

The background of the entire cover is a collage of various playing cards, including the Queen of Spades, Queen of Diamonds, and Queen of Hearts, scattered across the surface.

■ POUR LA SCIENCE

Mai 1996

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

MALNUTRITION
ET DÉVELOPPEMENT

L'URBANISME AU BRÉSIL

LA TÉLÉCHIRURGIE

LE SIDA EN AFRIQUE

LE BOURGEONNEMENT
DES VÉSICULES

LA PHOTORECONNAISSANCE

LES ÉLECTRONS
À DEUX DIMENSIONS

LES MANGROVES

LUMIÈRE ET TROUS NOIRS

A solid purple rectangular box is located on the left side of the cover, partially overlapping the 'JEU DE CARTES BIFACES' text.

JEU DE CARTES BIFACES

Canada : \$ 8,75

Bloc-notes de Didier Nordon

Tribune des lecteurs

Jeu-concours : Numérologie

Les impossibles de l'agronomie

par Guy Paillotin



Présence de l'histoire

Histoire de l'arc-en-ciel

par Jean-Louis Ricard

Science et gastronomie

Fraîches couleurs

Perspectives scientifiques :

Une armée de métier adaptable

Sont-ils bien morts?

Un gaz d'humains

Le parfum sur la peau

Production en série

L'éruption du Pinatubo

Crapauds droitiers

La maladie de Creutzfeldt-Jacob

Courir sur l'eau

Dynamo céleste

La fontaine d'atomes

π , e^π et $\Gamma(1/4)$

La végétation par satellite

L'image du mois

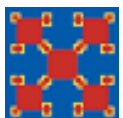
Flottements, par Jacques Ninio



Logique et calcul

Jeux avec des cartes bifaces

par Jean-Paul Delahaye



Visions mathématiques

Mots croisés et anagrammes

par Bernard Iqueaux



Analyses de livres

– *De la chimie des hormones*, par Carl Djerassi

– *Bain de science*, par Sven Ortoli

et Nicolas Witkowski

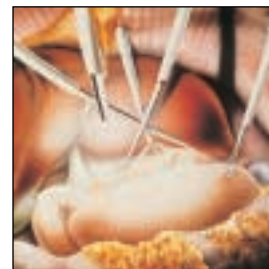
– *L'autorité de la science*, par François Lurçat

– *Turbulence*, par Uriel Frisch

La vidéo-chirurgie

par François Dubois

Aujourd'hui, les chirurgiens introduisent par de petites incisions les instruments miniaturisés grâce auxquels ils pratiquent les opérations qui nécessitaient de larges ouvertures, douloureuses et difficiles à cicatriser.



Lumière et trous noirs

par Norbert Quien, Rainer Wehrse et Christoph Kindl

L'exemple d'un disque de matière qui tourne autour d'un trou noir illustre l'effet d'un fort champ de gravitation sur la propagation de la lumière. Des simulations sur ordinateur font apparaître comment les images se déforment et se multiplient.



Vésicules et trafic intracellulaire

par James Rothman et Lelio Orci

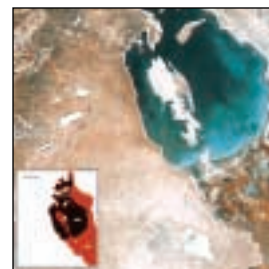
Une collaboration transatlantique découvre la machinerie qui assure la formation des vésicules, ces conteneurs minuscules et indispensables qui stockent des protéines, puis les transportent là où elles sont nécessaires dans la cellule.



La reconnaissance aérienne

par Dino Brugioni

Dans les années 1950 et 1960, en pleine guerre froide, les services d'espionnage des deux camps surveillaient la planète en la photographiant par avion ou par satellite. La difficile interprétation des images obtenues eut un certain impact sur les relations internationales.

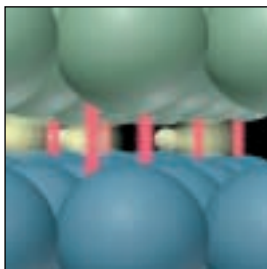


Les électrons dans un monde à deux dimensions

64

par Steven Kivelson,
Dung-Hai Lee
et Shou-Cheng Zhang

Confinés dans un plan, les électrons sont les sujets de l'effet Hall quantique, phénomène relié à la supraconduction.



Les mangroves des Caraïbes

70

par Klaus Rützler
et Ilka Feller

Des plantes et des animaux se sont adaptés pour vivre à la limite entre la terre et la mer. Ils forment un écosystème diversifié, fragile et surprenant.



L'épidémie de SIDA en Afrique

76

par John Caldwell
et Pat Caldwell

Dans certaines régions de l'Afrique subsaharienne, près d'une personne sur quatre est séropositive. L'absence de circoncision serait-elle responsable de la gravité de l'épidémie dans ces régions?



L'urbanisme de Curitiba

84

par Jonas Rabinovitch
et Josef Leitman

Une cité brésilienne en expansion a préservé la qualité de la vie de ses habitants grâce à des solutions peu coûteuses.

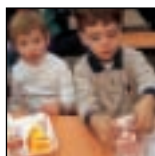


Malnutrition, pauvreté et développement intellectuel

90

par Larry Brown et Ernesto Pollitt

La malnutrition infantile perturbe à la fois le comportement des enfants et leur santé physique. Elle amoindrit en outre durablement les capacités intellectuelles.



Épiménides rédactionnels

La ferme des étoiles est une tentation culturelle. Cette ferme gersoise (32380 Mauroux), posée sur une colline, couverte de vigne vierge, propose aux visiteurs, qu'elle espère nombreux, le confort simple d'une vieille demeure de campagne, la chaleur du feu dans une grande cheminée, la fraîcheur du parc quand le soleil écrase la campagne environnante, une piscine et des veillées aux étoiles.

Elle a invité les journalistes scientifiques à s'associer à la contemplation du ciel, à pincer les cordes d'un luth ragaillard par le site, à dialoguer avec les invités pour qu'ils découvrent ensemble les beautés des étoiles, à disserter sur les caractéristiques géométriques des trous noirs (voir *Lumière et trous noirs*, par Norbert Quien, Rainer Wehrse et Christoph Kindl, page 40), à réfléchir sur les destinées des galaxies et aux périples planétaires, le tout en musique, s'il vous plaît.

Hélas mon éducation folliculaire est datée. La rédaction d'un journal de vulgarisation scientifique doit, m'a-t-on appris, être vertueuse en ce qui concerne les voyages de presse et autres invitations. Ces faveurs incitent les journalistes à des remerciements appuyés qui évitent aux firmes commerciales l'achat de publicité, autrement dispendieuse pour les uns et rémunératrice pour les autres.

Même si l'honorabilité du rédacteur souffrait quelques violences rationalisables, que doit faire le journaliste s'il n'a aucun espoir, faute de rubrique appropriée, de placer un article vantant les mérites des réalisations de son hôte? Doit-il refuser, en pensant que la puissance invitante connaît cette impossibilité et que sa générosité sans arrière-pensée en a conscience?

Le problème du rédactionnel (bel euphémisme) est là tout entier dans sa douloureuse ambiguïté. Aussi j'ai refusé l'invitation de *La ferme aux étoiles* (tél : 62 66 46 83) et je n'en parlerai pas plus.

Philippe BOULANGER

Tu quoque, fili !

Depuis Athéna, fille de Zeus, jusqu'au chanteur Carlos, fils de la psychanalyste Françoise Dolto, les enfants de personnages illustres deviennent souvent eux-mêmes illustres. Quitte, s'ils manquent d'indépendance vis-à-vis de leurs parents, à labourer les mêmes champs : ainsi les Bernoulli, mathématiciens de pères en fils et d'oncles en neveux, ou les Dumas, Alexandre de père en fils.

Ce phénomène, qui a longtemps intrigué, est désormais éclairci : la célébrité est d'origine génétique. Une équipe de chercheurs de l'Université d'Hollywood vient de mettre en évidence le gène de la célébrité. Être porteur de ce gène augmente d'un facteur dix les chances de devenir célèbre. Ainsi, contrairement à la stérilité, la célébrité est héréditaire.

Kulturkampf

À croire leurs prospectus, certaines stations de sports d'hiver disposent de «neige de culture». Cette expression, plus jolie que le brutal «canon à neige», désigne sans doute la même chose, ou presque. Elle est plus juste. Tout ce qui n'est point nature est culture, et tout ce qui n'est point culture est nature. Quand Dame Nature est défaillante dans ses distributions de neige, c'est à la culture de prendre la relève... Naturellement !

Les stations de ski devraient faire école, tant leur vocabulaire regorge d'euphémismes heureux. On ne dirait pas «effectuer un essai nucléaire», mais «procéder à une explosion de culture», ni «assassiner quelqu'un», mais «lui faire don d'une mort culturelle». Et puis, si certains enfants sont naturels, les autres

sont donc culturels : plaisante harmonie. Quant à notre santé, plus besoin de nous précipiter sur les produits naturels. Les colorants et autres agents de sapidité n'ont plus rien d'inquiétant si on leur donne le nom, qui leur revient de droit, d'«aliments culturels». Mangeons sans autre souci qu'un juste équilibre entre aliments naturels et culturels.

Comment vas-tu de poêle ?

Maladie : mal a dit. Mais que veut donc dire le mal ? Le médecin va-t-il œuvrer pour soi-même, c'est-à-dire se contenter de supprimer le symptôme en niant le message du soi, ou pour gai-rire, faire retrouver le rire gai et la joie de vivre ?

Si ces lignes se voulaient humoristiques, on dirait : bravo, bien trouvé ! Mais elles sont extraites d'un livre sérieux, publié dans une collection intitulée «La science du 3^e millénaire» (Luc Bigé, *L'homme réuni-fié*, éditions du Rocher, 1995). Alors, n'en disons rien.

Égocentrisme co(s)mique

Les intellectuels parisiens ne prennent au sérieux que les intellectuels parisiens, les ivrognes bordelais ne connaissent d'autre vin que le bordeaux. Les uns comme les autres se croient au centre du monde... Hé bien, ils ont raison !

En quatrième de couverture d'un essai non dénué d'une certaine ambition, on lit que l'humanité est à mi-chemin, ce qui est un moment propice pour établir un bilan. La vie en effet a commencé voici environ quatre milliards d'années, et devrait en durer encore six avant que les condi-

tions ne la rendent impossible. Pour une fois, ce désir d'être le centre est altruiste. Depuis le singe qui nous a donné naissance jusqu'au robot qui nous enterrera, sans omettre les intellectuels bordelais ni les ivrognes parisiens, tout le monde, à quelques millions d'années près (bagatelle), peut partager la fierté d'être au milieu du temps. Imaginons de plus qu'on montre un jour que l'Univers est infini. En ce cas, nous pourrions nous flatter d'être au centre à la fois du temps et de l'espace. C'est beau, la science.

