsale) du tibia : les sensilles dont les capuchons sont perpendiculaires à l'axe de la patte sont activées. Elles commandent alors la contraction du muscle extenseur, ce qui propulse l'animal.

Le muscle travaille jusqu'à la fin de la phase d'appui, lorsque des contractions prolongées courbent la face inférieure (ventrale) du tibia. Cette courbure active alors les récepteurs dont les capuchons sont parallèles à l'axe de la patte : ils inhibent le muscle extenseur et activent le muscle fléchisseur, qui ramène la patte de la terre vers l'avant pour préparer le pas suivant. Ainsi, grâce aux informations que lui fournissent ses juges de sensilles biotiques, l'animal suit les contraintes de courbure alternativement dorsale et ventrale qui s'exercent sur sa patte et ajuste ses mouvements en conséquence.

Des chaussures pour les crabes

Le mécanisme que nous avons exploré chez la blatte s'apparente à un enchaînement de réflexes. Les organes sensibles aux forces participent toutefois à des tâches de coordination plus complexes. Les crabes, par exemple, sont confrontés à des problèmes différents de ceux qui se posent aux blattes : ils ont dix pattes, ce qui requiert davantage de coordination, et nombre d'entre eux, tel le crabe vert *Carcinus maenas*, se déplacent latéralement. Les pattes du crabe servent donc aussi bien à pousser qu'à tirer l'animal.

Les organes de détection des contraintes du crabe sont étroitement regroupés sur le dactyle, le segment équivalent au « pied », à l'extrémité de la patte. Ces organes sensibles aux forces de suivre les forces qui s'exercent le long de la patte : ils réagissent aux courbures du dactyle et aux contraintes qui résultent de la marche.

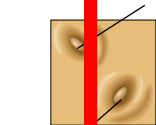
Ces organes sensibles aux forces modulent aussi l'activité du muscle de marche principal du crabe, le muscle abaisseur, qui appuie la patte sur la surface de marche.

Fred Libersat et François Clarac, alors au laboratoire CNRS d'Arcachon, ont découvert que les capteurs participent à des comportements plus com-

plexes que des réflexes. Pour tester la locomotion de ces animaux, ils avaient chaussé des crabes d'un petit sabot bien ajusté, une sorte d'étrier miniature, dont le serrage pouvait être réglé par une vis. Ils déformaient ainsi le dactyle d'une patte pendant les déplacements du crabe et en stimulaient en permanence les récepteurs.

Lorsque l'on comprime ainsi le dactyle du crabe, la durée et l'amplitude de l'activité du muscle abaisseur de la patte appareillée diminuent. D'autre part, l'activité des muscles abaisseurs des pattes voisines est modifiée : ils sont actifs plus longtemps et ils fonctionnent de façon coordonnée avec et d'autre de la patte comprimée. Autrement dit, lorsqu'une charge s'applique sur une patte, les systèmes de cette patte et ceux des pattes voisines de se relâcher et aux pattes voisines de prendre le relais de cette charge de façon coordonnée : les capteurs d'une patte participent à la commande de l'activité réflexe des autres pattes.

CAPTEUR PERPENDICULAIRE (EXCITE L'EXTENSEUR)



MUSCLE EXTENSEUR

CAPTEUR PARALLÈLE (EXCITE LE FLÉCHISSEUR)

MUSCLE FLÉCHISSEUR

EXOSQUELETTE

TIBIA

MUSCLE EXTENSEUR (QUADRICEPS)

MUSCLES FLÉCHISSEURS

OS

4. LES PATTES DES CRABES et les jambes humaines fonctionnent grâce à des muscles similaires. Les muscles fléchisseurs, à l'arrière de la cuisse, correspondent aux muscles fléchisseurs d'insecte, et le quadriceps aux muscles extenseurs. Les organes sensibles aux forces de la patte sont orientés de façon à détecter des contraintes dans toutes les directions et à commander des muscles spécifiques.

PAS DE CONTRAINTÉ

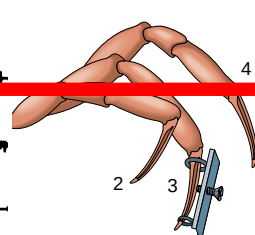
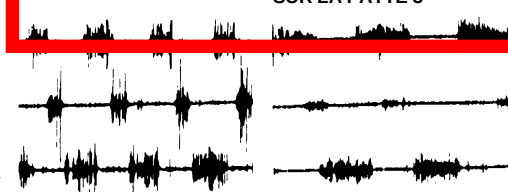
CONTRAINTÉ SUR LA PATTE 3

PATTE 2

PATTE 3

PATTE 4

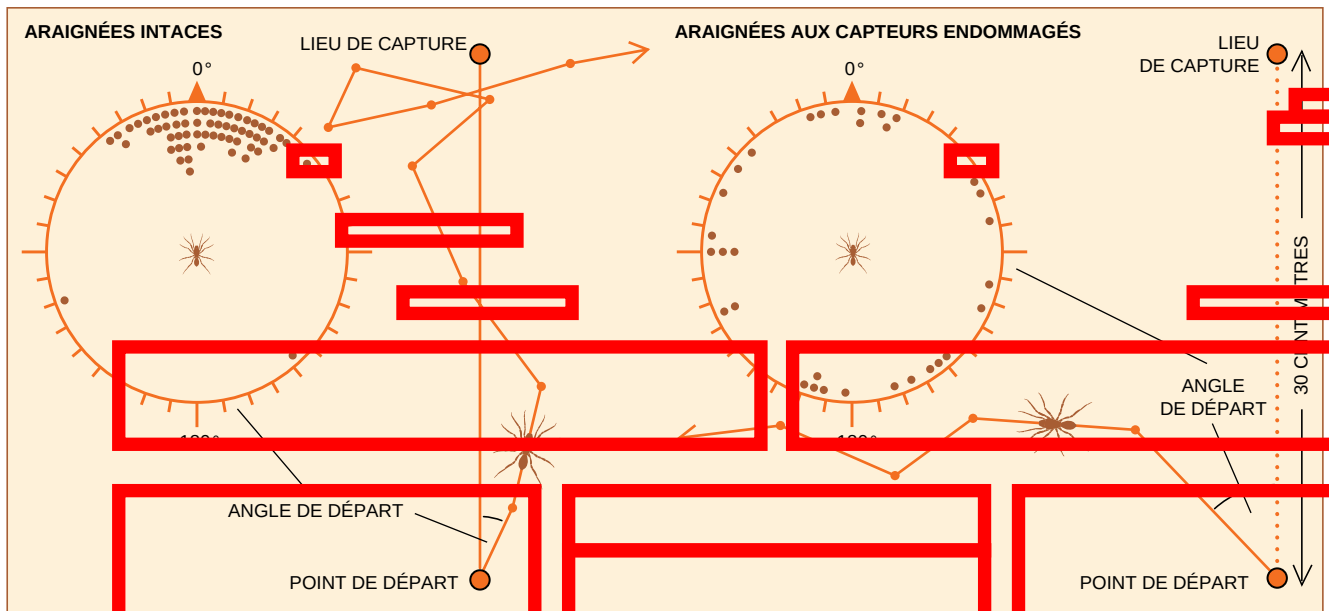
ACTIVITÉ MUSCULAIRE



5. LA COORDINATION DES PATTES du crabe est perturbée par une action qui s'exerce sur ses organes sensibles aux forces, comme le montre cette expérience où l'on place un petit étrier qui courbe l'extrémité d'une patte (la patte numéro 3). La stimulation continue des organes sensoriels empêche le fonctionnement des muscles abaisseurs de la patte et excite les muscles analogues des pattes voisines.

Des juges à mémoire

Des organes sensibles aux forces ont des fonctions encore plus perfectionnées : les araignées les utilisent pour mémoriser des informations relatives à leurs déplacements, comme le montre l'expérience suivante. On place une araignée tropicale sur une surface plane, on l'aveugle, et on lui présente une mouche virevoltante. On stimule alors cette dernière par les vibrations qu'elle émet. On oblige alors l'araignée à s'éloigner de sa proie, en marchant, jusqu'à une certaine distance du site de capture où on l'attache. Elle repart au point d'origine, même si la mouche en a été enlevée. Quand on a éloigné l'araignée du site de capture en lui faisant suivre une trajectoire



6. L'ARAIGNÉE CUPIENNIUS mémorise ses déplacements grâce à ses organes sensoriels en forme de fentes. Aveuglées, la plupart de ces araignées repartent dans la direction où elles avaient précédemment capturé une mouche (à gauche), même si elles progressent en zigzag. Les

points représentés sur le diagramme circulaire correspondent aux angles de départ. Au contraire, des araignées chez qui ces organes sensoriels sont endommagés repartent dans des directions aléatoires (à droite), le plus souvent sans jamais atteindre le point de capture.

sinueuse, elle ne retourne pas à son point de départ en suivant cette trajectoire, mais coupe les angles : elle a mémorisé l'emplacement de la mouche.

Cette mémorisation provient des jauges de contrainte, non des indications extérieures de type visuel, olfactif, ou liées à la pesanteur : quand on détruit les organes sensibles aux forces situés près des articulations des pattes, les araignées ne savent plus s'orienter. Elles partent dans de mauvaises directions, sont incapables de corriger leurs erreurs au cours du trajet et finissent par se perdre. L'absence des capteurs de force est pourtant leur seul handicap pour capturer la proie. En l'absence d'indications externes qui leur permettent de s'orienter, ces animaux nocturnes utilisent des informations relatives à leurs propres mouvements, que leur fournissent les détecteurs de contraintes.

L'étude des jauges de contrainte des arthropodes améliore notre connaissance de ces invertébrés, mais elle fournit aussi

aux spécialistes de la robotique. Elle confirme, tout d'abord, que les ingénieurs ont sans doute choisi correctement la disposition du matériau conducteur des jauges artificielles : cette organisation en réseau ou en bandes adjacentes donne, comme chez les arthropodes, une sensibilité directionnelle, et une précision accrue par

la réalisation simultanée de plusieurs mesures.

En outre, plusieurs équipes d'ingénieurs tentent d'utiliser des réseaux de capteurs simples pour obtenir des comportements aussi complexes que ceux des arthropodes. Un robot aussi agile et aussi bien équilibré qu'un arthropode aurait de nombreux usages. Il serait adapté au déplacement sur des terrains accidentés où des véhicules à roues ne peuvent pas circuler, à la recherche de déchets toxiques ou dans les cratères volcaniques de la Terre, sur la Lune ou sur Mars. La Marine américaine, notamment, voudrait mettre au point des robots ressemblant à des crabes qui, partiraient des bateaux, atteindraient le rivage et rechercheraient des mines.

Une équipe de l'Université de Case Western Reserve a construit des robots à six pattes en s'inspirant du système nerveux des arthropodes : la commande des mouvements est répartie dans les pattes. Ces robots parviennent à marcher assez rapidement sur un réseau de lames largement espacées. Une telle conception remédie partiellement à des problèmes qui se posent avec la plupart des robots à plusieurs pattes : ceux-ci doivent, pour faire un pas, procéder à de laborieux calculs à partir de données fournies par de nombreux capteurs.

Les jauges de contrainte biologiques sont apparues chez les arthropodes il y a plus de 200 millions d'années : nous avons un certain retard à combler pour les utiliser aussi bien. Nous devons attendre encore un peu avant de voir des robots aussi perfectionnés que leurs modèles vivants.

Sasha ZILL est professeur à la Faculté de médecine de l'Université Marshall, à Huntington. Ernst-August SEYFARTH est professeur de zoologie et de neurosciences à l'Université de Francfort.

Sasha N. ZILL et David T. MORAN, *The Exoskeleton and Insect Proprioception*, in *Journal of Experimental Biology*, vol. 91, pp. 1-14 et 57-75, 1981.

Neurobiology of Arachnids, sous la direction de F.G. Barth, Springer-Verlag, 1985.

F. LIBERSON, F. CLARAC et S. ZILL, *Force-Sensitive Mechanoreceptors of the Dactyl of the Crab: Single-Unit Responses during Walking and Evaluation of Function*, in *Journal of Neurophysiology*, vol. 57, n° 5, pp. 1618-1637, mai 1987.

Biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robotics, sous la direction de R. R. Arbib, R. E. R. et T. McKeen, Academic Press, 1988.

Ernst-August SEYFARTH et Andrew S. FRENCH, *Intracellular Characterization of Identified Sensory Cells in a New Spider Mechanoreceptor Preparation*, in *Journal of Neurophysiology*, vol. 71, n° 4, pp. 1422-1427, avril 1994.

Caïmans et piranhas

Photographies :
Xavier Ferrer et Adolfo de Sostoa

Texte : Xavier Ferrer

La famille des Crocodiliens comporte 21 espèces vivantes. Parmi celles-ci, le caïman (*Caiman yacaré*) vit dans le Mato Grosso, au Brésil, et dans des zones adjacentes du Paraguay, de la Bolivie et de l'Argentine. Il peut atteindre trois mètres de long et se nourrit principalement de poissons. Sa nourriture favorite est le piranha (*Serrasalmus*), qu'il décime : c'est l'appétit du caïman qui détermine la taille de la population des piranhas. Ces poissons essentiellement carnivores enrichissent leur alimentation de fruits et de végétaux à certaines périodes de l'année.

L'étroite relation entre le caïman et le piranha a été étudiée à Corrientes, en Argentine, où la diminution des populations de caïmans résulte de la surpêche de poissons comestibles dont se nourrissent les piranhas.

La photographie n'est pas facile : après de longues heures d'observation à la jumelle, nous avons couru dans le marécage pour saisir l'instant propice où le caïman sort de l'eau tenant sa proie.





π en musique

JEAN-Philippe FONTANILLE

Écoutez les décimales du nombre π .

La racine carrée du nombre deux fascina les Pythagoriciens, qui découvraient là le premier nombre irrationnel ; puis on a cru que le nombre d'or contenait les canons de la beauté. π , rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre, est auréolé du même mystère. A-t-il vraiment des vertus esthétiques ? Compositeur et passionné de sciences, j'ai cherché la réponse dans le domaine musical. Le morceau intitulé *Harmonisation de π* , dont le début est donné ici, fait entendre les décimales de π . Quel mathématicien non prévenu les reconnaîtrait-il à l'audition du morceau ?

Comment est-il construit ? La gamme naturelle comportant sept degrés (do, ré, mi, fa, sol, la, si), j'ai d'abord écrit π en base sept. À cette fin, on considère d'abord le premier chiffre, 3, que l'on conserve. On soustrait 3 à π , puis on multiplie par sept ; on obtient 0,9911... Le premier chiffre étant 0, on conserve ce 0 comme première décimale en base sept. On multiplie alors 0,9911... par sept, et l'on obtient 6,9379... : la deuxième décimale est 6. En poursuivant ainsi, on trouve l'écriture en base sept suivante : 3,066 365 143 203 603 411 026 340 224 465 222 664 352 005 024 015 544 321 542 643 102 51. De la sorte, on peut convertir toute décimale en une note, selon le code suivant : 0 pour do, 1 pour ré, 2 pour mi, 3 pour fa, 4 pour sol, 5 pour la, 6 pour si.

À ce stade, n'importe qui pourrait jouer les décimales de π sur un instrument, mais le résultat est musicalement limité. Une façon d'améliorer la musique des décimales consiste à utiliser chaque chiffre, non pour coder une seule note, mais un accord complet, dont cette note sera la fondamentale : par exemple, 0 codera l'accord de do majeur (do-mi-sol) ou ses renversements, tel mi-sol-do. Pour des raisons que nous examinerons plus loin, le code a été choisi de la façon suivante : 0 pour do majeur, (do-mi-sol-do), 1 pour ré mineur (ré-fa-la-ré), 2 pour mi mineur (mi-sol-si-mi), 3 pour fa majeur (fa-la-do-fa), 4 pour sol majeur (sol-si-ré-sol), 5 pour la mineur (la-do-mi-la) et 6 pour si mineur (si-ré-fa-si).

Ce nouveau codage impose alors un véritable travail d'harmonisation, mais il reste le reflet fidèle des décimales de π . Bien que déposée comme telle, cette

œuvre n'est pas vraiment une composition, mais un arrangement sur des accords donnés. Le travail artistique se limitant à choisir si ces accords seront majeurs ou mineurs, dièses ou bémols, selon le jeu des tonalités, ou à surajouter d'éventuels enrichissements. Musicalement, l'irrationalité de π pose un problème : toute

composition musicale normale est fondée sur la répétition, l'alternance et le développement des thèmes. Ici, en revanche, ces procédés sont exclus, car les décimales sont réparties de façon aléatoire. C'est donc un parti pris que d'avoir limité l'œuvre aux premières décimales.

L'HARMONISATION

Examinons maintenant la réalisation dont les premières mesures sont proposées ici. C'est un extrait d'un morceau qui dure deux minutes et demie, pour guitare. Il se divise en quatre parties. Afin de donner au chiffre 3, à gauche de la virgule, une importance particulière, la note qui lui est associée (un fa) détermine non seulement le premier accord (un fa

majeur) mais aussi la tonalité des 18 premières mesures. Ainsi, bien que les décimales continuent ensuite d'égrener les accords qui leur sont associés, elles restent sous la « tutelle » de ce 3.

Certaines décimales, créant un contexte harmonique favorable, ont reçu un développement dans le respect de l'accord qui leur était associé. Ainsi la 44^e décimale (un 2, associé à un accord de *mi* mineur), est traitée sur huit mesures, tandis que les 7^e et 16^e décimales ne durent qu'un temps et demi. D'autres décimales dont la suite donnait naturellement de belles successions d'accords n'ont pas été privilégiées : je voulais rester le plus fidèle possible à la suite des décimales, qui jouent toutes le même rôle dans le

nombre π . D'ailleurs, ce changement aurait pu perdre des informations intéressantes : ainsi les décimales 45 à 50 donnent une belle succession d'accords formant une cadence.

Le nombre π fascine, mais d'autres harmonisations peuvent être tentées : racine de deux, le nombre d'or... Dans les trois cas, c'est le système tonal traditionnel qui a été retenu pour le codage, mais on pourrait également utiliser le système dodecachordique, grâce à un codage en base 12. Il y a beaucoup à faire.

Jean-Philippe FANTAILLE est compositeur et professeur de guitare à Paris.

FRANCE INFO
et
POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchecourt.

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 11 heures 44,
16 heures 21,
18 heures 14,
20 heures 12,
22 heures 21
et 0 heure 51

Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 27 septembre 1996.

FRANCE
info

Le monde agité de la coopération

JEAN-PAUL DELARUE • PHILIPPE MATHIEU

Des mouvements oscillatoires inattendus aident à comprendre pourquoi nous ne sommes pas tous débonnaires.

La simulation des comportements sociaux sur ordinateur montre que, là où tout ne semblait qu'«ordre, calme et volupté», le diable a introduit un maléfice qui ferait douter de ses choix le plus saint des hommes.

Nos recherches systématiques utilisant des ordinateurs puissants qui ont calculé pendant des journées entières ; elles ont montré que les comportements sociaux présentent des aspects oscillatoires inattendus. Ces expériences jettent un doute sur les conclusions généralement admises concernant l'intérêt de la coopération entre entités jouant au «dilemme des prisonniers».

Ce jeu, dont nous indiquerons les règles plus loin, est le modèle naturel pour étudier les mécanismes de coopération entre organismes indépendants : ceux-ci doivent choisir entre une attitude d'association ou une attitude d'opposition. Aussi, les conclusions morales que l'on déduisait des résultats anciens doivent prendre en compte des dynamiques nouvelles que nous avons rencontrées.

S'ASSOCIER OU SE COMBATTRE ?

Deux suspects emprisonnés sont questionnés par la police. Ils s'interrogent : doivent-ils être solidaires l'un de l'autre en n'avouant rien aux policiers ou doivent-ils trahir leur compère pour bénéficier d'une remise de peine ? C'est le dilemme des prisonniers. Pour en illustrer la généralité, examinons le cas économique du travail spécialisé.

Vous êtes meilleur sabotier que votre voisin, lequel est meilleur cultivateur que vous ; votre intérêt commun est de vous spécialiser et de créer une association. Vous resterez dans votre atelier et lui dans son champ, et vous échangerez des sabots contre du blé. Globalement, vous gagnerez chacun, en coopérant ainsi, plus que si vous refusiez de com-

mercier ou avec l'autre. Pourquoi ? Parce que, si vous ne coopérez pas, vous seriez obligé de passer une partie de votre temps à faire des sabots et une autre partie à cultiver votre blé, tâche où vous êtes inefficace. Vous pourriez être tenté d'aller voler le blé de votre voisin ! Est-ce une bonne idée ? Vous en tirez un bénéfice immédiat, mais vous risquez alors de vous fâcher définitivement avec lui. Toute coopération future est alors interdite, et vous perdez le bénéfice des échanges. Il en va de même si votre voisin vole vos sabots.

Ce type de situations apparaît dans un grand nombre de contextes : en économie, en biologie, en sciences politiques, en psychologie, en sociologie, en stratégie militaire, en informatique, etc. Dans ces situations, chaque joueur a le choix entre la coopération – *c* – et la trahison – *t* – (le vol des biens du voisin amenant la trahison) ; l'intérêt commun est la coopération, alors que l'intérêt individuel est la trahison (le voleur gagne plus). Les gains des entités dans un tel jeu sont fonction de leurs choix. Indiquons les paramètres, classiques mais adaptables, du dilemme du prisonnier.

Si les deux entités coopèrent – ce que l'on note *(c,c)* – toutes deux gagnent journalièrement trois points, et la «production quotidienne» globale est de six points.

Si l'une trahit et l'autre coopère – *[t,c]* – celle qui trahit et exploite son adversaire gagne cinq points, et l'autre, qui se fait exploiter, ne gagne rien. La production quotidienne est cinq points au lieu de six : un voleur fait baisser la production générale !

Si les deux entités trahissent simultanément (défiance mutuelle, conflit, etc.) – *[t,t]* –, cela leur coûte du temps et de l'énergie et, de plus, elles perdent le bénéfice des échanges de compétence. On convient qu'alors elles ne gagnent chacune qu'un point chaque jour.

Dans une telle situation de dilemme des prisonniers, ce qu'a fait votre adversaire les jours précédents influera sur votre décision de coopérer ou de trahir. Nous l'envisagerons ici pas d'autres valeurs de points gagnés, mais les conclusions obtenues ne dépendent pas du choix, pourvu qu'on respecte les principes généraux du jeu.

Il y a une vingtaine d'années, en utilisant des simulations informatiques, Robert Axelrod de l'Université du Michigan, a mis en évidence une stratégie simple appelée DONNANT-DONNANT (ou TIT FOR TAT), souvent efficace : «Le premier jour je coopère et, les jours suivants, je joue comme mon adversaire a joué la veille.»