Usage du faux

Ceux qui accablent notre époque en évaluant le style du dernier roman («nul») à l'aune du classicisme, oublient une chose : l'âge classique ne se réduit pas aux quelques auteurs dont nous avons retenu les noms. Notre siècle n'est pas plus dégénéré qu'un autre, et nous sommes tous capables d'écrire aussi mal que Pierre-Sylvain Régis (1632-1707) : «Puis que l'erreur n'est autre chose, que le mauvais usage que l'ame fait du jugement, et que l'ame n'use mal du jugement qu'en tant qu'elle suppose dans les objets de ses idées, des propriétés et des rapports qui n'y sont pas, ou qu'elle retranche ceux qui y sont ; il ne reste plus pour éviter l'erreur, qu'à découvrir, quelles sont les causes qui portent l'ame à faire ces suppositions, ou ces retranchemens» (*L'usage de la raison et de la foi*, réédition Fayard, 1996).

Nous n'écrivons pas plus mal que Régis, mais pensons-nous mieux ? Il faut croire que non. Un livre de Massimo Piattelli Palmarini intitulé *La réforme du jugement ou Comment ne plus se tromper* (éditions Odile Jacob, 1995) vient de paraître. Ainsi, Régis avait trouvé un truc pour ne jamais se tromper, mais, sots que nous sommes, nous l'avons perdu, forçant un nouvel auteur à découvrir et nous livrer le sien. Il est vrai que, pour Régis, ne plus se tromper, c'est avoir la foi, alors que, pour Palmarini, c'est éviter les pièges tendus par les affirmations pseudo-scientifiques. L'erreur de l'un n'est pas l'erreur de l'autre – ni même sa vérité !

L'éventail des erreurs possibles grandit aussi vite que nos moyens de les éviter. Des livres pour déjouer les erreurs, il en paraîtra jusqu'à la fin des temps. Même s'ils ne sont pas faux, épargneront-ils une seule erreur à un seul être humain ?

Modélisme

Modèle. Dans la bouche du peintre, ce mot désigne la personne ou l'objet dont il s'inspire ; dans celle du physicien, il désigne la théorie élaborée pour rendre compte d'un phénomène. Ainsi, dans le premier cas, le modèle est la réalité ; dans le second, c'est une abstraction qui vise à exprimer l'essence d'une réalité dont il ne fait pas partie. Le peintre part du modèle pour arriver à l'œuvre ; le physicien part de la réalité pour arriver au modèle.

Les optimistes (ou les paresseux) diront : rien là de préoccupant. L'occurrence d'un même mot dans des sens différents n'est pas plus signifiante que, par exemple, le fait que la ville de Vienne ne soit pas dans le département de la Vienne. Mais les inquiets prendront au sérieux cette bifurcation du mot modèle vers deux acceptions opposées. Elle laisse entrevoir que les rapports entre arts et sciences ne seront jamais simples – pas plus d'ailleurs que les rapports entre arts et réalité, ou ceux entre sciences et réalité. Bref, l'homme n'est pas près d'avoir une perception satisfaisante de la réalité.

À quoi servent les vieux?

Un contradicteur de Richard Dawkins objecte à sa théorie que la survie des sujets âgés n'aurait pas d'intérêt pour la sélection des gènes (voir *La loi des gènes*, *Pour la Science*, janvier 1996 et *Tribune des lecteurs*, *Pour la Science*, mars 1996). On a parfois mis en avant l'idée que la sélection naturelle a «mis au point» des organismes résistants et ne s'est pas souciée de les éliminer dès qu'ils ont dépassé l'âge de la procréation. Toutefois chaque espèce semble avoir un âge limite indépassable : la sélection naturelle a probablement institué une limite programmée. Pourquoi alors un délai si long entre la fin de la période de procréation et la limite ultime?

La présence de sujets âgés, qui ne se reproduisent plus, mais qui ont acquis une expérience, introduit d'abord une concurrence intraspécifique qui conduit à l'élimination des jeunes, futurs ou actuels reproducteurs, les moins performants, à l'élévation rapide de l'efficacité de l'espèce et donc au succès des gènes des survivants. Dans un milieu où les ressources sont rares, les plus jeunes, livrés à eux-mêmes, doivent se montrer en moyenne au moins aussi astucieux que les sujets âgés, qui survivent malgré des moyens diminués, pour survivre et avoir l'occasion de se reproduire. Comme cette compétition se retrouve à chaque génération, l'accélération de la sélection est considérable : il est de l'intérêt de l'espèce que les sujets âgés vivent de plus en plus vieux et accumulent de plus en plus d'expérience.

Ensuite, la présence de sujets âgés actifs dans un groupe peut faciliter la protection et, plus encore, l'apprentissage des sujets jeunes. Les groupes qui comportent des sujets âgés ont donc un avantage sélectif. Cette sélection inter-groupes n'est que superficiellement contradictoire avec la sélection intra-groupe décrite précédemment, puisqu'elles ne s'exercent pas en même temps dans l'histoire d'une espèce.

Cette réponse est rarement évoquée, parce qu'elle soulève une difficulté majeure. La théorie de la sélection naturelle suppose une concurrence entre des individus. L'idée qui vient d'être résumée suppose, elle, une concurrence à deux étages, d'une part entre les individus, d'autre part entre des groupes. En effet, les groupes comptant des sujets marginalement plus âgés étant soumis à une plus forte compétition interne réussissent mieux que les groupes dépourvus

de sujets âgés et finissent par les éliminer. La sélection à la fois entre individus et entre groupes se poursuit jusqu'à ce qu'un équilibre soit trouvé entre les avantages de la présence de sujets âgés.

Les spécialistes de l'évolution rejettent en général l'idée d'une telle sélection entre groupes, et ils ont, en général, raison. Mais certains mammifères supérieurs et, en particulier, les ancêtres de l'homme, vivent en bandes qui manifestent une certaine endogamie. Un processus de sélection peut intervenir entre ces bandes qui conservent, du point de vue de leur patrimoine génétique, une continuité marginale, mais décisive sur la longue période et qui constituent, en quelque sorte, des superindividus. Les lignées de bandes qui comportent des vieillards ont un avantage sélectif sur celles qui n'en comptent pas, si bien que celles où l'on ne vit pas vieux finissent par être éliminées.

Cette hypothèse peut être testée. Elle implique qu'il y a une corrélation entre la capacité des individus d'une espèce à vivre vieux et leur capacité à se distribuer en groupes concurrents à l'intérieur desquels se maintient une certaine continuité génétique.

Gérard KLEIN, Paris

Le schtroumpf des mots

En éliminant les mots grammaticaux de la première phrase de l'article de Jean Senellart, *Le sens des mots* (voir *Pour la Science*, mars 1996), on obtient : «mots phrase pas même importance pour compréhension». Pour reconstruire le sens, on peut proposer plusieurs solutions, qui donnent un caractère général ou particulier à l'affirmation. Est-ce à dire que cet ensemble de mots est compréhensible? L'interprétation est, il est vrai, moins ouverte que pour l'ensemble «tous les mots de cette phrase n'ont pas la même importance pour sa». Ainsi compréhensible signifie que les hypothèses d'interprétation sont peu nombreuses, qu'elles définissent des sens proches et que le choix arbitraire de l'une d'entre elles n'est pas source de méprise.

Toutefois, l'exemple n'est pas tout à fait général. Les Schtroumpfs, petits bonshommes bleus créés par le dessinateur Peyo, le savent bien. Ils construisent leur langue à partir du français avec quelques règles de sémantique et de pragmatique telles que : «remplace toutes les expressions de la langue de base par *schtroumpf* quand tu peux le faire sans créer une ambiguïté excessive».

Le mot *schtroumpf* ne remplace que des noms (propres ou communs), des verbes ou des adverbess, ces mots que Jean Senellart nomme «pleins». La phrase «tous les mots de cette phrase n'ont pas la même importance pour sa *schtroumpf*» n'en reste pas moins énigmatique. Le contexte ne m'aide pas à lever l'ambiguïté. Il y a en plus du contexte un ensemble de «messages types déjà hypercodifiés», comme l'a noté Umberto Eco dans un article de 1979 sur la langue des Schtroumpfs, que je ne maîtrise pas. Ce domaine est hors de ma compétence encyclopédique, le champ de connaissances auquel je fais sans cesse appel pour en dériver des informations intertextuelles.

Ainsi les mots pleins ne peuvent se définir par leur caractère indispensable pour la conservation du sens. Dans tous les cas, le texte requiert une coopération active dans l'interprétation de la part du destinataire pour connecter l'ensemble avec des éléments de l'encyclopédie, et il est possible, pour des raisons d'économie, de ne pas utiliser certains mots pleins et de les remplacer par ce qui pourrait être un mot creux : le mot *schtroumpf*. Pourrait-on trouver une meilleure définition de «mot plein» que la suivante «est plein, tout mot qui n'est pas grammatical»? Alexandre SIBERT, Lyon

Réponse de Jean Senellart

Nous définissons les mots grammaticaux à partir d'une analyse statistique, à la différence des linguistes qui les définissent à partir de leurs fonctions grammaticales. Bien que la plupart des mots grammaticaux au sens linguistique le soient aussi au sens statistique, et réciproquement, les deux notions sont bien distinctes. Par définition aussi, pour nous, les mots pleins sont les mots qui ne sont pas grammaticaux. La définition statistique est compatible avec les connaissances encyclopédiques que nous utilisons, puisqu'elle repose sur l'analyse d'un corpus encyclopédique. Ainsi, avec notre définition, le mot *ministre*, dans un contexte politique, ou le mot *taureau*, dans un texte qui ne traite pas des bovins, mais contient l'expression «prendre le taureau par les cornes», sont grammaticaux. N'est-il pas étonnant que ces deux mots soient justement remplaçables par *schtroumpf*?

Adressez à *Pour la Science* vos remarques, vos commentaires, vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science, sur Internet, à l'adresse 101641.3525@compuserve.com en indiquant *Tribune des lecteurs* dans la rubrique objet.

JEU-CONCOURS

PIERRE TOUGNE

N°23

NUMÉROLOGIE

Pour le jeu-concours de ce mois-ci, voici deux petits problèmes de «numérologie». Tout nombre entier se terminant par zéro a son carré qui se termine par 00, c'est-à-dire deux chiffres identiques. Sauriez-vous caractériser tous les nombres entiers décimaux dont le carré se termine par deux chiffres identiques?