Cette stratégie associe un certain nombre de bonnes propriétés qui expliquent son succès :

- Elle est gentille : elle ne prend jamais l'initiative de la trahison.

- Elle est réactive : contrairement à la stratégie LUNATIQUE qui décide de coopérer ou de trahir au hasard en tirant à pile ou face à chaque coup, la stratégie DONNANT-DONNANT détermine le comportement d'un joueur en fonction de ce que fait son partenaire.

- Elle est permissive, ce que n'est pas la stratégie RANCUNIÈRE. Cette stratégie règle son jeu sur le principe «je coopère jusqu'à ce que mon adversaire trahisse ; et si cela arrive, alors je trahis toujours».

- Elle est simple, ce qui est avantageux en première analyse.

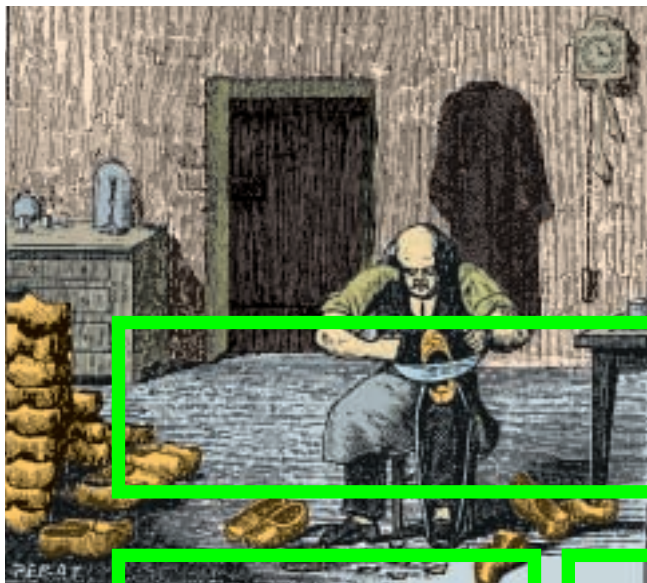
L'existence de stratégies plus complexes réussissant mieux que DONNANT-DONNANT dans des contextes nombreux et variés a été prouvée : c'était l'une des conclusions d'un article précédent (voir *L'ultraïsme perfectionné, Pour la Science*, mai 1993). Les stratégies proposées pour les lecteurs de la revue nous ont permis de la vérifier.

Ainsi la stratégie GADUELLE, moins simple et plus efficace que DONNANT-DONNANT, est : «Je coopère mais lorsque mon adversaire me trahit, je réplique par une série de *N* trahisons successives, où *N* est le nombre de trahisons passées de mon adversaire, suivie de deux étapes de coopération ayant pour objet de renouveler une phase de coopération.»

TOURNOIS ET SIMULATIONS ÉCOLOGIQUES

On compare les stratégies à l'aide de deux types de compétitions : les tournois (a) et les simulations écologiques (b).

Dans les tournois, chacune des stratégies étudiées joue contre chaque autre (par exemple, lors d'une confrontation



1. Le dilemme des prisonniers modélise les interactions sociales lorsque existe une tentation de tricherie ou de vol. Pour que la coopération ait lieu, ce qui est l'attitude globalement la plus payante, il faut que chacun résiste à la tentation de tricher. Dans cet exemple, les deux acteurs sont un sabotier et un cultivateur. La coopération est symbolisée par c et la trahison par t. Si sabotier et cultivateur coopèrent (situation [c, c]), chacun fait ce qu'il fait bien

faire et procède à des échanges avec son voisin. Le profit général est de 6 F répartis équitablement entre les deux travailleurs. Si l'un des deux protagonistes vole le bien de son voisin (situation [t, c]), le voleur gagne 5 F et le volé ne gagne rien. Le voleur obtient un bon revenu, mais son action coupable fait baisser le rendement général. Dans la troisième situation [t, t], la non-coopération et de surveillance mutuelle, le sabotier et le cultivateur gagnent chacun 1 F seulement.

de 100 coups) ; on compte les points gagnés par chaque stratégie lors de ses diverses confrontations, et on les additionne. La stratégie qui totalise, lors de la confrontation, le plus grand nombre de points gagne le tournoi.

Le tableau du tournoi permet de calculer des simulations écologiques qui sont beaucoup plus intéressantes. La sélection entre stratégies n'autorise que la victoire des stratégies robustes, contrairement aux tournois où gagnent parfois des stratégies spécialement adaptées à un environnement déterminé, mais incapables de se maintenir quand l'environnement change.

Dans les simulations écologiques, on prend un certain nombre de copies des stratégies que l'on veut faire concourir, par exemple 100 exemplaires de DONNANT-DONNANT, 100 exemplaires de GRADUELLE, 100 exemplaires de LUNATIQUE. On confronte alors chacune des 300 stratégies aux 299 autres. Le total des points gagnés par chaque stratégie détermine l'effectif de sa descendance : celle-ci est proportionnelle au nombre de points qu'elle a obtenus. On calcule les effectifs nouveaux en supposant que l'effectif total reste inchangé (300), et l'on obtient ainsi la deuxième génération. La troisième génération est calculée de la même façon à partir de la deuxième, etc.

Une stratégie peut être mal classée lors d'un tournoi et, pourtant, gagner la simulation écologique. On constate le

plus souvent que les stratégies méchantes (qui prennent l'initiative de trahir) se font éliminer rapidement. Cela favorise les stratégies qui souffraient d'être trop coopératives et se faisaient exploiter par les méchantes : leurs effectifs remontent donc, ce qui entraîne dans la grande majorité des cas l'apparition d'un mélange de stratégies gentilles. Un moment arrive où chaque stratégie restante coopère tout le temps avec toutes les autres. Dès cet instant, les effectifs ne changent plus : les gains sont équitablement répartis, et les descendance est proportionnelle aux effectifs, maintenant fixés.

Dans ce modèle de comportement social, le voleur obtient un profit substantiel aux dépens du volé, et aucune religion, police ou armée n'est là pour favoriser les comportements coopératifs ; pourtant, la mécanique mathématique du jeu conduit à un univers paisible et civilisé où seuls les gentils perdurent et où voleurs et exploiters disparaissent.

Ce type de conclusions correspond à une philosophie optimiste du monde ; elle sert d'ailleurs parfois d'arguments aux théories politiques anarchistes et aux théories économiques libérales les plus extrémistes qui y voient la preuve que ni la religion ni l'État ne sont nécessaires au bon fonctionnement des sociétés.

Malheureusement, ce que nous voyons sur terre n'est pas le monde de coopération généralisée prévu par la

théorie. Où est la faille ? Le modèle utilisé est-il trop simple ? Peut-être, mais aucune complication du modèle n'a donné des conclusions bien claires. Aussi vaut-il mieux le conserver, au moins dans un premier temps, et examiner d'autres facteurs.

LE MONDE N'EST PAS COMPOSÉ DE GENTILS

Un modèle est sérieusement envisagé par les spécialistes de la théorie de l'évolution : il faut intervenir des mutations. Dans la simulation écologique, aucune stratégie nouvelle n'apparaît jamais : il n'y a pas de mutations, et c'est d'ailleurs pourquoi elle est appelée ainsi et non pas simulation évolutionniste. Dans un monde où soudainement apparaissent par mutation des stratégies méchantes exploitant une société de coopération généralisée, ces mutants méchants déstabilisent le bel équilibre. Des simulations utilisant la technique des algorithmes génétiques (les modèles aux de programmes constituant les stratégies subissent aléatoirement des mutations et des croisements) confirment cette hypothèse. C'est une première explication de la non-convergence constatée du monde réel vers la coopération généralisée.

Une autre explication s'appuie sur la trop grande simplicité des simulations informatiques réalisées jusqu'à présent. Il a été établi (par exemple, avec

LES STRATÉGIES

DONNANT-DONNANT commence par coopérer, puis joue au coup n ce que l'adversaire a joué au coup $n-1$.

LUNATIQUE coopère ou trahit aléatoirement au hasard à l'aide d'une pièce de monnaie.

GRADUELLE commence par coopérer, mais, lorsque son adversaire trahit, elle réplique par une série de N trahisons successives (N étant le nombre total de trahisons subies), suivie de deux coups de coopération.

BINAIRE coopère, puis trahit périodiquement.

PÉRIODIQUE MÉCHANTE trahit, trahit, coopère, coopère, trahit, trahit, etc.

MAJORITÉ agit comme son adversaire a joué en majorité dans le passé. Elle coopère le premier coup, ou s'il y a égalité.

PÉRIODIQUE GENTILLE coopère, coopère, et trahit périodiquement.

CCOCT coopère, coopère, coopère, coopère, et trahit.

SONDEUR trahit, coopère, coopère aux trois premiers coups ; ensuite,

si son adversaire a coopéré aux coups 2 et 3, il trahit toujours, sinon il joue

DONNANT-DONNANT.

EXEMPLE DE COMBAT

NUMÉRO DU COUP 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

LUNATIQUE c t t c t c t t c c

DONNANT-DONNANT c c t t c t c t t c

POINTS GAGNÉS

LUNATIQUE 3 5 1 0 5 0 5 1 0 3

DONNANT-DONNANT 3 0 1 5 0 5 0 1 5 3

Au total 23 points pour **LUNATIQUE**, et 23 points pour **DONNANT-DONNANT**.

2. Les différentes stratégies utilisées et un exemple de combat entre deux stratégies

la stratégie **GRADUELLE** et ses variantes) que des stratégies complexes pouvaient obtenir de bons résultats en compétition écologique. Nous devons donc nous interroger sur les expériences réalisées jusqu'ici : la coopération constatée dans les écosystèmes simplifiés ne faisant intervenir que des stratégies simples est-elle

vraiment générale ? Il faut réaliser de nouvelles expérimentations à plus grande échelle, ou agissent des familles de plusieurs milliers de stratégies complexes. Ces expérimentations sont difficiles. Comment pouvons-nous être assurés que nous n'oublions pas d'écarter certaines ? Comment pouvons-nous mesurer la

représentativité des écosystèmes construits ? Ces expérimentations ont déjà été entreprises, et leurs résultats devront certainement être pris en compte dans l'analyse finale.

Le dernier facteur pouvant expliquer l'inadéquation entre le monde observé et les expérimentations qui convergent vers un monde de coopération généralisée est lié à la dynamique des simulations écologiques. Cette dynamique n'est pas toujours une simple convergence, et c'est ce phénomène découvert fortuitement que nous allons détailler.

DES DYNAMIQUES INATTENDUES

Quelle ne fut pas notre surprise lorsqu'après de longs calculs réalisés au printemps dernier nous avons aperçu sur notre écran d'ordinateur une courbe hésitante, différente de toutes celles que nos expérimentations engendraient habituellement. Ce premier cas d'oscillation complexe dans une simulation écologique du dilemme des prisonniers faisait intervenir cinq types de stratégies. Nous avons entrepris de rechercher systématiquement si de tels cas pouvaient se produire. Nous avons recherché les situations présentant ces oscillations et utilisant les moins de stratégies possibles.

Avec deux types de stratégies, aucune dynamique complexe ne se présente jamais, ce que des arguments mathématiques confirment. Avec trois, en revanche, tout semble possible et tout se produit. Il est fréquent, en mathématiques, que des modes de fonctionnement complexes apparaissent pour trois corps dans la dynamique des planètes par exemple...

Après avoir analysé des milliers d'évolutions et sélectionné (par programme) les plus remarquables, nous proposons de classer ces phénomènes observés en cinq groupes.