Si l'ordre naturel des nombres entiers nous est familier, l'ordre alphabétique de ces mêmes nombres l'est beaucoup moins. Ainsi 100 est le premier nombre par ordre alphabétique, c'est aussi, dans cette classification, le pre-

mier nombre pair ou le premier carré entier. Pour le premier nombre impair, il faut aller chercher plus loin: cent billions cinq (100 000 000 000 005)! À ce sujet, quel est le premier cube entier par ordre alphabétique?

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 mai 1996, dix gagnants tirés au sort recevront le livre *Le calcul intensif*, Bibliothèque Pour la Science.

LISTE ALPHABÉTIQUE DES ENTIERS DE 1 A 1 000, EN FRANÇAIS

CENT, CENT CINQ, CENT CINQUANTE, CENT CINQUANTE CINQ, CENT CINQUANTE DEUX, ... ZÉRO.

LISTE ALPHABÉTIQUE DES ENTIERS DE 1 A 1 000, EN CHIFFRES ROMAINS

C CC CCC CCCII CCCIII XXXVIII

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°21

Nombreux sont les lecteurs qui ont déjoué le stratagème imaginé par le conservateur de la bibliothèque. Pour trouver le code, il suffisait de remarquer que :

a) Aux permutations circulaires près, il n'y a que quatre états de départ 0011, 0101, 0111, 1000.

b) Agir sur deux interrupteurs adjacents ou diagonaux ne modifie pas la parité du nombre de 1 ou de 0, c'est-à-dire que les états 0011 et 0101 se transformeront en eux-mêmes ou la porte s'ouvrira tandis que les états 0111, 1000 s'échangeront ou resteront les mêmes.

c) Agir sur un seul interrupteur transforme les états 0111 et 1000 dans les états 0011 ou 0101 ou bien la porte s'ouvre.

Dès lors, la stratégie était la suivante : si l'état de départ est l'un des états 0011 ou 0101, la suite D2A2D2 ouvrira à coup sûr la porte. Si ce n'est pas le cas, on sait que l'on est dans un état 0111 ou 1000, auquel cas A1 ou D1 soit ouvrira la porte, soit nous mettra dans un état 0011 ou 0101 et l'on est ramené à la situation de départ. Le code d'accès était donc :

D2A2D2 (A1 ou D1) D2A2D2

Les impossibles de l'agronomie

GUY PAILLOTIN

Les avantages des progrès de l'agriculture sont diversement mesurés en fonction de la richesse des pays. La gestion de la Terre, village agricole global, est à inventer.

Il y a 10 000 ans, au Néolithique, les hommes du Proche-Orient inventaient simultanément l'agriculture et l'élevage. Cette révolution verte allait conquérir le monde. Parallèlement, les meilleurs rendements à l'hectare des cultures et les conditions plus douces de la vie sédentaire augmentaient la population du Globe, et, dans une certaine mesure, amenaient le problème actuel : le surcroît de population contrecarre-t-il le confort apporté par une meilleure exploitation du sol ?

Où en sommes-nous aujourd'hui ? Nos ressources alimentaires sont-elles suffisantes ? Sont-elles renouvelables ? Est-il possible d'éliminer les pestes, insectes et champignons qui pénalisent les cultures ? Est-il définitivement impossible de pratiquer l'agriculture dans certaines régions du Globe ? Une des causes de la Révolution française a été les grandes famines qui ont frappé la France sous l'Ancien régime. Pouvons-nous pallier les écarts climatiques et de quelle façon ?

Est-il possible d'extraire des produits végétaux et animaux, des éléments chimiques élaborés dont la synthèse est difficile et coûteuse ? La chimie verte a-t-elle un avenir, ou sommes-nous définitivement condamnés à tout extraire du pétrole ? Enfin, pouvons-nous nourrir le monde ?

LA FAIM DU MONDE

Huit cent millions de personnes sur les six milliards cinq cent mille habitants de la Terre souffrent de la faim alors que la production agricole dans le monde permettrait de distribuer à chaque habitant du Globe une ration journalière suffisante de 2 700 calories. Il n'y a pas d'impossibilité physique à nourrir le monde, il y a de douloureuses réalités économiques qui sont faites d'inégalités. La croissance

démographique est de 1,6 pour cent en moyenne ; elle est un peu plus élevée, 1,9 pour cent, dans les pays en développement, ce qui fait 100 millions d'habitants en plus par an. La croissance du PNB est de trois à quatre pour cent, donc il y a des chances pour que le chiffre de 800 millions diminue encore. La difficulté n'est pas technique, elle est économique.

Il reste paradoxalement douloureux que des terres soient mises en jachère dans les pays développés et que les habitants des pays pauvres souffrent de malnutrition. Le problème est de savoir si les progrès de l'agriculture s'appliqueront aux cultures adéquates, et si l'augmentation des volumes produits ne renforcera pas les disparités ; la question pèse à la fois sur les relations pays industrialisés-pays en développement, et sur le fonctionnement des sociétés industrielles.

LA GESTION DES RESSOURCES

Cela étant, il est impossible que les ressources du Globe soient indéfiniment renouvelables ; toutefois, si elles étaient suffisantes pendant la durée de l'existence de la Terre, cette limitation ne serait pas très contraignante.

Trois paramètres sont à l'ordre du jour : la biodiversité, les ressources en eau et les ressources des sols.

La biodiversité c'est la variabilité génétique : si elle diminuait trop, notre capacité d'adaptation serait réduite. Le risque n'est pas aussi fort qu'on le dit, mais la vigilance s'impose, notamment pour les espèces céréalières.

Les sols et l'eau sont plus difficiles à gérer. Les surfaces cultivables sont inégalement réparties : aux États-Unis ou en Australie, il y a un hectare ou plus de sols cultivables par habitant, en France un tiers d'hectare et dans certains pays moins

d'un dixième d'hectare. De plus, ces disponibilités peuvent être dégradées par l'érosion ou la surexploitation dans les pays pauvres. Enfin l'inégalité des ressources en eau est encore plus marquée : certains pays comme Israël et l'Égypte consomment aujourd'hui 100 pour cent de l'eau renouvelable recueillie (20 pour cent en France).

La gestion de l'eau est très complexe, et les biologistes tentent de mettre au point des plantes moins consommatrices d'eau ou qui acceptent des eaux de moindre qualité, c'est-à-dire des eaux usées ou un peu salées. Là encore, le facteur économique est prépondérant : avec de l'énergie, on peut tout faire, même des sols artificiels, mais à un coût rédhibitoire. Un impossible économique actuel est de dessaler l'eau de mer pour l'irrigation des cultures.

On a longtemps fondé quelques espoirs sur les ressources alimentaires océaniques. Hélas la plupart des mers sont aujourd'hui surexploitées, et les marins pêcheurs sont malheureusement obligés d'aller de plus en plus loin des côtes pour capturer leur prise. La raréfaction des ressources océaniques est une réalité et il faudrait y pallier.

LA LUTTE CONTRE LES GRANDS FLÉAUX

La lutte contre les grands fléaux est aujourd'hui plus efficace. Il y a deux ans, on s'est inquiété, non sans raison, de pullulations de criquets en Afrique. De temps en temps, dans des conditions climatiques favorables, un grand nombre de criquets éclosent : quand ces criquets se concentrent sur un territoire, ils changent de comportement et deviennent grégaires et dévorent les cultures.

La lutte chimique est assortie d'une veille attentive pour intervenir le plus vite possible, avant la grégarisation. Des réseaux d'observations existent, animés notamment par une équipe du CIRAD, à Montpellier, des processus d'alerte et de lutte chimique sont en place. Cependant des progrès restent à faire dans la spécificité de la nocivité et l'on recherche constamment des molécules moins nocives pour l'homme. Ces progrès souhaités passent par une meilleure connaissance de la biologie animale, la caractérisation des hormones de développement du criquet par exemple.

Toutefois, l'évolution a conféré aux insectes une forte capacité de résistance génétique à des substances toxiques et la lutte est délicate : la dissémination d'un poison crée, par pression de sélection, une population

résistante. Il y a toujours une course entre le glaive et le bouclier et les moyens de lutte sont perpétuellement affinis. Le glaive, c'est la lutte chimique : on cherche des molécules de plus en plus spécifiques qui n'attaquent que les insectes et puis des insectes spécifiquement redoutables.

On cherche aussi des molécules, surtout pour les maladies bactériennes, qui puissent activer les défenses des plantes : c'est le bouclier. La lutte biologique englobe aussi l'utilisation de toxines biologiques, le renforcement de l'acti-

vité des prédateurs – on a mis au point une espèce qui mange les œufs d'une espèce qui attaque le maïs – et la dissémination d'insectes stériles ou anormaux. Enfin la lutte génétique consiste à sélectionner les plantes qui ont développé une résistance aux insectes ou à transférer des gènes de résistance aux insectes.

On a pensé à des champs-pièges qui concentreraient les pestes ; malheureusement les nuisibles se déplacent des champs pièges aux champs cultivés... Les tas de bois qui pourrissent en forêt

sont ainsi d'excellents réservoirs d'insectes. Un piège actuel, plus élaboré, permet d'attirer les insectes par des phéromones sexuelles, afin de les y détruire.

Pour lutter contre les champignons, on essaie aussi d'enrober les semences, c'est-à-dire qu'on met le produit, le fongicide, sur la semence de manière qu'il agisse au moment où la plante pousse. Le fongicide est actif *in situ* au bon endroit et au bon moment, et à de faibles concentrations. On étudie également pourquoi une bactérie est patho-



Fresque du peintre de la révolution mexicaine, Diego Rivera, illustrant la culture et la préparation de galettes de maïs. Le maïs est cultivé et cuisiné depuis 4 500 ans au Mexique, on en retrouve les

traces sur les silex taillés du Néolithique. Les techniques agricoles modernes sauvegardent les gènes de rusticité des anciennes cultures et insèrent de nouveaux gènes de résistance.

gène pour une plante et on confère à la plante, par génie génétique, la résistance adéquate.

LE REMEDE ET LE MAL

Il est cependant impossible d'imaginer qu'on puisse se débarrasser des bactéries, des insectes ou des virus. La lutte est perpétuelle et sans relâche, d'autant que l'on perturbe un système écologique global.

Prenons l'exemple des fruits, symbole du paradis terrestre : n'importe qui a envie de manger des fruits, y compris les insectes, donc ils méritent une protection très forte à base de traitements insecticides. Hélas ces traitements détruisent aussi une flore utile des sols et font place nette pour la prolifération des nuisibles résistants dont on a éliminé la concurrence. Tout déplacement de l'équilibre peut empirer une situation.

Il subsiste des maladies, comme la maladie de l'orme, où il n'y a pas de produit, pas de solution agronomique : l'impossible est peut-être temporaire, mais tant que la solution est absente... vous ne pourrez jamais définitivement éliminer un champignon pathogène et, partant sa dissémination épidémique, d'autant qu'on ne met pas en œuvre les mêmes moyens pour sauver un arbre et pour sauver un homme.

On sait transformer les animaux en insérant de nouveaux gènes, et l'on sait aussi cloner ces animaux. Une équipe de Jouy-en-Josas a cloné des veaux, il y a maintenant quatre ans. Aujourd'hui l'INRA examine avec l'INSERM la possibilité de modifier les porcs, afin qu'ils puissent servir de porte-greffe pour l'homme. On touche, ce faisant, des problèmes éthiques car nous avons en tête le docteur Moreau qui transformait des cochons en hommes. Le public et aussi les chercheurs tentent de déterminer une éthique déterminant les responsabilités de la science, plus d'ailleurs que celle des scientifiques.

LES RAISONS DE L'IRRATIONNEL

Je crois à trois points. Le bien-être animal qui bien sûr doit être respecté ; nous tentons de mesurer ce bien-être, ce qui est difficile. Le monde agronomique porte une attention particulière aux animaux, qui ne sont pas considérés comme des cobayes, mais en tant que partenaires d'étude. Le deuxième point est le transfert de ces connaissances au cas de l'homme. Il faut se donner un impossible moral : ne pas conduire d'expériences inutiles et ne pas faire sur l'homme un certain nombre d'expériences qu'on fait sur l'animal. L'exemple typique est

le clonage des veaux. D'ailleurs quand l'INRA a fait son expérience, j'ai interrogé les scientifiques. Leurs réponses ont été satisfaisantes : les expériences sur les animaux clonés sont utiles car elles permettent de distinguer clairement ce qui est dû au génome de ce qui est dû à l'environnement. Elles permettent des recherches sur la résistance aux maladies ou sur la nutrition qui sont beaucoup plus économiques en termes animaux.

On ne peut voir avec la même indulgence les débuts de clonage d'embryons humains pratiqués aux États-Unis peu de temps après et cela avait scandalisé tout le monde. Il faut savoir cloisonner ce type de recherche. Dans les années 1986-1987, on avait trouvé une sonde d'acide nucléique qui se greffait spécifiquement sur le chromosome Y et déterminait si l'embryon était mâle ou femelle. Son utilisation chez l'Homme est interdite.

Le troisième point dépasse l'éthique, laquelle n'est pas toujours un garde-fou suffisant : le consommateur n'acceptera jamais des produits issus de traitements zootechniques qui leur paraîtraient déviants par rapport aux relations de l'homme avec l'animal.

Cette attitude irrationnelle a en fait un sens. Même si les hormones de synthèse sont en tout point identiques aux hormones naturelles, elles détruisent l'image du lait associé à la pureté : le public assimile l'injection d'hormones à un dopage. Les sensibilités sont évidemment dépendantes de la richesse du pays.

L'augmentation de la productivité est toujours une préoccupation, cependant, et c'est horrible à dire, les estomacs solvables sont saturés. Bien sûr, ces techniques pourraient être utiles dans les pays où le lait manque, mais, là encore, pouvons-nous préconiser dans les pays en développement des techniques qu'on ne voudrait pas utiliser ?

L'AGRICULTURE, SOURCE D'ÉNERGIE ?

L'utilisation de végétaux comme source d'énergie ou de molécules intéressantes est ancienne : jusqu'à la révolution industrielle, le bois de chauffage assurait l'essentiel de notre approvisionnement énergétique et, après le choc pétrolier des années 1973, nombre de scientifiques ont voulu exploiter l'énergie solaire.

La consommation d'énergie par habitant dans un pays développé comme le nôtre est de quatre tonnes équivalent-pétrole par habitant, dont 20 pour cent pour les transports, alors que le rayonnement solaire correspond à 280 tonnes équivalent en pétrole par habitant. Le second chiffre impressionne. Hélas, il faut

regarder le rendement : avec un rendement de conversion d'un pour cent, un tiers de la surface cultivable devrait être alloué aux transports. Or le rendement de la photosynthèse est entre 0,1 et 0,33 pour cent et de plus cette énergie est diluée alors que les énergies fossiles sont concentrées.

La rentabilité économique des biocarburants est encore inférieure à celle des carburants fossiles par un facteur de deux à trois et elle dépend de la fiscalité. Mais il subsiste un coût d'opportunité : un agriculteur peut avoir intérêt à mettre une jachère en production industrielle de biocarburants.

On cherche aussi à coupler la production de biocarburants à la création de produits à forte valeur ajoutée. Il y a une filière éthanol qui vient du blé et le sous-produit va en alimentation animale et il y a une filière diester avec le colza qui laisse du glycérol ; Rhône-Poulenc examine une chimie fondée sur le glycérol de manière à augmenter la valeur du tout. Parallèlement les matériaux biodégradables comme les huiles ou les détergents seraient écologiquement intéressants, car la pollution naissant de déversement d'huile, de vidange notamment, est une menace pour l'environnement. Toutefois, ces cultures ne doivent évidemment pas employer trop d'engrais à base de nitrates ou de phosphates.

LA CHIMIE VERTE

Les plantes sont des usines chimiques absolument extraordinaires : elles synthétisent ce que l'homme lui-même n'est pas capable de synthétiser très facilement et très spontanément. On part de l'énergie solaire et à la fin, grâce à cette usine végétale, on produit des molécules extrêmement complexes. On exploite cette capacité pour faire des médicaments et des produits de base de l'industrie chimique, et l'ingénierie génétique peut nous aider à produire des éléments à haute valeur ajoutée.

Les impossibles en agriculture sont rares, mais les progrès ne sont pas économiquement transposables d'un pays à l'autre. La difficulté majeure est celle d'un village agricole global interdépendant où les transferts, bénéfiques et maléfiques, sont rapides. La gestion de l'écosystème Terre reste à imaginer.

Guy PAILLOTIN est Président de l'Institut National de la Recherche Agronomique.

Ce texte est la retranscription du débat enregistré avec Émile Noël, qui sera diffusé sur France Culture le 8 mai 1996, à 9 heures.

Histoire de l'arc-en-ciel

JEAN-LOUIS RICARD

Plus de 2 000 ans ont été nécessaires à la compréhension et à l'élaboration de la théorie de ce phénomène naturel.

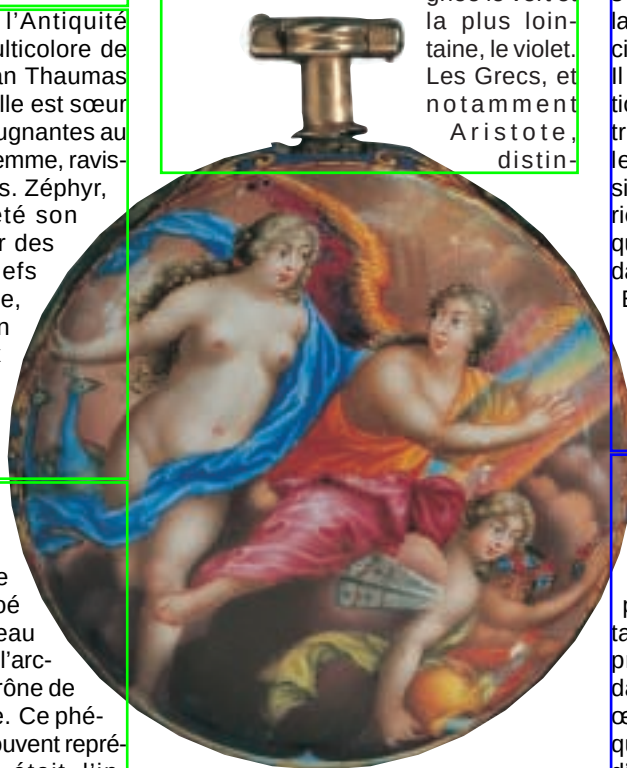
Pour les Scandinaves c'est un pont entre le ciel et la Terre, permettant aux dieux de venir sur Terre ; pour les Incas, c'est un cadeau du Soleil ; pour d'autres Indiens, c'est l'arc de guerre des dieux de l'atmosphère ou le chemin emprunté par les morts pour monter au ciel. Selon une légende irlandaise, un pot d'or se trouverait à chaque pied de l'arc-en-ciel. Le phénomène est parfois assimilé à un monstre ou à un serpent. D'après le culte des Fôn du Dahomey, en Afrique occidentale, le dieu Dan de la fécondité et de la richesse se manifeste sous la forme d'un arc-en-ciel qui encercle le monde, et il est symbolisé par un serpent qui se mord la queue.

Les poètes grecs de l'Antiquité l'identifient à l'écharpe multicolore de la déesse Iris. Fille du Titan Thaumas et de l'Océanide Électre, elle est sœur des Harpies, créatures répugnantes au corps d'oiseau et à tête de femme, ravisseuses d'enfants et d'âmes. Zéphyr, le vent d'Ouest, aurait été son époux. Elle est figurée sur des vases et sur des bas-reliefs vêtue d'une longue tunique, les cheveux retenus par un bandeau et des ailes aux épaules : elle porte une écharpe légère dont les couleurs au soleil font un arc-en-ciel.

Dans la Bible, l'arc-en-ciel est le symbole de l'alliance que Dieu a conclue avec l'homme après le déluge : la postérité de Noé n'a plus à craindre un nouveau déluge. Dans l'Apocalypse, l'arc-en-ciel apparaît autour du trône de Dieu sous forme de lumière. Ce phénomène naturel a été très souvent représenté, mais quelle en était l'interprétation ?

Aristote est le premier philosophe à s'intéresser à l'arc-

en-ciel. Dans les *Météores*, il suppose que les rayons solaires se réfléchissent sur la surface externe des gouttes d'eau du nuage et que l'ombre de ce dernier, mêlée aux rayons du soleil, produit les couleurs de l'arc. Selon Aristote, le nuage est une surface d'eau noire ; or, la lumière traversant une surface noire devient rouge, comme la flamme du bois qui brûle : c'est l'origine de la couleur rouge de l'arc-en-ciel. Aristote ne voit que trois couleurs, le rouge, le vert et le violet. Ces deux dernières couleurs sont dues à l'atténuation de l'intensité lumineuse avec la distance : une réflexion proche expliquerait la couleur rouge, une réflexion plus éloignée le vert et la plus lointaine, le violet. Les Grecs, et notamment Aristote, distin-



Iris, parée de son écharpe, symbolisait l'arc-en-ciel pour les Grecs. Elle est représentée ici, sur un boîtier de montre.

guaient mal la lumière de la vision. La théorie d'Aristote, peu compatible avec les théories actuelles, domina pourtant pendant près de 2 000 ans.