Le premier, qui correspond à la grande majorité des cas et que l'on croyait pour cela général, est la convergence monotone des effectifs des populations après une évolution monotone se stabilisent complètement (voir les figures 4 et 5).

Le deuxième cas est celui des mouvements oscillatoires atténués : les effectifs des populations oscillent avec une amplitude décroissante, ce qui conduit comme dans le premier cas à une stabilisation, mais après de nombreux revirements (voir la figure 6).

Le troisième cas est celui des mouvements périodiques : les effectifs des stratégies après une phase éventuelle d'hésitation évoluent cycliquement, reproduisant régulièrement après plusieurs

LES SIMULATIONS ÉCOLOGIQUES

À la génération n , il y a trois types de stratégies :

les 'A' d'effectif $a(n)$, les 'B' d'effectif $b(n)$, les 'C' d'effectif $c(n)$.

On connaît la matrice des gains correspondant aux combats de ceux qui peuvent faire les stratégies A, B et C entre elles :

$$p(A, B) = \text{gain en points pour A lorsque A joue contre B, etc.}$$

On suppose que l'effectif total est fixe :

$$e = a(n) + b(n) + c(n) = a(n+1) + b(n+1) + c(n+1) = \dots$$

Calculs des points gagnés à la génération n par un A, ou un B, ou un C :

$$g(A, n) = (a(n)-1) \cdot p(A, A) + b(n) \cdot p(A, B) + c(n) \cdot p(A, C)$$

$$g(B, n) = a(n) \cdot p(B, A) + (b(n)-1) \cdot p(B, B) + c(n) \cdot p(B, C)$$

$$g(C, n) = a(n) \cdot p(C, A) + b(n) \cdot p(C, B) + (c(n)-1) \cdot p(C, C)$$

Total des points gagnés par toutes les stratégies en présence :

$$t(n) = a(n) \cdot g(A, n) + b(n) \cdot g(B, n) + c(n) \cdot g(C, n)$$

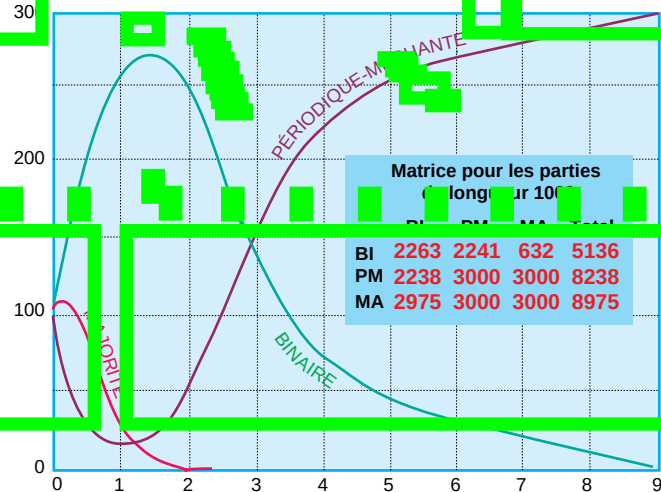
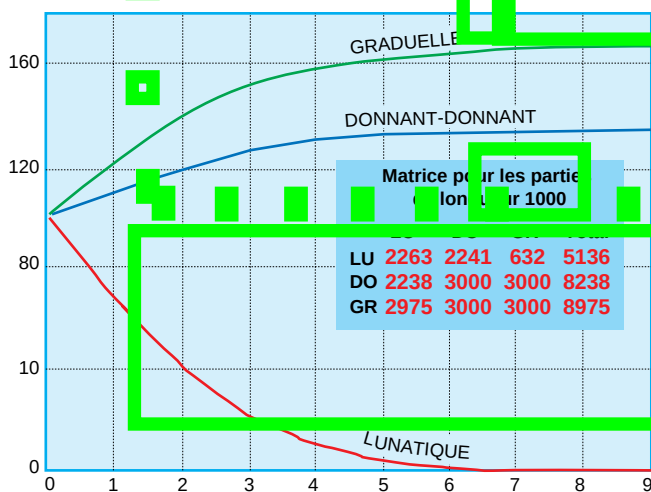
Effectif des naissances constituant la population à la génération $n+1$

$$a(n+1) = e \cdot a(n) \cdot g(A, n) / t(n) \quad (\text{arrondi à l'entier inférieur})$$

$$b(n+1) = e \cdot b(n) \cdot g(B, n) / t(n) \quad (\text{arrondi à l'entier inférieur})$$

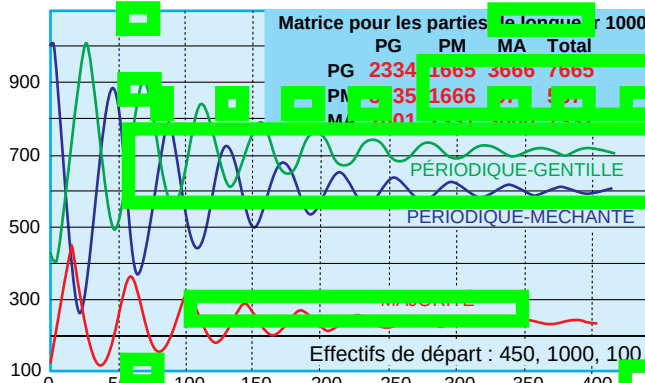
$$c(n+1) = e \cdot c(n) \cdot g(C, n) / t(n) \quad (\text{arrondi à l'entier inférieur})$$

3. L'évolution des simulations écologiques : l'effectif de la génération $n+1$ d'une stratégie est proportionnel aux nombres de points que les exemplaires de cette stratégie gagnent lors des rencontres entre stratégies à la génération n . Avec les équations reproduites ici, vous pouvez recalculer les dynamiques des figures 2 à 7. Vous pouvez aussi tester vos propres stratégies et rechercher d'autres dynamiques complexes.

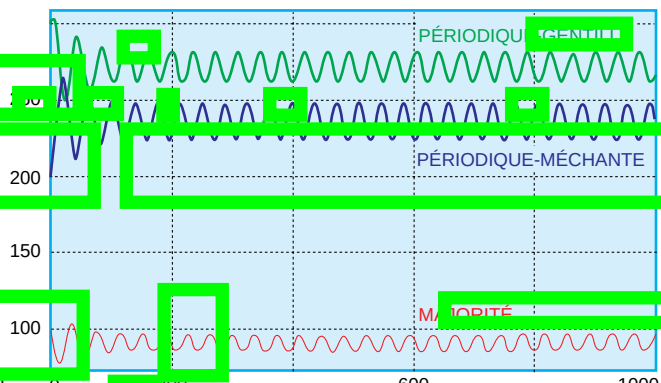


4. «Le crime ne paie pas.» Évolution des populations des stratégies pendant 10 générations à partir d'un effectif de 1000. La stratégie LUNATIQUE, la seule à prendre l'initiative de la trahison, se fait éliminer. Cette évolution avec élimination des méchantes et stabilisation dans un état de coopération. On remarque que GRADUELLE bat DONNANT-DONNANT. Ce n'est pas un hasard, car il a été établi récemment que la stratégie GRADUELLE était meilleure que DONNANT-DONNANT dans de nombreux tournois.

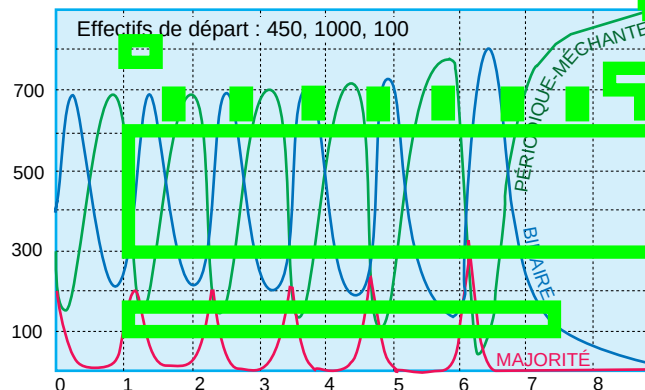
«Le crime... paie.» PÉRIODIQUE-MÉCHANTE commence mal, ce qui profite d'abord aux autres, puis uniquement à BINAIRE. La stratégie MAJORITÉ se fait alors éliminer, bien qu'elle soit gentille, tandis que les deux autres sont méchantes. Il se produit ensuite un retour de la stratégie MAJORITÉ, qui reste seule à partir de la génération 90. La stratégie BINAIRE obtient le plus faible résultat en tournois (d'où sa basse initialisation) mais elle a utilisé l'autre stratégie pour éliminer la gentille, puis s'est débarrassé d'elle.



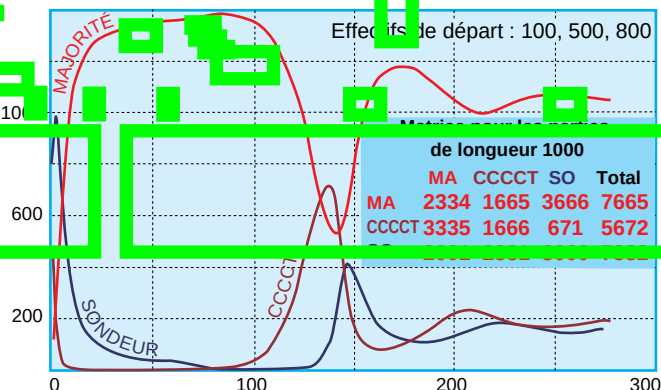
6. «Tout vient à point à qui sait attendre.» Les trois populations oscillent violemment dans les 100 premières générations, puis trouvent un équilibre qui est atteint à partir de la génération 420.



7. «L'éternel recommencement» : cette fois, l'oscillation ne se stabilise jamais : les effectifs des populations de stratégies retrouvent périodiquement les mêmes valeurs toutes les 100 générations.



8. «Tant va la cruche à l'eau...» L'oscillation augmente jusqu'à la rupture, qui se fait au bénéfice de PÉRIODIQUE-MÉCHANTE qui reste seule après avoir entraîné ses adversaires dans une ronde folle où elles ont péri. Les oscillations violentes permettent la survie de stratégies non coopératives qui tirent profit du désordre général.



9. «De la discussion naît la lumière.» Le cas du mouvement hésitant, Après une instabilité forte pendant 250 générations où chacune des trois stratégies frôle la catastrophe, un point d'équilibre est atteint. La sensibilité aux conditions initiales de ce type de dynamique permet de parler de situation chaotique.

France Culture
et

Pour la Science

**vous invitent
au Palais
de la Découverte**

**à
l'enregistrement**

**des Inattendus
de la Science**

**Samedi
14 septembre
à 15h**

**les limites
inattendues**

avec
Jean-Marie Levy Leblond
physicien

**Invitations
à demander
au 36 68 10 99 (2,23F/mn)**



génération la même combinaison, sans qu'il y ait jamais de stabilisation (voir la figure 7).

Un tel phénomène a été récemment découvert par B. Sinervo et C. Lively dans le monde vivant et concerne des populations de lézards (voir *Lézards intranquillistes*, *Pour la Science*, juin 1996, p. 33). Il n'est pas certain que la découverte de ces chercheurs corresponde à une situation modélisable par le dilemme des prisonniers, mais on remarque que ces oscillations apparaissent quand interviennent trois populations dans le monde réel et quand on fait interagir trois stratégies dans le monde virtuel du dilemme des prisonniers.

Le quatrième cas, celui des oscillations croissantes avec rupture (voir la figure 8), est analogue au précédent, sauf que maintenant l'oscillation va s'amplifiant, ce qui conduit à une «rupture» comme pour un pont qui finit par casser à la suite de mouvements de balancement de plus en plus importants.