Contrairement à l'ouïe et à l'odorat, la vue, comme le toucher, était un sens actif : selon Platon, un «quid» (quelque chose) sortait de l'œil pour se diriger vers l'objet et le tâter. Euclide, puis Ptolémée, donnèrent les principales caractéristiques de ce rayon visuel émergeant de l'œil, notamment qu'il se propage en ligne droite.

L'OPTIQUE ARABE

Les Arabes abandonnent la notion de rayon visuel émis par l'œil au profit du rayon de lumière issu de l'objet et pénétrant dans l'œil. Né à Bassorah, en Irak, en 965, et mort au Caire, en 1039, Alhazen comprend que la réfraction est un phénomène fondamental en optique. Il donne les lois de la réflexion, et établit des lois qualitatives observées lors de phénomènes de réfraction. Son *Discours de la lumière* ne sera imprimé en Occident qu'en 1572. Jusqu'à la fin du XIV^e siècle, l'optique arabe aura une influence notable ; elle ne sera supplantée par l'optique de l'Occident qu'à la fin du XVI^e siècle.

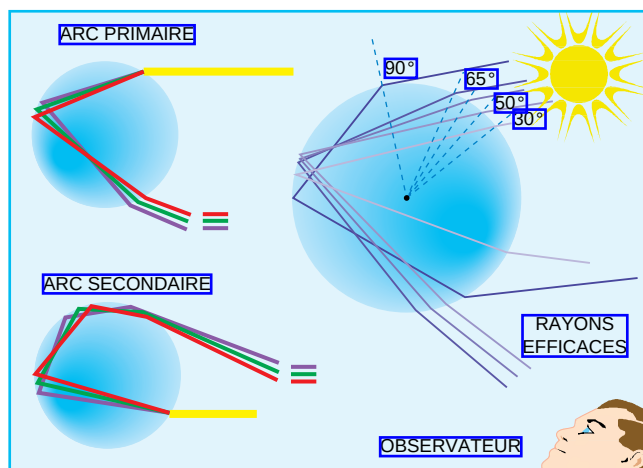
Ainsi, au XIII^e siècle, Robert Grosseteste, évêque de Lincoln et fondateur de l'école scientifique d'Oxford, s'intéresse à la réfraction. Il pressent que la réfraction est à l'origine des arcs-en-ciel, mais son interprétation est fautive. Il formule une loi erronée de la réfraction, où le rayon réfracté suit la bissectrice de l'angle formé par la normale et le rayon incident (depuis plusieurs siècles, Alhazen avait formulé une théorie plus élaborée). En 1266, constatant que des arcs-en-ciel apparaissent aussi dans des cascades, son disciple Roger Bacon émet l'idée que l'arc-en-ciel est produit par des réflexions dans les gouttes de pluie. Contrairement à Grosseteste, il ne mentionne pas la réfraction dans les causes possibles d'un arc-en-ciel.

À la même époque, à la fin du XIII^e siècle, le physicien et philosophe polonais Vitellion, reprend les hypothèses d'Alhazen et montre que la déviation des rayons lumineux par la réfraction est d'autant plus importante que le milieu est dense. Il comprend que ce phénomène intervient dans la formation des arcs-en-ciel. Son œuvre, méconnue, ne sera publiée qu'en 1572, en même temps que celle d'Alhazen.

C'est un autre dominicain, le moine Thierry de Freiberg (1250-1310), qui observe la réfraction à l'aide de flacons



La théorie de l'arc-en-ciel n'a été élucidée qu'à la fin du xx^e siècle. Pourtant Descartes avait compris que les rayons du Soleil qui traversent les gouttes de pluie et subissent une réfraction donnent



un arc primaire ; ceux qui subissent deux réflexions sont la cause de l'arc secondaire. Un observateur ne voit que les rayons dont l'angle d'incidence est proche de 59 degrés.

de verre remplis d'eau, assimilés à des gouttes de pluie fortement grossies. Il retrouve l'ensemble des phénomènes qui produisent un arc-en-ciel : le déplacement rectiligne des rayons du Soleil, les réflexions et les réfractions qu'ils subissent, la valeur de l'angle où apparaissent le phénomène et les différentes couleurs. Selon lui, les couleurs résulteraient du mélange de deux qualités, l'éclat et l'obscurité. Toutefois, ces résultats ont été peu diffusés.

Né à Messine en 1494, Francesco Maurolico fut moine dans un monastère isolé des Pouilles. Son œuvre, *Photismi de lumine et umbra* (Lumières sur la lumière et sur l'ombre), achevée en 1567, est considérée comme le meilleur ouvrage d'optique du xvi^e siècle. Il y traite notamment de la formation de l'arc-en-ciel. Il considère que la lumière se réfléchit sur la partie extérieure convexe et sur la partie intérieure concave des gouttes d'eau. Toutefois, cet ouvrage eut une influence minime, car il ne fut publié qu'en 1601.

La théorie de l'arc-en-ciel a été ébauchée au début du xvii^e siècle, par Marc Antonio De Dominis, évêque de Spalatro. En captant les rayons du Soleil dans un ballon rempli d'eau dont il modifie la hauteur, il forme des arcs-en-ciel sur les murs de son laboratoire. En observant le parcours des rayons lumineux dans le ballon, il montre que les rayons du Soleil sont réfractés en pénétrant dans une goutte d'eau ; ils sont réfléchis par le fond de la goutte qui se comporte comme un miroir concave ; ils ressortent de la goutte en subissant une nouvelle réfraction.

En 1604, Johannes Kepler publie un supplément à Vitellion ; il répond à presque toutes les questions anciennes, mais ne parvient pas à établir la loi de la réfraction. Toutefois, Kepler amorce

la démarche qui sera reprise avec succès, quelques années plus tard, par Descartes. En considérant l'œil comme une sphère, il calcule les chemins optiques sous différentes incidences.

LA THEORIE CLASSIQUE

En 1637, René Descartes reprend la théorie de De Dominis et la complète. Il montre qu'un arc-en-ciel résulte des lois de la réflexion et de la réfraction. Il établit que le rapport des sinus de l'angle d'incidence et de réfraction est constant quel que soit l'angle d'incidence (la loi avait déjà été établie, vers 1620, par le Hollandais Willebrod Snell, aussi nommé Snellius). Les rayons lumineux issus du Soleil supposé ponctuel arrivent parallèlement en différents points de la goutte de pluie, qu'ils abordent sous plusieurs angles d'incidence.

Les rayons qui subissent une seule réflexion donnent l'arc primaire ; l'arc secondaire, extérieur, est produit par une double réflexion à l'intérieur des gouttes. Tous les rayons incidents ne sont pas efficaces, c'est-à-dire visibles par l'observateur : seuls les rayons qui arrivent sous une incidence proche de 59 degrés pour l'arc primaire et de 71 degrés pour l'arc secondaire le sont.

Enfin, Isaac Newton donne une explication satisfaisante de la coloration de l'arc-en-ciel. En expérimentant avec des prismes, il montre que la lumière blanche est un mélange de couleurs, et que chaque couleur a un indice de réfraction différent.

Un rayon lumineux provenant du Soleil est réfracté à l'entrée et à la sortie de la goutte, ce qui sépare les rayons monochromatiques composant la lumière solaire. L'effet de chaque goutte est transitoire, mais la permanence du phénomène s'explique par la succession rapide

des gouttes de pluie. Si la théorie de Descartes et de Newton explique la décomposition de la lumière, elle ne justifie pas la présence des arcs surnuméraires, qui apparaissent vers l'intérieur de l'arc-en-ciel, du côté lumineux de l'arc primaire.

Thomas Young en trouva l'explication en 1803 : il montra que la superposition de plusieurs ondes peut provoquer un renforcement ou une atténuation de l'intensité lumineuse, c'est-à-dire que les ondes peuvent interférer. Ainsi, deux rayons déviés dans la même direction par une goutte d'eau interfèrent soit positivement, soit négativement, donnant naissance à une série de bandes alternativement sombres et brillantes. L'aspect des arcs surnuméraires dépend de la taille des gouttes, et l'on distingue rarement de tels arcs quand le diamètre des gouttes dépasse un millimètre.

Aujourd'hui, quatre théories coexistent et expliquent les différents phénomènes observés lors d'un arc-en-ciel : la théorie «classique» de Descartes, Newton et de Young qui s'applique pour les grosses gouttes d'eau (supérieures à un millimètre) ; celle de Georges Biddel Airy, datant de 1838, pour les gouttes dont le diamètre est supérieur à 0,1 millimètre ; celle de Gustav Mie, élaborée en 1908, est fondée sur les équations électromagnétiques de Maxwell : elle est «exacte», mais lourde ; enfin, la théorie du moment cinétique complexe, établie par Vijay Khare, en 1975, donne des résultats très proches de ceux de Mie, tout en s'affranchissant des longs calculs informatiques.

Jean-Louis Ricard est chercheur, à Météo-France, à Toulouse.

Fraîches couleurs

Comment éviter le noircissement des fruits et des légumes.

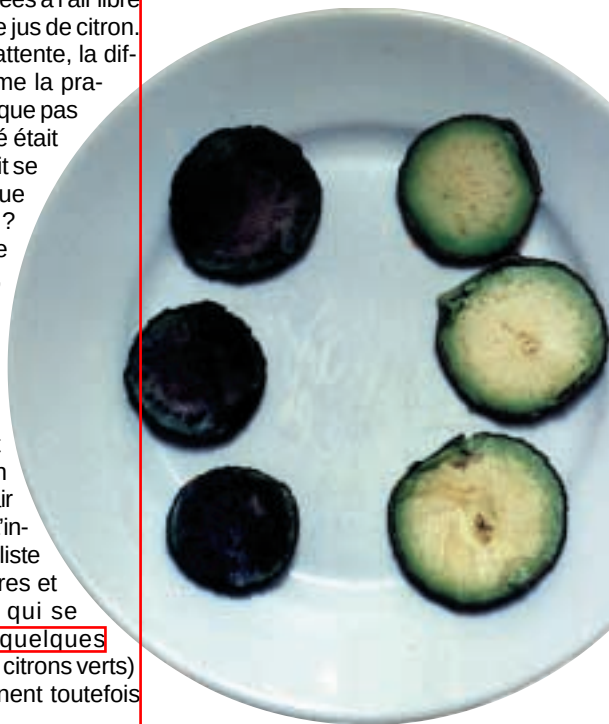
Le temps des légumes est revenu ; leur couleur tendre est gage de leur fraîcheur. Hélas à peine émincés, avocats, salsifis ou champignons noircissent. Comment éviter cette dégradation ? Comment servir des jus de pommes pressés maison qui ne s'assombrissent pas entre la cuisine et la table ? Cuisinières et cuisiniers préconisent le citron dont le jus, disent-ils, préviendrait l'apparition de couleurs associées à la surmaturation, à l'endommagement ou à la pourriture des végétaux. Leur recommandation est-elle fondée ?