Le cinquième type de dynamique regroupe les cas «inclassables»: les mouvements semblent désordonnés (voir la figure 9). Dans nos expériences, ces mouvements désordonnés ne se poursuivent pas très longtemps, aussi hésitons-nous à parler de chaos.

LE CHAOS L'INTRODUISANT-IL ?

L'analogie avec d'autres phénomènes observés en météorologie, en chimie et en physique est tentante. Pour savoir si le «chaos» était présent, nous avons étudié la sensibilité aux conditions initiales: une petite variation dans les compositions initiales des populations se traduisait-elle par une variation importante dans le phénomène observé?

La réponse est oui. Ces petites modifications des compositions initiales en stratégies entraînent parfois la disparition de l'oscillation, ou le changement du gagnant d'une oscillation avec rupture. Presque toujours, la forme des courbes change brusquement.

Dans les cas périodiques, avec oscillations décroissantes ou rupture, des stratégies méchantes interviennent toujours. Parfois même, lors de la rupture dans le cas d'une oscillation d'amplitude croissante, le gagnant est une stratégie méchante: tout se passe donc comme si le désordre donnait de meilleures chances aux voleurs et était finalement défavorable aux stratégies coopératives. La conclusion quant à la réglementation sociale nécessaire s'impose.

L'instabilité liée aux conditions initiales ajoutée au fait que le gagnant final, quand il y en a un, n'est pas nécessai-

rement gentil, ni nécessairement celui qui gagne le tournoi simple, rend imprévisible le déroulement de ces dynamiques à partir des seules équations et des résultats des confrontations deux à deux.

D'autres types d'instabilités confirment que nous sommes bien dans un cas chaotique: sensibilité aux variations des paramètres de gains, sensibilité à la longueur des confrontations, sensibilité aux méthodes d'arrondi numérique utilisées dans les calculs.

Il est fort possible qu'avec des stratégies complexes ce qui nous était apparu exceptionnel (rappelons que nous n'avons trouvé ces cas oscillants qu'après de longues recherches numériques) ne devienne la règle. Cela signifierait que contrairement à l'interprétation la plus souvent acceptée des simulations réalisées sur le dilemme des prisonniers, la coopération n'est pas l'état attracteur le plus fréquent. Ainsi, le monde des rapports sociaux serait, par nature, instable à cause des dynamiques oscillatoires ou chaotiques conduisant inéluctablement à des ruptures profitant aux stratégies agressives.

Cette vision, que les simulations informatiques seules ne pourront pas prouver de manière définitive, nous fascine et nous inquiète, mais, avouons-le, nous amuse plus encore.

Sur le site Internet suivant, on trouvera des programmes et des articles sur le dilemme des prisonniers, ainsi que des détails sur les expérimentations réalisées ici: <http://www.lifl.fr/~mathieu/ipd>

J.-P. DELAHAYE, *Logique, informatique et paradoxes*, Bibliothèque Pour La Science, Paris, 1995.

R. AXELROD, *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, Inc. Publishers, New York, 1984. Traduction française: *Donnant-donnant*, éditions Odile Jacob, Paris, 1991.

B. BEAUFILS, J.-P. DELAHAYE et P. MATHIEU, *Our Meeting with Gradual: A Good Strategy for the Iterated Prisoner's Dilemma*, in *Intern. Conf. on Artificial Life V (ALIFE V)*, pp. 159-165, 16-18 mai 1996, Nara (Japon).

J.-P. DELAHAYE et P. MATHIEU, *Complex Strategies in the Iterated Prisoner's Dilemma*, in *Interdisciplinary Intern. Conf. about Complex-System Theory and the Social Sciences*, University of Hull, Canada, Actes édités par A. Albert, I.O.S. Press, Amsterdam, 1995, pp. 283-292.

K. LINDGREN et M. G. NORDAHL, *Cooperation and Community Structure in Artificial Ecosystems*, in *Artificial Life, an Overview*, sous la direction de C. Langton, MIT Press, 1995, pp. 15-37.

Vu? Pas vu? Rétiechissez!

IAN STEWART

Existe-t-il des zones non éclairées dans un labyrinthe de miroirs?

Angela se trouve dans une pièce aux murs parfaitement réfléchissants. Quelque part dans ce Palais des Glaces, son ami Bruno craque une allumette. Quelles que soient la forme de la pièce et les positions qu'ils y occupent, Angela peut-elle toujours, en regardant autour d'elle, voir l'allumette de Bruno ou une de ses images réfléchies? Ou, ce qui revient au même, pour toute position de l'allumette, la lumière qu'elle émet emplit-elle toute la pièce, sans laisser un seul point dans l'ombre?

Ce problème fut énoncé pour la première fois par Victor Klee, en 1969, mais

l'on pense que ses origines sont plus anciennes : elles remonteraient au moins à Ernst Straus, dans les années 1950. Il est apparu sous plusieurs variantes. Si la chambre peut être à deux ou à trois dimensions (dans ce dernier cas, sol et plafond sont aussi des miroirs). Elle peut avoir des murs plans, donc être un polygone en dimension 2 ou un polyèdre en dimension 3, ou « incurvés ».

Dans toutes les versions, l'idéalisation standard remplace les yeux d'Angela et la flamme de l'allumette par deux points. Ces points ne doivent pas être sur les

murs eux-mêmes et, de plus, sont tous deux conçus comme transparents.

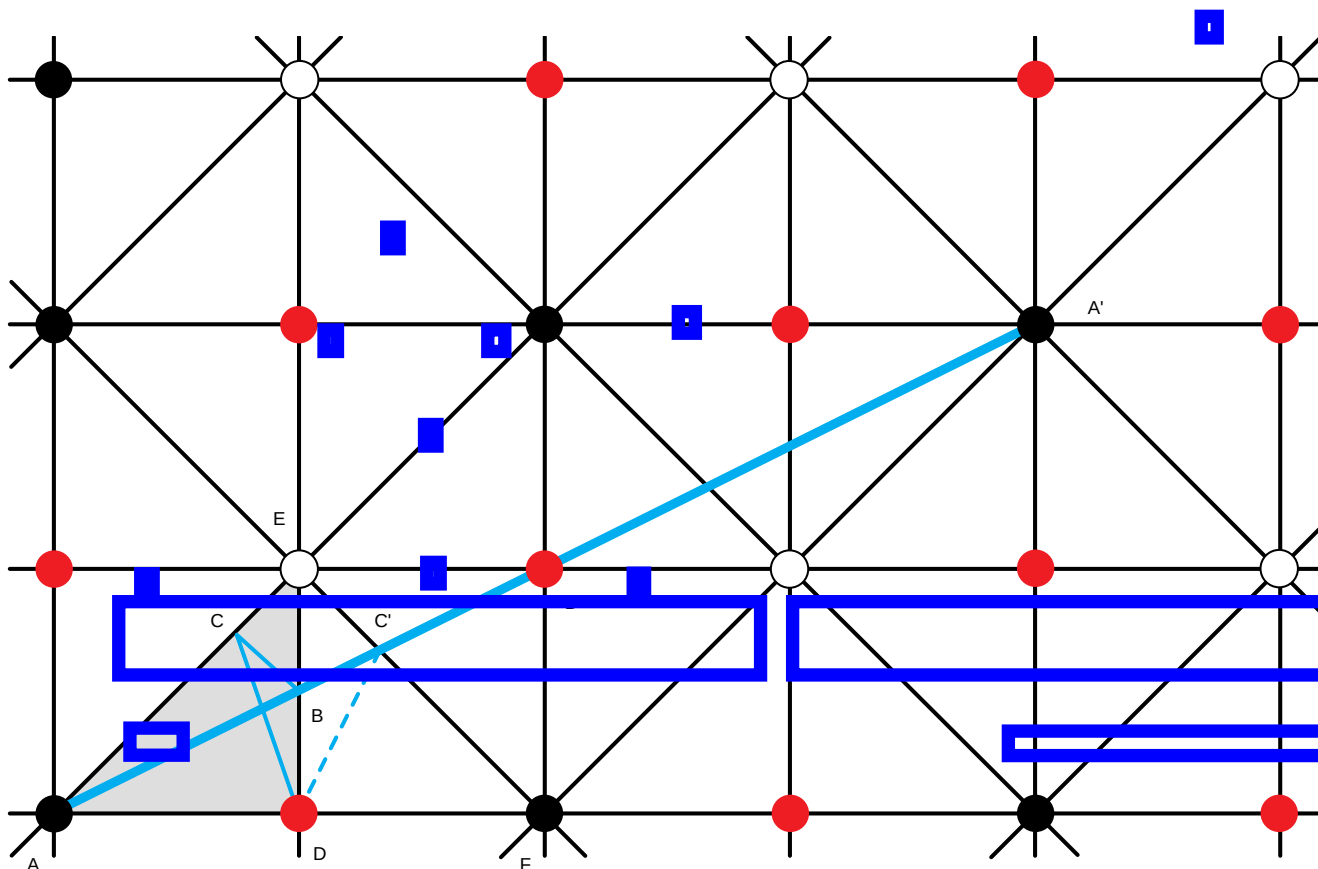
Sur chaque mur, la loi de la réflexion s'énonce classiquement ainsi : « l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion ». Partout où ces angles sont mal définis (aux sommets, sur les arêtes...), on supposera que les rayons lumineux incidents sont absorbés et ne vont pas au-delà.

Dans le cas des polygones plans, la réponse à la question fut publiée par George Tokarsky, dans le numéro de décembre 1995 de la revue *American Mathematical Monthly* (vol. 102, n° 10). L'élégante démonstration de G. Tokarsky utilise un « artifice de réflexion » et, comme toutes les mathématiques à leur meilleur niveau, est étonnamment simple.

FIAT LUX

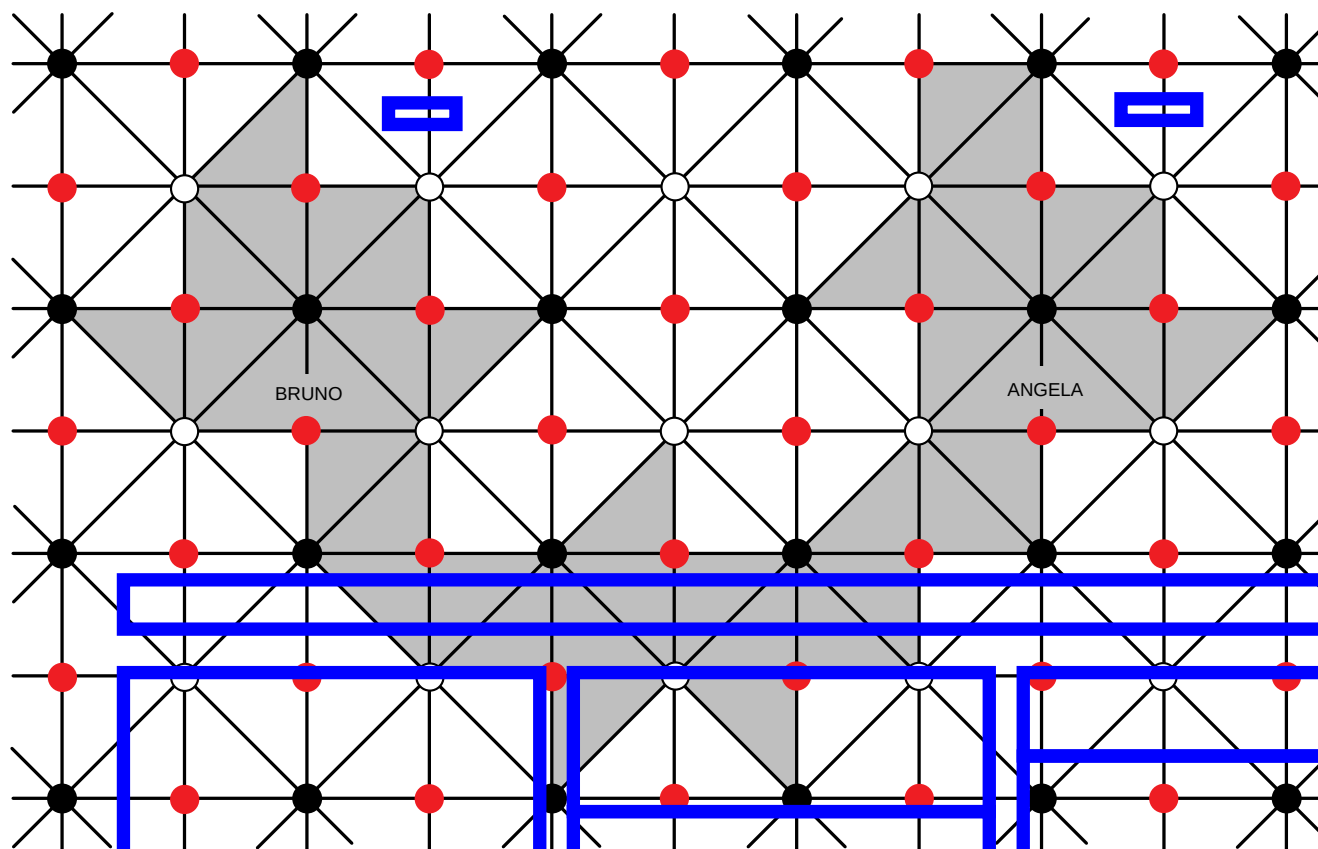
Le raisonnement de base s'appuie sur un triangle rectangle isocèle (un demicarré, limité par une diagonale). Un tel triangle, marqué AED (voir la figure 1), peut être « déplié » en un réseau régulier à mailles carrées par des réflexions répétées par rapport à ses trois côtés.

Le réseau est tout d'abord utilisé pour prouver un fait clé : si une allumette est placée à l'un des sommets à 45 degrés



1. Le treillis engendré par réflexions d'un triangle rectangle isocèle apporte la clé de la compréhension des réflexions à l'intérieur du triangle supposé réfléchissant AED. Un rayon lumineux émanant de A

et subissant des réflexions sur les murs du triangle peut être « déplié » en un segment de droite sur le treillis. Le point où ce segment s'achève révèle le destin du rayon réel original.



2. Cette chambre réfléchissante, construite à partir d'un treillis à base d'un triangle rectangle isocèle, est telle qu'aucun rayon lumineux issu de Bruno n'atteint Angela, après réflexions éventuelles.

du triangle initial (marqué A), alors tout rayon lumineux qui en émane ne reviendra jamais à l'allumette. Pour voir cela, observons d'abord que tout rayon émis, tel ABCD, se déplie de la même manière que le triangle. Ainsi le trajet BCD se réfléchit sur le mur ED, pour donner BC'D, de l'autre côté du mur. Puis, dans une réflexion par rapport à EF, C'D se déplie en C'D', de sorte que ABCD se déplie en ABC'D'. Notons qu'ici le trajet s'achève

en D, car D est un sommet du triangle : le point déplié D' est un des sommets du réseau. La loi de la réflexion implique que ABC'D' est une ligne droite, ce qui va s'avérer essentiel pour la suite.

J'ai colorié les trois sommets du triangle : A en noir, E en blanc, et, à l'angle droit, D en rouge. Par dépliage du triangle, il s'ensuit que tout sommet du réseau est alors colorié. Je ne propose de prouver que si un trajet lumineux parti

de A revient en A, alors, en fait, il doit d'abord passer par un point rouge ou blanc, où il est absorbé.

Imaginons donc un trajet joignant A à A. Par dépliage, il devient un segment de droite joignant A à un point noir A' du réseau. Or de tels points noirs sont espacés d'un nombre pair de pas du réseau suivant les directions horizontale et verticale : les « coordonnées » de A' si A est pris pour origine, sont donc deux nombres

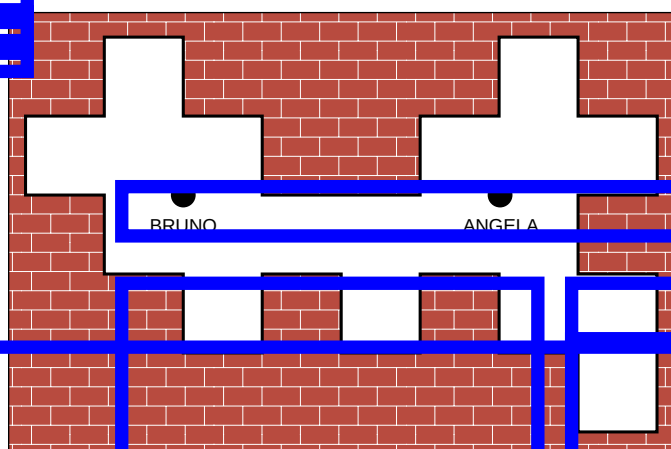
Réactions

L'article *Trop Monopoly pour être honnête* (*Pour la Science*, n° 224, juin 1996) a engendré un courrier record. La plupart des lecteurs font remarquer que l'analyse ignorait de nombreuses propriétés du véritable jeu, singulièrement la case « Allez en prison », mais aussi celles « Caisse de communauté » et « Chance ». Certains lecteurs ont même affirmé que je ne connaissais pas les règles du jeu, alors que d'autres déduisaient, à juste raison, que j'avais utilisé quelques hypothèses aussi simplificatrices que non explicites. Un lecteur s'est demandé si l'article n'était pas un poisson d'avril : non, c'était un véritable article !

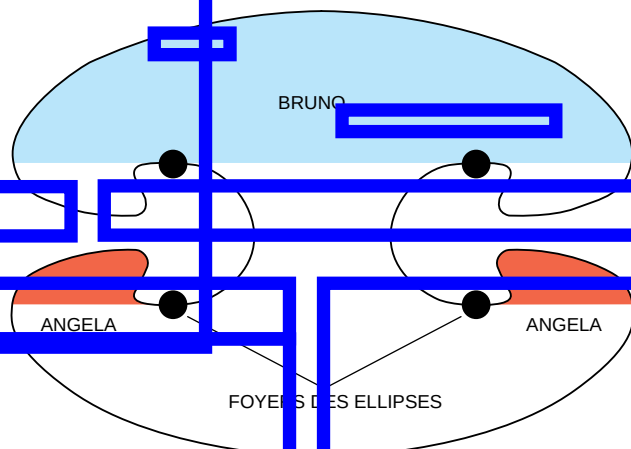
Quelques lecteurs proposèrent l'analyse complète du jeu. Je veux particulièrement remercier Stephen Abbott, de Northfield, Minnesota ; William Butler, junior de Portsmouth, Rhode Island ; Thomas Fridell, de Maple Valley, Washington ; le comte A. Paddon, de Maryland Heights, Missouri ;

et David Veiblen, de Reston, Virginie. J'ai beaucoup appris d'eux ; à tel point que j'ai l'intention de mentionner leurs résultats, et quelques autres qui me sont venus à l'esprit dans un article entier.

En fait la case « Allez en prison » introduit en définitive une distribution de probabilité non uniforme. La case « Prison » elle-même est la plus fréquentée, avec une probabilité de 5,89... pour cent, comparée avec la valeur « équidistribuée » de 2,5 pour cent (ou 2,44... pour cent si « Simple visite » et « Prison » sont distinguées, ce qui semble raisonnable). La case la plus probable après cela est « Avenue Henri-Martin », avec 3,18... pour cent. La case la moins probable est la troisième case « Chance » à partir de la case « Départ », avec 0,871... pour cent, si l'on exclut « Allez en prison », qui, à vrai dire, n'est pas visitée du tout, puisqu'elle vous envoie directement en prison !



3. Ces blocs carrés constituent une autre chambre réfléchissante qui protège Angela de tout rayon issu de Bruno.



4. Ces arcs d'ellipses limitent une pièce comportant des zones en rouge où Angela ne reçoit aucun rayon issu de Bruno.

pairs. Si ces coordonnées ne sont pas toutes deux des multiples de 4, une au moins des coordonnées du milieu de AA' est un entier impair, et donc ce milieu est un point rouge ou blanc du réseau. Si les deux coordonnées de A' sont des multiples de 4, on remplace A' par le milieu A'' de AA' . Après un nombre fini de tels remplacements, on arrive à une coordonnée (au moins) impaire, et le résultat en découle. Si, par exemple, les coordonnées de A' sont $(48; 28)$, celles de A'' seront $(24; 14)$, celles de A''' $(12; 7)$, qui sera donc un point rouge ou blanc.

Ainsi tout trajet déplié joignant A à un point noir du réseau frappe d'abord nécessairement un point rouge ou blanc et, par conséquent, le trajet réel doit frapper un des deux autres sommets avant de revenir vers A .

Nous pouvons construire des pièces polygonales en assemblant verticalement, horizontalement ou diagonalement des parties de ce réseau triangulaire (voir la figure 2). Supposons qu'un rayon de lumière parte de Bruno et, après diverses réflexions sur les murs de la pièce, atteigne Angela et que tous deux soient placés sur des points noirs. Nous pouvons alors plier ce rayon dans un unique triangle géométrique, mais nous avons établi que tout trajet joignant deux points noirs devra frapper aussi un point rouge ou blanc, de sorte qu'en dépliant de nouveau, le rayon initial devrait aussi frapper un point rouge ou blanc. Supposons à présent que notre construction satisfasse les trois conditions suivantes :

- Les deux points noirs représentant Angela et Bruno sont à l'intérieur de la pièce.
- Aucun point rouge ou blanc n'est intérieur.
- Tout point rouge ou blanc sur les limites de la pièce est sur un sommet.

Alors tout rayon frappant un point rouge ou blanc frappe un sommet et est

donc absorbé, de sorte qu'un tel rayon lumineux n'existe pas.

Si vous essayez de construire de telles pièces, vous verrez que cela exige une dose minimale d'ingéniosité. Par exemple, vous devrez ajouter des triangles supplémentaires pour introduire des courbures additionnelles dans la frontière ; à moins d'être très attentif, ces torsions peuvent introduire de nouveaux points blancs ou rouges à l'intérieur du réseau et violer ainsi la seconde condition.

La pièce de l'illustration est construite avec 39 pièces par réflexion d'un triangle rectangle isocèle : l'article de G. Tokarsky en contient une de 29 triangles composants. Sauriez-vous la retrouver ? Ou en trouver d'autres ? G. Tokarsky a aussi mis au point une théorie similaire pour les pièces s'obtenant en dépliant un rectangle ou en utilisant des triangles ayant d'autres formes, de même que des pièces multidimensionnelles obtenues à partir de principes similaires.

UNE SURFACE SOMBRE EXISTE-T-ELLE ?

Ces exemples montrent que, dans une chambre polygonale, il peut y avoir des points où une allumette enflammée n'éclaire pas tous les points de la pièce. Tout ce que nous avons prouvé, cependant, est qu'un point au moins n'est pas éclairé. Est-il possible alors que toute une région d'aire non nulle soit sans aucun point éclairé ? Le problème est nettement plus difficile. Tout ce que nous savons, c'est que les rayons partant de Bruno peuvent passer aussi près que l'on veut d'Angela ; nous avons juste prouvé qu'ils ne pouvaient pas frapper sa «tête».