Mettons-la à l'épreuve : comparons des rondelles d'avocat laissées à l'air libre à des rondelles arrosées de jus de citron. Après quelques heures d'attente, la différence, manifeste, confirme la pratique culinaire, mais n'explique pas l'effet protecteur. Si l'acidité était en cause, le vinaigre devrait se substituer au citron... ce que réfute l'expérience. Alors ? Le citron renferme de l'acide ascorbique, ou vitamine C, qui est un composé antioxydant. Autrement dit, de l'acide ascorbique pur (on en trouve en pharmacie) devrait être plus efficace que le jus de citron : c'est bien le cas. En outre, on observe que l'oxygène de l'air participe au brunissement. L'industrie peut-elle allonger la liste empirique que les cuisinières et cuisiniers ont établie et qui se résume au jus de quelques agrumes (citrons, oranges, citrons verts) et aux saumures, qui donnent toutefois un goût salé ?

Le brunissement des végétaux est dû à des enzymes nommées polyphénoloxydases, qui modifient les molécules de polyphénol (un centre benzénique, à six atomes de carbone disposés aux sommets d'un hexagone, auquel sont liés plusieurs groupes hydroxyle OH) des fruits et des légumes. En présence d'oxygène, ces enzymes remplacent les groupes hydroxyle par des atomes d'oxygène, puis les quinones ainsi formées réagissent, engendrant des pigments bruns de la même famille que la mélanine (qui se forme quand nous bronçons). Ce brunissement enzymatique, qui défend appa-

remment les plantes contre les ravageurs, fait rage dans la plupart des fruits, des feuilles et dans de nombreux champignons ; il ne sévit pas dans les végétaux intacts, parce que les enzymes et les polyphénols sont séparés par des membranes.

Divers traitements physiques évitent le brunissement des légumes et fruits qui sont émincés, ce qui est fréquemment leur lot, en cuisine : la congélation ou la réfrigération ralentissent l'action des enzymes, mais ne la bloquent pas ; la pasteurisation est plus radicale, car elle dégrade les enzymes, mais elle ne s'applique pas à tous les fruits et légumes, car



Laissés à l'air libre, des morceaux d'avocat

elle dégrade souvent la texture ou la couleur des végétaux. Enfin le conditionnement en l'absence d'oxygène évite l'apparition des composés bruns ; l'industrie procède parfois sous atmosphère d'azote ou de dioxyde de carbone.

Revenons à la chimie : n'existe-t-il pas des inhibiteurs qui, en proportion infime, préviendraient le brunissement enzymatique ? Dix micromoles par litre d'acide salicylhydroxamique inhibent complète-

ment les polyphénoloxydases des pommes ou des pommes de terre, par exemple ; et la bentonite, une argile qui absorbe les protéines, réduit l'activité polyphénoloxydase des vins ; la gélatine, le charbon actif ou la polyvinylpolypyrrolidone extraient aussi des phénols solubles des vins et des bières, mais ils modifient les propriétés des produits.

Employés dans l'industrie agro-alimentaire, les sulfites évitent le brunissement en se liant aux quinones et en formant des sulfoquinones incolores : le dioxyde de soufre et le métabisulfite de sodium sont un outil courant des producteurs de vin, par exemple, mais ils ont des effets secondaires qui préoccupent les autorités sanitaires : aux bénignes migraines causées par les vins excessivement sulfités s'ajoutent des crises d'asthme ou d'urticaire, des nausées, voire des chocs anaphylactiques. La recherche d'autres inhibiteurs aussi efficaces et sans inconvénient s'impose.

De nombreux inhibiteurs ont été découverts ou synthétisés, mais ils doivent encore prouver leur innocuité. On explore, par exemple, la cystéine, acide aminé contenant du soufre, et ses dérivés, ainsi que bien des composés naturels (dans le miel, les figues ou l'ananas) ou de synthèse.

En France, Jacques Nicolas, au CNAM, et ses collègues de la Station INRA de Montfavet explorent une voie nouvelle : l'utilisation de cyclodextrines, des molécules en forme d'abat-jour qui évitent le brunissement en extrayant les polyphénols dans leur cavité centrale. J. Nicolas et ses collègues ont d'abord analysé l'effet anti-brunissement de ces molécules dans des solutions modèles contenant un ou deux phénols et de la polyphénoloxydase de la pomme *Red Delicious*. En attendant l'application industrielle de leurs résultats, si vous voulez produire un jus de pommes sans recourir à des atmosphères inertes, recourez à la « clarification », qui consiste à laisser le brunissement se produire ; comme les polyphénoloxydases des pommes se trouvent dans le chloroplaste des cellules, elles restent dans les débris solides, qui noircissent, s'agregent et sédimentent. Laissez alors reposer le jus avant de decanter le liquide ambré et clair.

Hervé THIS

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le 29 mai 1996, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Une armée de métier adaptable

Les fourmis ajustent à la menace les effectifs des ouvrières combattantes.

Comme l'abeille, la fourmi est un insecte social, c'est-à-dire qu'elle vit en colonies, réparties en castes spécialisées. Cette division du travail accroît l'efficacité du groupe. Dans les sociétés de fourmis, les rôles sont distribués entre les reines fertiles, qui assurent la reproduction, et les ouvrières stériles, qui sont au service de la communauté.

Luc Passera et ses collègues du Laboratoire d'éthologie de l'Université Paul Sabatier, à Toulouse, et Laurent Keller et son équipe de l'Institut d'écologie de l'Université de Lausanne ont montré que les effectifs des castes ne sont pas figés : ainsi le nombre des «soldats» augmente quand les colonies de fourmis du genre *Pheidole* se sentent menacées.

Chez ces fourmis, très répandues dans les régions tempérées et notamment dans le midi de la France, les ouvrières adultes sont de deux types : les ouvrières minores de petite taille, et les ouvrières majors de grande taille, les soldats. Les ouvrières majors se différencient des ouvrières minores par la taille de leur tête, qui est armée de mandibules puissantes. Elles ont pour rôle de défendre la colonie.

Dans l'espèce *Pheidole pallidula*, un mécanisme de régulation sociale maintient quasi constantes les proportions de

soldats et d'ouvrières minores : les soldats représentent entre 5 et 30 pour cent de la colonie. Ces proportions semblent le meilleur compromis, assurant à la fois une protection minimale contre un prédateur potentiel et la croissance de la population, puisque les ouvrières minores assurent diverses activités sociales, telles que la «puériculture», le forage des galeries, la construction des nids ou encore la récolte de la nourriture.

Or, L. Passera et L. Keller ont été les premiers à montrer que ces proportions ne sont pas immuables et que les fourmis *Pheidole pallidula*, mises en alerte par toute menace d'agression, décrètent un état d'urgence qui se traduit par une augmentation du nombre de soldats.

Pour le montrer, ces biologistes ont étudié deux colonies de *Pheidole pallidula* étrangères, c'est-à-dire prélevées sur deux fourmilières différentes : ils les ont désarmées en éliminant tous les soldats. Les deux colonies ont été placées dans un couloir de circulation, de part et d'autre d'une grille qui interdisait toute intrusion ou toute attaque directe. Les fourmis ne pouvaient se toucher qu'avec leurs antennes ou leurs pattes. Se sentant menacées par les étrangères, elles réagirent en élevant deux fois plus de soldats que des fourmis témoins élevées sans menace. Comment cette

mobilisation se produit-elle ? Les ouvrières, qu'elles soient des soldats majors ou des fourmis minores passent toutes par les mêmes stades larvaires et la différenciation n'a lieu qu'au cours du dernier stade qui précède la nymphose (la larve se transforme en nymphe, laquelle donne l'insecte). Ainsi, les fourmis ne deviennent soldats ou simples ouvrières qu'au dernier moment et c'est la taille de la larve qui est le facteur déterminant. Pour que ces larves atteignent la taille qui fera de l'insecte à naître un soldat, les fourmis les suralimentent et leur administrent un régime riche en protéines.

UNE STRATEGIE COUTEUSE

Cette stratégie de défense a plusieurs conséquences pour la colonie : la production de soldats est lente, car il faut environ sept semaines pour les fabriquer, et elle est coûteuse, puisqu'il faut nourrir davantage les larves. Enfin, comme davantage de larves deviennent des soldats, le nombre d'ouvrières minores diminue : la colonie se défend bien, mais elle se dépeuple.

Une autre attitude consisterait à redistribuer les tâches entre les fourmis déjà actives dans la colonie, mais les tâches sont très spécifiques et le comportement des fourmis peu flexible. Toutefois, si, en temps de paix, les soldats sont presque inactifs et représentent une sorte de luxe, ils sont beaucoup plus efficaces que les minores en temps de guerre. En raison de leur taille, ils assurent une défense passive du nid en bloquant l'entrée ; en cas d'intrusion, ils portent, avec leurs mandibules, des morsures fatales aux étrangères immobilisées par plusieurs ouvrières minores. Ainsi les fourmis s'imposent un «effort de guerre» pour adapter au mieux leurs caractères physiques à la tâche.

Reste à découvrir le signal qui déclenche la production de soldats : il s'agirait d'une phéromone, une molécule-signal transmise par contact (quand on supprime toute possibilité de contact entre les deux espèces, les fourmis ne se sentent pas menacées). Contrairement aux fourmis d'une même fourmilière, celles de deux fourmilières différentes émettent des hormones différentes (même si elles sont de la même espèce). Les fourmis qui surveillent l'entrée de la colonie détecteraient cette molécule par contact avec l'intrus, transmettraient l'information au reste de la colonie, qui déciderait de suralimenter les larves pour produire des soldats au lieu d'ouvrières.

Marie-Thérèse LANDOUSY



Fourmis majors soldats entourées d'ouvrières minores.

Sont-ils bien morts ?

Une méthode de vérification de la mort au XVIII^e siècle.

Les croque-morts n'ont jamais vérifié avec les dents la réalité des décès : le verbe croquer a ici le sens argotique de «faire disparaître». Au début du XVIII^e siècle, lorsque cette expression est apparue, la vérification de la mort était toutefois un acte important : la peur d'être enterré vivant était une phobie. La fouille archéologique d'un charnier de la grande peste, qui sévit à Marseille de 1720 à 1722, nous a permis, avec Georges Léonetti, du service de médecine légale de la Faculté de médecine de Marseille, et Olivier Dutour, du Laboratoire d'anthropologie biologique, de montrer qu'une méthode de vérification de la mort décrite dans des anciens traités médicaux, l'introduction d'une épingle dans le gros orteil, était vraiment utilisée.

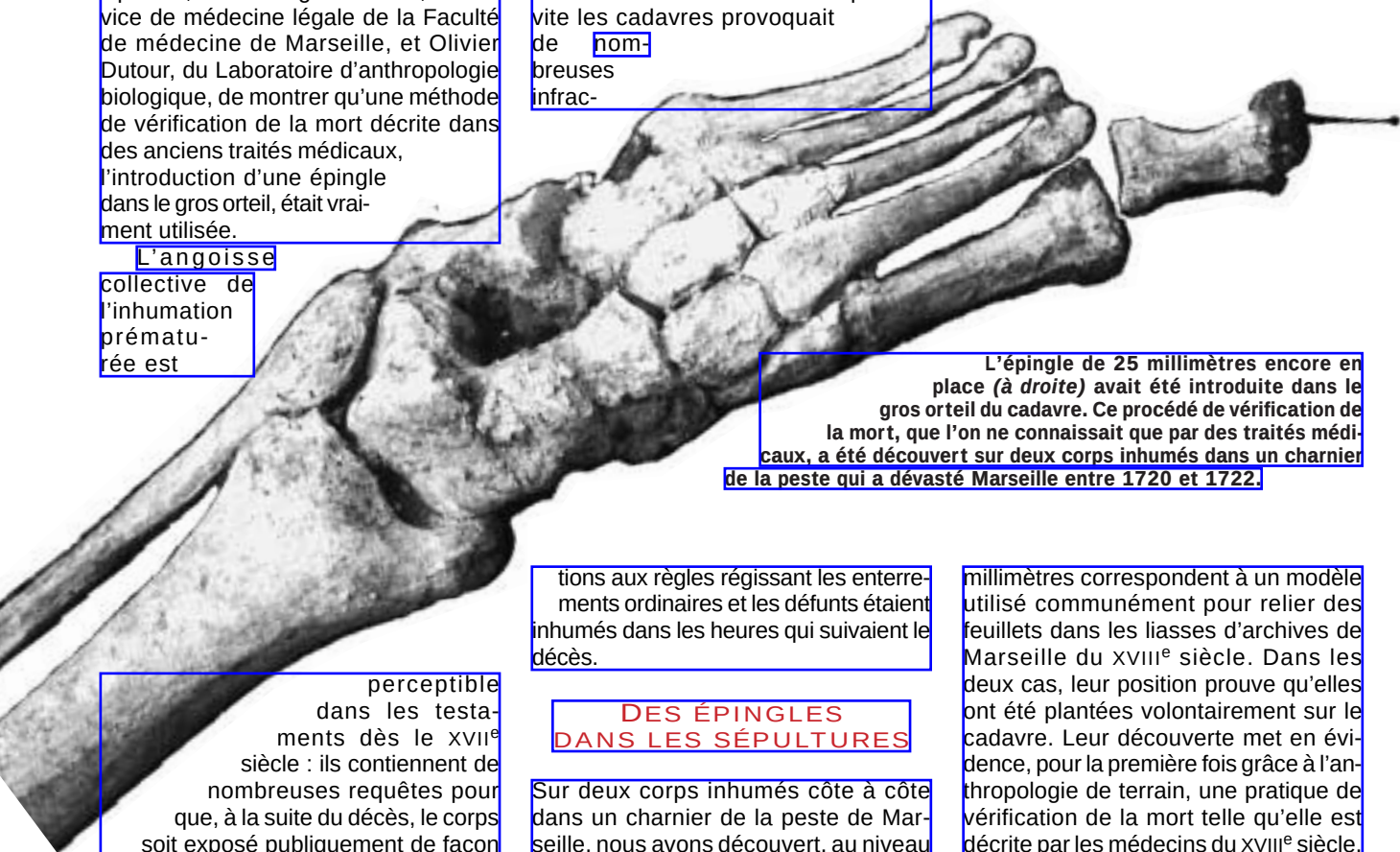
L'angoisse collective de l'inhumation prématurée est

De nombreuses épreuves de vérification sont décrites en détail : pour les «épreuves chirurgicales», relatées par Buffon, on utilise des instruments tranchants, piquants ou brûlants, que l'on applique sur la face interne des mains, des bras, des omoplates, sous la plante des pieds ou sous les ongles des orteils. Les ouvrages médicaux recommandent une attention particulière en temps de peste, où le risque de fausse mort était maximal : la nécessité d'isoler au plus vite les cadavres provoquait de nombreuses infractions



est celle d'une femme d'âge mûr. Une épingle avait été introduite en dehors du tendon de l'extenseur du gros orteil droit, à proximité de la phalange, et recourbée sur le dos de la phalange, à la moitié de son trajet.

Ces épingles d'une longueur de 25



L'épingle de 25 millimètres encore en place (à droite) avait été introduite dans le gros orteil du cadavre. Ce procédé de vérification de la mort, que l'on ne connaissait que par des traités médicaux, a été découvert sur deux corps inhumés dans un charnier de la peste qui a dévasté Marseille entre 1720 et 1722.

tions aux règles régissant les enterrements ordinaires et les défunts étaient inhumés dans les heures qui suivaient le décès.

DES ÉPINGLES DANS LES SÉPULTURES

Sur deux corps inhumés côte à côte dans un charnier de la peste de Marseille, nous avons découvert, au niveau de l'extrémité du gros orteil, une épingle à tête en bronze. Le premier corps est celui d'une jeune femme, dont l'inhumation a suivi de peu le décès : sa position indique que le cadavre n'était pas encore rigide. Une épingle avait été introduite sous l'ongle du gros orteil gauche, tangentielle à la dernière phalange. La seconde sépulture

perceptible dans les testaments dès le XVII^e siècle : ils contiennent de nombreuses requêtes pour que, à la suite du décès, le corps soit exposé publiquement de façon prolongée. Plusieurs traités médicaux de cette époque dénoncent aussi le risque d'enterrements prématurés. Tout en reconnaissant qu'hormis l'apparition de la putréfaction, aucun signe de la mort ne peut être tenu pour certain, les médecins recommandent la vérification de la réalité du décès par tous les moyens, si les circonstances le permettent.

millimètres correspondent à un modèle utilisé communément pour relier des feuillets dans les liasses d'archives de Marseille du XVIII^e siècle. Dans les deux cas, leur position prouve qu'elles ont été plantées volontairement sur le cadavre. Leur découverte met en évidence, pour la première fois grâce à l'anthropologie de terrain, une pratique de vérification de la mort telle qu'elle est décrite par les médecins du XVIII^e siècle. Pour l'une des deux femmes dont le décès avait ainsi été certifié, les fossoyeurs avaient toutefois peut-être encore un doute : ils ont déposé sur ses membre inférieurs un bloc de pierre de 50 kilogrammes.

Michel SIGNOLI
Laboratoire d'anthropologie biologique,
Faculté de médecine de Marseille

Un gaz d'humains

Les foules humaines sont simulées en considérant les hommes comme des particules en interaction.

Quel est le point commun entre le gonflement d'un «airbag», la pollution atmosphérique, la visite d'une exposition et l'évacuation d'un stade de football ? Tous ces événements sont simulés par une méthode qui utilise des particules. La Société ArSciMed a mis au point un logiciel qui simule ces phénomènes.

Si les liquides et les gaz sont constitués d'un ensemble d'éléments (atomes, molécules), on ne traite pas leur dynamique en considérant ces éléments. Les simulations de ces systèmes sont généralement macroscopiques : elles n'utilisent pas les propriétés de leurs composants, mais ses caractéristiques fluides. Malheureusement, ces études macroscopiques décrivent mal des situations turbulentes : l'approche microscopique est alors mieux adaptée.

Le principe de la simulation consiste à considérer des ensembles d'éléments auxquels on associe des attributs qui déterminent leur évolution. À la différence des molécules de gaz, les éléments d'une foule humaine possèdent une faculté de décision. Aussi modélise-t-on un flux de piétons en considérant chaque individu comme une particule à laquelle on prescrit des règles de comportement.

L'accélération d'une particule est déterminée par la somme des forces d'interaction entre cette particule et toutes les autres, ajoutée à des forces extérieures. On associe à cet aspect de mécanique classique une loi non déterministe : entre deux pas de temps, les règles d'évolution des trajectoires sont de nature probabiliste. Les transitions entre deux trajectoires peuvent être globales (indépendantes des positions des particules) ou associées à la densité locale des particules.

Dans les réunions publiques, les forces de cohésion entre individus varient entre la faible cohésion des supporters d'une équipe spor-

tive, et celle, importante, d'une famille. Des classes d'individus sont ainsi définies en fonction de leurs comportements, ce qui permet de prendre en compte des foules importantes.

LA SIMULATION DU COMPORTEMENT HUMAIN

Deux types de comportement humain sont traités : les réflexes (c'est-à-dire les réactions immédiates) et les décisions qui résultent d'une analyse de la situation. Le comportement réflexe est un phénomène local dépendant de la densité. Aux faibles densités, le changement de direction entre deux individus est activé à une distance donnée et les collisions sont exceptionnelles. À mesure que la densité croît, la fréquence des collisions augmente et elles peuvent faire interagir plus de deux individus.