La réponse concernant les pièces polygonales semble inconnue, mais avec un collaborateur, Roger Penrose, a montré, en 1958, que si une pièce a des fron-

tières courbes, des régions totalement non éclairées peuvent exister. Par exemple, vous vous souvenez qu'une ellipse possède deux points particuliers appelés foyers. On prouve que tout rayon lumineux passant entre les foyers et qui se réfléchit sur la courbe recoupe l'axe joignant les foyers avant de frapper de nouveau la courbe. En exploitant cette propriété, on peut facilement vérifier qu'une pièce limitée par deux moitiés d'une ellipse (voir la figure 4) a des régions totalement non illuminées. Tout particulièrement, des rayons issus d'un point de la région en bleu (Bruno) ne peuvent pénétrer les régions en rose (Angela).

Il y a beaucoup de problèmes similaires, certains résolus, d'autres non. Vous pouvez en trouver une sélection dans *Unsolved Problems in Geometry*, de Harold Croft, Kenneth Falconer et Richard Guy (Springer-Verlag, 1991) ainsi que dans *Old and New Problems in Plane Geometry and Number Theory*, de Victor Kleber, Stan Wagon (Association Mathématique Américaine, 1991). Par exemple, Jeffrey Rauch, de l'Université du Michigan, a montré qu'il existe une pièce à bords curvilignes «réguliers» en tous points, sauf un, qui requiert un nombre infini d'allumettes pour être entièrement éclairée.

J. Rauch a également prouvé que, pour tout nombre fini n d'allumettes, il existe une pièce à frontière curviligne régulière qu'on ne peut entièrement éclairer avec n allumettes. Janos Pach, du City College de New York, a posé cette élégante interrogation : si l'on crague une allumette dans une forêt d'arbres parfaitement réfléchissants, sa lumière sera-t-elle visible de l'orée ? Les arbres peuvent, par exemple, être schématisés par des cercles si le problème est envisagé dans le plan. Personne ne connaît la réponse !

Histoire des sciences

Histoire de l'agronomie en France

Jean Boulaïne. Éditions Lavoisier Tec et Doc, 1996.

Qui écrit l'histoire des disciplines scientifiques ? Dans le cas de cette discipline, la chimie, je distingue trois catégories d'auteurs, que je propose d'extrapoler à l'histoire des sciences en général. La première est celle des professionnels de l'histoire des sciences, spécialistes, le plus souvent universitaires, de formation historique ou philosophique ; ils étudient surtout les périodes « classiques », déjà anciennes, dont ils privilégient volontiers les aspects épistémologiques ou sociologiques dans des ouvrages érudits ; ils abordent rarement les aspects actuels, trop techniques, des disciplines scientifiques. D'autre part, les vulgarisateurs, souvent polygraphes de talent, ont parfois un rôle important, parce que leur maîtrise de l'écrit met une matière précieuse du public à sa disposition : « Si Peau d'Âne m'était contée... » Ainsi F. Hofer, au siècle dernier, publia une *Histoire de la chimie* qui fit date. Infatigable, il publia également une *Histoire de l'astronomie*, une *Histoire de la physique et de la chimie*, une *Histoire de la botanique* etc. Viennent enfin les scientifiques historiens qui, à partir de leur expérience professionnelle de chercheur, ont été amenés à réfléchir sur l'évolution de leur discipline ; sans négliger le passé, ils accordent une grande importance aux progrès récents (qu'ils sont capables d'expliquer) et aux évolutions qui y ont conduit. Eugène Chevreul, Hermann Kopp, Carl Schorlemmer, Wilhelm Ostwald, J. Partington, Paul Walden et Aaron Ihde ont été de ces chimistes qui se sont intéressés à l'histoire de la chimie. Avec l'*Histoire de l'agronomie en France*, dont Jean Boulaïne nous présente la deuxième édition, nous avons un nouvel exemple d'un tel travail de scientifique historien.

D'emblée, l'entreprise était difficile : l'agriculture a été, dans le passé historique, c'est-à-dire

depuis 10 000 ans, l'occupation essentielle et la grande industrie des hommes, mais les témoignages, matériaux de base de l'historien, sont rares et dispersés : en 1979, Fernand Braudel regrettait encore que « les historiens spécialistes aient peu consacré leur attention aux techniques de l'agriculture ». C'est un agronome ayant une riche expérience professionnelle qui ouvre la voie.

Pourquoi avoir restreint le champ de l'étude au cadre géographique de la France ? Selon J. Boulaïne, la rédaction d'une histoire mondiale de l'agronomie était au-dessus de l'état de l'information, des moyens dont il disposait et des conditions éditoriales de son travail. Ce cadre d'étude hexagonal n'empêche toutefois pas l'évocation de l'Amérique (la pomme de terre), des croisades (l'alcool) ou des Pays-Bas (apport de l'agriculture flamande, lors de la Renaissance), ni la mention de savants étrangers tels les chimistes Carl Scheele, Humphrey Davy ou Jöns Jacob Berzelius.

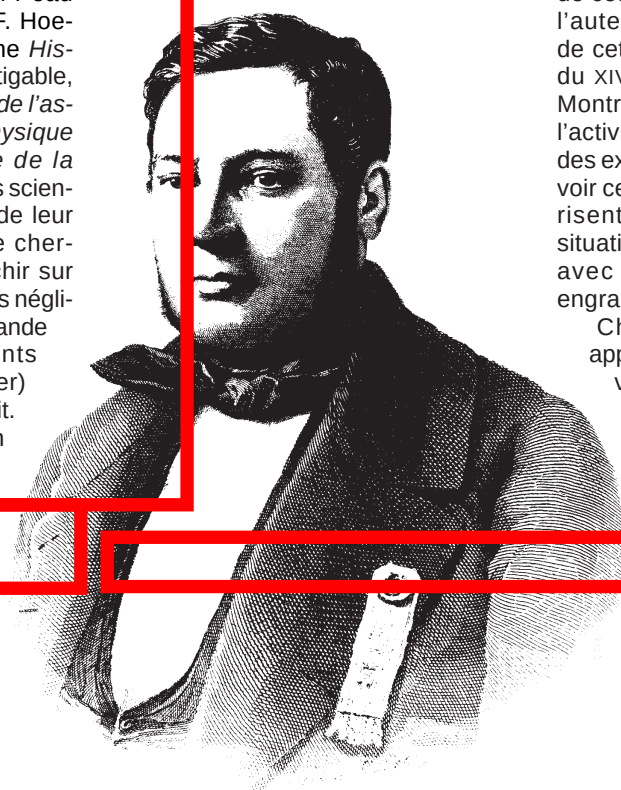
Après un chapitre préliminaire dense, mais clair, consacré aux « thèmes agronomiques de tous les temps », l'ouvrage, organisé en neuf chapitres eux-mêmes divisés en courts paragraphes, nous mène, par un découpage chronologique, de la préhistoire aux années 1990. Plus de 40 encadrés biographiques concernant les agronomes

les plus notoires sont dispersés dans l'ouvrage ; ils sont complétés par de nombreuses indications biographiques, dans le corps du texte.

Tout au long de l'ouvrage, le lecteur qui n'est pas spécialiste découvre une vision nouvelle de l'histoire de la France, une vision « agronomique ». L'exemple du Moyen Âge est frappant : autour de l'an mil, le cheval devient un animal polyvalent ; l'invention de l'étrier permet la constitution d'une cavalerie de choc, ce qui bouleverse l'art de la guerre et le collier d'épaule constitue un progrès fondamental pour l'agriculture : son utilisation permet de tripler, voire de quadrupler la force de traction du cheval qui peut alors tirer une charrette ou être attelé à une charrette. J. Boulaïne illustre cela d'une jolie formule : « pour comparer avec la vie actuelle, le Moyen Âge possède avec le cheval, et par rapport aux périodes précédentes, l'équivalent du tracteur, du camion et du char d'assaut. » Plus généralement, la « révolution industrielle du Moyen Âge » est fondée sur l'utilisation intensive de l'énergie de l'eau, du vent (moulins) et du fer, qui devient une matière première abondante ; son emploi plus fréquent conduit à des progrès décisifs pour l'outillage agricole, tout particulièrement la charrue et la herse.

Avec les passages consacrés à la gabelle, nous avons un autre exemple de cette vision historique renouvelée : l'auteur étudie l'impact économique de cet impôt sur le sel, si impopulaire du XIV^e siècle jusqu'à la Révolution. Montrant combien la gabelle a nuit à l'activité agronomique, il signale là un des exemples de contrainte, par le pouvoir central, sur des éléments qui favorisent la production agricole. Cette situation se renouvellera au XIX^e siècle avec les droits de douane sur les engrais.

Chacun des chapitres du livre apporte ainsi une contribution à cette vision originale des processus historiques. Nous assistons progressivement à l'émergence de l'agronomie, en tant que discipline scientifique nouvelle : à partir des années 1750, des hommes font passer l'agronomie de l'état d'art pratique à celui de discipline scientifique, en sachant « élever leur réflexion au-delà des mises au point des découvertes et des plaidoyers, créer de nouveaux concepts, de nouvelles méthodes et bâtir une théorie là où il n'y avait qu'une accumulation de recettes ». Les pères fonda-



Jean-Baptiste Boussingault (1802-1887), « le plus grand agronome du monde ».

teurs les plus importants, selon J. Boulaïne, sont Henri Louis Duhamel du Monceau (1701-1782), Alexandre Tessier (1741-1830), André Thouin (1747-1824), Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), Pierre Samuel Dupont de Nemours (1739-1817), Louis Daubenton (1716-1800) et Arthur Young (1741-1820), cet Anglais dont les *Voyages en France* constituent une des meilleures descriptions de la campagne française au XVIII^e siècle.

La génération suivante verra les agronomes appuyer systématiquement leur activité sur les résultats obtenus dans les disciplines «fondamentales», telles la chimie, la biologie, la physique ou la mécanique. Cette assimilation des résultats scientifiques fondamentaux aidera l'établissement définitif de l'agronomie dans le cadre de concepts et de méthodes spécifiques, de mieux en mieux adaptées à ses objets d'étude. Signe tangible de cette transformation on assiste, durant toute la seconde moitié du XIX^e siècle, à la professionnalisation et à la spécialisation des agronomes, à partir du tronc commun de la discipline : l'agrologie et la zootechnie apparaissent en 1843, la pédologie en 1862, l'écologie en 1866.

Ayant établi sa spécificité, sinon son autonomie, l'agronomie n'en dépend pas moins de sciences plus fondamentales qu'elles, telles la physique, la chimie et, bientôt, la biologie. Une trentaine de chimistes sont mentionnés à des titres variés, mais toujours importants, et la part de la chimie dans le développement et la maturation de l'agronomie, durant la dernière partie du XVIII^e siècle et tout le XIX^e siècle, apparaît essentielle : Lavoisier est aussi un des pères fondateurs de l'agronomie ; Liebig, en 1840, en introduisant la notion de «nutrition minérale des plantes», ouvre l'ère des engrais chimiques, dont l'usage, qui ne se généralisera qu'après de longues discussions, révolutionnera l'agriculture mondiale en multipliant la fertilité des sols ; Boussingault, «le plus grand agronome du monde», a laissé une brillante œuvre de chimiste, tout comme les Frédéric Kuhlmann, Anselme Payen, Jules Pelouze, Charles Müntz, Jean-Jacques Schloessing et tant d'autres. Jean-Antoine Chaptal semble avoir été un peu oublié par l'auteur, mais sa *Chimie appliquée à l'agriculture* de 1822, ainsi que ses travaux d'œnologie (la «chaptalisation») méritent d'être mentionnés. Michel Eugène Chevreul, qui mourut à l'âge de 103 ans, après plus de 80 années d'activité, a également beaucoup écrit sur des problèmes de chimie agricole. Marcellin Berthelot, le

«chimiste officiel» de la III^e République, n'a laissé à personne d'autre que lui le soin de célébrer ses mérites de pionnier dans l'étude de la fixation directe de l'azote dans les sols par voie microbienne. Comme dans d'autres domaines de la chimie, l'histoire a été plus sévère à son égard, ce que ne précise pas le paragraphe qui lui est consacré.

Pour en revenir à une période plus ancienne, je ne suivrai absolument pas J. Boulaïne lorsque, évoquant les influences orientales, il «exécute» rapidement et injustement avec l'alchimie toute la chimie pré-lavoisienne, qui aurait été coupable de n'avoir connu que la distillation comme méthode d'analyse.

Les derniers chapitres du livre nous amènent à la Troisième République aux années 1990 (et non 1980 comme l'indique le titre du dernier chapitre). L'«agriculture de tradition», qui culmine vers 1950, perd sa prééminence politique, on se modernisant. La politique agricole européenne, le développement et des échanges internationaux, l'influence du «business agro-alimentaire» bouleversent le monde agricole. L'ouvrage se termine par l'évocation de quelques problèmes actuels et futurs auxquels l'agronomie française sera confrontée.

À plusieurs reprises, J. Boulaïne signale combien il serait civiquement utile de donner une bonne information en agronomie aux économistes, aux politiques et aux citoyens conscients, afin d'éviter la propagation d'utopies dangereuses, tels le retour aux productions naturelles et l'abandon des engrais chimiques, dont l'auteur montre bien les conséquences désastreuses. On regrette alors de ne pas trouver une réflexion sur les problèmes de l'agriculture dite biologique ou de la pollution par les nitrates. C'est d'autant plus dommage qu'un graphique (p. 374), qui aurait mérité un commentaire plus développé, montre la tendance, depuis 1990, à une diminution de l'utilisation des engrais azotés.

Les index, bien fournis, font de cet ouvrage un utile outil de documentation, mais l'éditeur devrait les revoir soigneusement, car ils contiennent trop d'erreurs. La bibliographie, importante, pourrait également être améliorée : il serait utile de distinguer les références d'un même auteur parues la même année. Quelques oublis étonnent : ainsi le «livre de Liebig de 1840», souvent mentionné, ne figure pas dans la bibliographie ; il s'agit certainement de la *Chimie organique appliquée à la physiologie végétale et à l'agriculture*, dont la traduction française, par

C. Gerhardt, est parue en 1841 ; en 1847, le même traducteur proposait les *Lettres sur la chimie de Liebig*, qui reprennent notamment l'idée de nutrition minérale des plantes et qui connaîtront un bon succès de librairie. Concernant Boussingault, on est étonné de ne pas voir mentionné l'article de J. Boulaïne concernant son séjour en Amérique du Sud (la Nouvelle-Grenade de l'époque), auprès de Bolivar, ainsi que le petit livre épatant de E. Kahane, *Boussingault entre Lavoisier et Pasteur* (1988) ou l'étude très documentée de F. McCosh, *Boussingault, Chemist and Agriculturist* (1984).

Georges BRAM

Anthropologie

L'homme, l'écriture et la mort

Entretiens avec Pierre-Emmanuel Dauzat. Jack Goody. Éditions Les belles lettres, 1996.

L'anthropologue britannique Jack Goody est mal connu du grand public français, bien que plusieurs de ses ouvrages aient été traduits. Il se révèle dans l'entretien biographique intitulé *L'homme, l'écriture, la mort*, qu'il a accordé à Pierre-Emmanuel Dauzat. Pourquoi s'intéresser à J. Goody ? Parce que sa vie se confond avec la naissance de l'anthropologie moderne, le terrain, dont nous avons aujourd'hui les fruits.

La conversation à peine remaniée (P.E. Dauzat n'expurge pas les répétitions) nous emmène d'abord au St John's College à Cambridge. En 1938, J. Goody, qui avait 15 ans, préparait un diplôme de littérature anglaise, s'intéressait à Freud, au marxisme et devint membre du *Socialist Club*. Mais la guerre ajourna ses projets : durant six ans, il fut tour à tour combattant et prisonnier en Afrique du Nord, puis en Italie et en Allemagne. Démobilisé en 1946, il se fit l'avocat des grandes réformes travaillistes, particulièrement en matière de santé et d'éducation. Retournant à Cambridge, il assista aux cours d'E.E. Evans-Pritchard et passa sa licence d'anthropologie, avant de suivre l'enseignement de Meyer Fortes. Ce fut «surtout [...] l'expérience du camp, la promiscuité avec des gens de toutes les nationalités et des horizons les plus divers[...]» qui l'incita à devenir ethnologue.

Behring, Katsako Shibasapuro, Jonas Salk ou Alfred Sabin ! Par le tableau sur les maladies auto-immunes, qui sont loin de se ressembler au lupus érythémateux ou à la myasthénie, on découvre tout un lot de maladies émergentes. Celui sur la thérapie génique précise la fréquence de chacune d'entre elles, le produit normal du gène défectueux et les cellules cibles qui sont visées.

Dans un domaine où les médias nous racontent avec des accroches clinquantes, il est bien agréable de découvrir à la lecture de cet ouvrage une approche humaniste et solide, où le bon sens n'est pas absent. Le discours est bien sûr marqué par les recherches menées à l'Institut de chimie des substances naturelles du CNRS, à Gif-sur-Yvette, et l'auteur rend, à juste titre, attentif à l'importance du réservoir quasi inépuisable constitué par le règne végétal. Ainsi la chimie des substances naturelles, après avoir fourni tous les antibiotiques majeurs, est elle-même plus récemment à la cyclosporine, qui a complètement changé la pratique, la physiologie et le pronostic des greffes d'organe. En cancérologie, après les alcaloïdes de la petite pervenche (vincristine, vinblastine, etc.), on lui doit le

taxol et le taxotère. Beaucoup de substances naturelles sont d'une originalité et d'une complexité structurale telle qu'aucun chimiste n'aurait jamais eu l'idée de les concevoir. Cela justifie qu'à côté des méthodes plus ou moins robotisées de synthèse chimique, que l'on regroupe sous le nom générique de synthèse combinatoire, on conserve l'étude des molécules naturelles comme source de nouveaux médicaments.

Au total, au cours de la seule année 1995, la recherche pharmaceutique a préparé et essayé plus de nouvelles molécules que toutes celles qui ont jamais été étudiées depuis l'aube de l'humanité. On doit ce bilan à la synthèse combinatoire, à la miniaturisation des tests, à leur robotisation et à l'appui majeur apporté par les progrès de la biologie moléculaire. Une révolution silencieuse

a eu lieu ; elle a rendu obsolètes de nombreux articles ou ouvrages consacrés aux médicaments ces dernières

années. Le livre de Camille Georges WERMUTH est donc particulièrement recommandé à tous ceux qui souhaitent trouver en un texte concis une analyse juste et actuelle des grandes stratégies de la thérapeutique.

Camille Georges WERMUTH

RÉFÉRENCES DES ILLUSTRATIONS

Couverture : Slim Films. P. 9 (en haut à gauche et en bas) : DITE/USIS. P. 9 (en haut à droite) : Keystone. Pp. 12 à 15 : PLS. P. 16 : D.R. Pp. 20 et 22 : documents PLS. P. 23 : Jean Joachim, IARA. P. 24 (en haut) : document PLS. P. 24 (en bas) : Musée de la Marine. P. 25 : Raymond Nowak. P. 26 : document PLS. P. 27 : Musée d'Aquitaine. Pp. 28, 29 et 30 (en haut) : documents PLS. P. 30 (en bas) : Claude-Albert Boccara, ESPCI, CNRS. P. 31 : Gary Meslaros, Bruce Coleman Inc. Pp. 32 et 33 (en haut) : documents PLS. P. 33 (en bas) : Michael Crawford. P. 34 : NASA. P. 35 (en haut à gauche) : Boston Globe Photo. P. 35 (en haut au milieu) : Dee Breger, Lamont-Doherty Earth Observatory. P. 35 (dessins) : Steve Karp. Pp. 39 à 41 : documents PLS. P. 42 (ginseng) : Jacana. Pp. 42 à 44 : documents PLS. P. 47 : Robert Hunt. Pp. 48 à 52 : Corbis-Bettman ; L'Espresso. Pp. 55 et 57 : Michael Goodman. Pp. 60 et 61 : IBM Almaden Research Center. Pp. 62 et 64 : Jared Schneidman Design. Pp. 66 et 67 : Quesada Burke Studios. Pp. 68 à 71 : Bert van den Brouke. P. 72 : Jared Schneidman

Design. Pp. 74 et 75 : Sam Ogden. P. 77 : document PLS. P. 78 : The Chronicle Publishing Company ; Hearst Corporation. Pp. 80 et 81 : Patricia J. Wynne. P. 82 : Johnny Johnson. P. 83 : Katherine Lambert. P. 85 : P.J. Wynne. P. 86 : Douglas H. Erwin. Pp. 88 et 89 : Roberto Osti. P. 90 (blatte, crabe, araignée) : Jennifer Christiansen. P. 90 (micrographie de gauche) : Ulrike Gruenert, Université de Francfort. P. 90 (micrographie du milieu) : Manfred Schmidt, Université de Francfort. P. 90 (micrographie à droite) : Ernst-August Seyfarth, Université de Francfort. P. 90 (Figure 2 : dessins du milieu) : Jared Schneidman Design. P. 90 (Figure 2 : en bas à droite) : Ernst-August Seyfarth. P. 90 (Figure 3 : dessins) : Roberto Osti. P. 90 (Figure 3 : en bas à gauche) : Ernst-August Seyfarth. P. 91 (Figure 4 : dessin) : Roberto Osti. P. 91 (Figure 4 : cartouche et figure 1) et 92 : Jared Schneidman Design. Pp. 94 et 95 : Xavier Fener et Adolfo de Sostoa. Pp. 96 et 97 : Jean-Philippe Fontanille. P. 101 : éditions Belin. P. 103 : documents PLS. Pp. 106 à 108 : Johnny Johnson. P. 110 : document PLS.

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

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 Tacquenot, Pascale Thiollier, Marion Aguttes. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Nivier. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Ravin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Dominique Bugère, Paloma Cabeza-Orcel, François Clarac, Gilles Cuny, Bettina Debû, Paul Decaix, Jean-Ernest Godfrin, François Graner, Sylvie Guiral, Sylvie Hénon, Marie-Thérèse Landousy, Philippe Machetel, Claude Olivier, Michel Oriol, Guy Paulus, Éric Tournié.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Renne. Board of Editors : Michelle Press (Managing Editor), Timothy Beardsley, Ward Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecsek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Co-Chairman : Pierre Gerkens. Executive Committee : John Moeling, Vincent Barger, Robert Biewen.

PUBLICITÉ France
Cheffe Publi : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. (0) 46 34 21 42.

Télex : LIBEIN 202978F.
Télécopieur : 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 : Multico - 233, avenue Dunbar Mont-Royal Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Ronay

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduction 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, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de «Scientific American Inc.». La 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 en pages 18A, 18B, 98A et 98B des bulletins d'abonnement.