La modélisation des décisions humaines dépend d'un ensemble de paramètres comme la destination, la

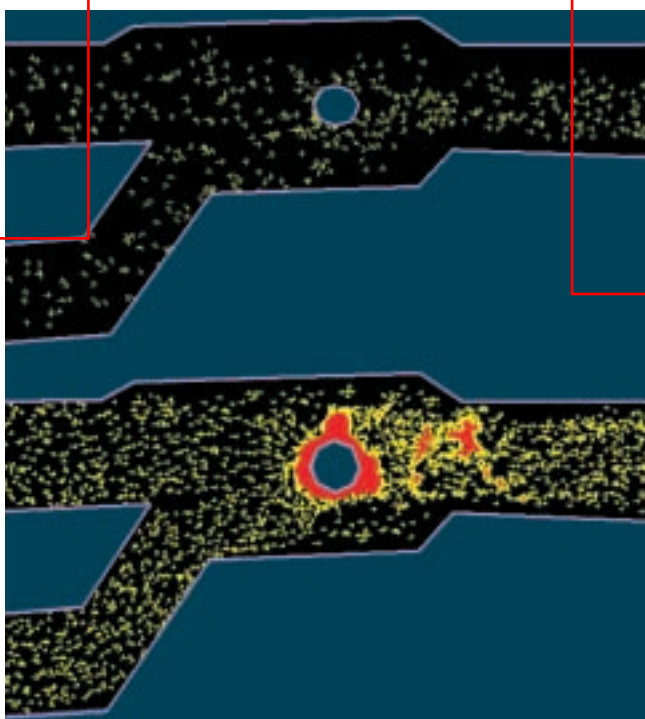
densité, la durée d'arrêt en un lieu donné, la présence d'obstacles et le but des personnes. Ces paramètres sont représentés par un «champ de décision». Les individus, auxquels on associe un «état de charge», évoluent dans ce champ de décision comme une particule chargée évoluerait dans un champ électromagnétique.

Cette modélisation a été appliquée dans de nombreuses situations allant du simple lèche-vitrines dans un centre commercial à la situation critique de l'évacuation d'une foule nombreuse. On étalonne les paramètres de comportement en appliquant le modèle à des situations connues.

Dans le contexte de l'évacuation de grands bâtiments, les durées d'évacuation sont souvent plus longues que celles obtenues par une approche du type fluide, ce qui s'explique par la complexité du système qui engendre des événements chaotiques. Dans certaines simulations d'évacuations, on aboutit à des situations critiques, comme la formation d'ondes de choc et de pics de densité, alors que l'approche globale conclut à une évacuation fluide.

À l'Université de Warwick, Keith Still simule des foules différemment. En notant, qu'au-dessus d'une densité critique, les foules s'auto-organisent en fonction de la configuration des lieux et en utilisant des lois simples d'évitement des obstacles, il simule des foules importantes (jusqu'à 250 000 individus). Il remarqua que les motifs de foule obtenus possédaient une structure fractale (le même motif se répétait à toutes les échelles), ouvrant des perspectives sur la compréhension des mouvements de foules.

De nombreuses applications de ces simulations sont envisageables comme la conception de gares, d'expositions et de stades. Elles peuvent également servir d'outil pour l'exploitation des infrastructures existantes. Les performances actuelles (100 000 personnes simulées en temps réel) permettent l'aide à la décision lors de grands rassemblements de population : un centre de commande pourvu d'un ordinateur puissant traite des données reçues en direct (par caméra ou image aérienne) pour évaluer les différentes solutions à une catastrophe en cours. □



Simulation d'un flot humain dans un hall d'exposition. Les individus arrivent par le côté gauche, rencontrent un pôle d'intérêt au centre, puis s'en vont vers la droite. En haut, le débit est faible et le déplacement est régulier. En bas, le débit humain est tel que des pics de densité se forment (en rouge) autour du pôle d'intérêt et à l'approche du couloir de sortie, provoquant encombrements et bousculades.

Le parfum sur la peau

On sait pourquoi l'odeur d'un parfum change selon la personne qui le porte.

La perception des odeurs et la performance des parfums sur la peau varient considérablement selon les individus. Cette variabilité préoccupe les industriels de la parfumerie: leurs clients se plaignent que les parfums n'aient pas les effets attendus. Pourquoi un même parfum sent-il différemment selon la peau où il a été déposé? Peut-on quantifier la persistance et la diffusivité des parfums? Nous avons mesuré les performances individuelles des matières premières présentes dans une composition parfumée et étudié le comportement des ingrédients du parfum sur la peau.

Une personne qui se parfume ne souhaite pas que le parfum onéreux qu'elle vient d'acheter perde son impact au moment où elle arrive au rendez-vous qu'elle a préparé en se parfumant! Toutefois les parfumeurs savent que la peau est un substrat complexe, qui diffère selon les individus. Elle est composée de deux couches: le derme

donne à la peau son apparence et son élasticité, protégeant l'organisme contre les dommages physiques; l'épiderme, composé de quatre sous-couches, protège contre les substances nocives. La peau contient également des glandes sébacées, qui produisent un liquide gras. Au total, sa porosité, son acidité et sa teneur en lipides varient. Ces variations expliquent qu'un parfum qui sent merveilleusement bon sur une personne soit moins agréable sur une autre: les molécules odorantes sont souvent solubles dans les lipides, et elles réagissent de diverses façons avec les acides de la peau.

Afin d'explorer ces différences, nous avons étudié la peau de cinq hommes et sept femmes à divers moments après l'application d'une quantité contrôlée d'un parfum déposé sur les avant-bras (la peau avait été lavée, séchée, nettoyée...). Le parfum utilisé était composé de huit matières premières dans une solution aqueuse à dix pour cent

d'alcool: le cyclohexal, l'héliotropine, le linalol, la vanilline, l'isoraldéine 95, la pêche pure, le radjanol et l'hédione. On prélevait de l'air à un centimètre et à cinquante centimètres de la peau en aspirant à travers un filtre absorbant, puis en désorbant le parfum et en séparant les constituants désorbés par chromatographie.

Pour chaque sujet, nous avons mesuré la composition lipidique de la peau, déterminé le relief de la peau en analysant des répliques d'une parcelle de l'avant-bras (la rugosité résulte de la taille des pores), mesuré le taux d'évaporation de l'eau, ainsi que l'acidité.

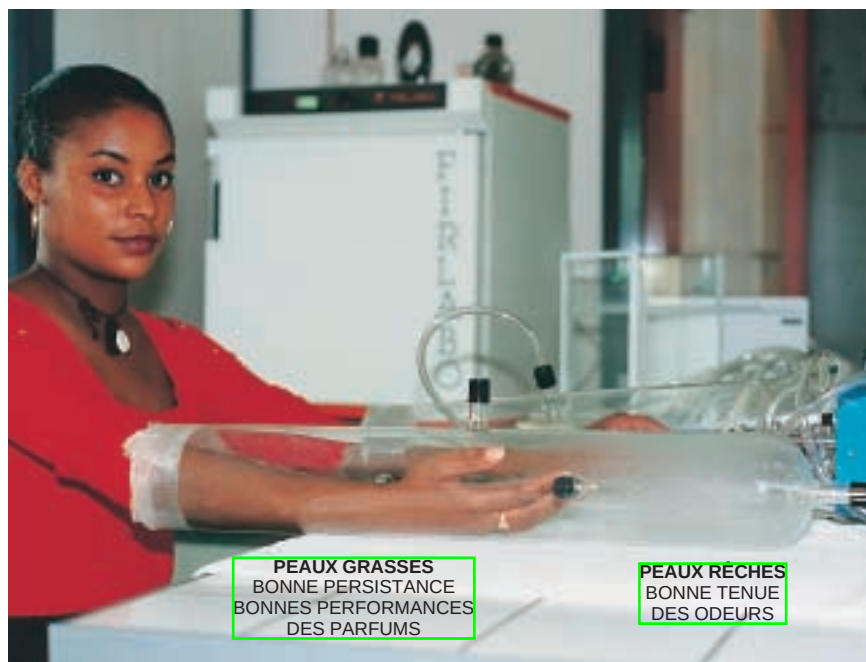
DES PEaux ET DES PARFUMS

Sur toutes les peaux, nous avons d'abord observé de fortes variations de la «substantivité» (la persistance sur la peau) et de la diffusivité. Ainsi le linalol a une faible substantivité, mais une forte diffusivité, tandis que l'héliotropine a une substantivité moyenne et une faible diffusivité. Les caractéristiques que nous avons mesurées rejoignent les observations des parfumeurs.

Puis nous avons évalué les différences de performances du mélange en fonction des divers types de peaux. Avec l'aide de George Klecak et de Thierry Weber, de la Société *Hoffmann-La Roche*, nous avons établi que la performance d'un parfum ne dépend pas de l'acidité de la peau qui le reçoit. En revanche, à l'exception du linalol, les matières premières appliquées sur deux peaux qui ne diffèrent que par la rugosité ont des comportements distincts: les peaux les plus rêches les libèrent beaucoup plus dans l'air. Dans le cas de la vanilline, la différence est d'un facteur trois. Enfin toutes les matières premières se volatilisent plus pour les personnes ayant une peau grasse, même si cette différence s'atténue avec le temps.

Au total, l'analyse par espace de tête semble une bonne méthode de mesure de la persistance des parfums sur la peau; elle permet de trouver des réponses à l'une des plus vieilles questions de l'industrie de la parfumerie. Les analyses ne donnent pas de moyen immédiat de faire tenir de la même façon les parfums sur toutes les peaux, mais elles permettront d'ajuster les compositions afin de tenir compte des phénomènes d'évaporation, variables selon les individus.

Ahmet BAYDAR, Emmanuelle COSTANTINO et Marie TONNEAU
Société *Givaudan-Roure*



Appareil de mesure des propriétés des parfums selon la peau des personnes qui les appliquent: l'air parfumé est prélevé près du bras et à distance de lui, à l'extrémité du tube. En surimpression, on a indiqué quelques résultats des analyses effectuées.

Production en série

Le débitage de lames de pierre a 250 000 ans.

La découverte, au Kenya, de lames en roches volcaniques taillées il y a plus de 240 000 ans confirme l'ancienneté du débitage en lames des roches dures. Les méthodes utilisées pour produire en série de longs bords tranchants, particulièrement réguliers et acérés, témoignent à la fois de l'inventivité et des capacités d'abstraction des ancêtres de l'homme moderne.

En Afrique orientale, de rares concentrations d'objets de pierre, portant des traces caractéristiques d'une taille intentionnelle, témoignent que nos ancêtres ont franchi le seuil de l'homínisation il y a environ 2,7 millions d'années. Ainsi, tout au long de la préhistoire, des vestiges minéraux nous révèlent-ils des aspects du fonctionnement mental de ceux qui les ont produits. À partir de l'examen des faces supérieures des éclats de taille et des surfaces de débitage des blocs dont ils proviennent, nous reconstituons des enchaînements de gestes techniques et nous retrouvons la logique de leur organisation.

L'image mentale qu'a l'artisan du nucléus à lames qu'il projette de réaliser se concrétise progressivement au cours d'une phase préparatoire complexe. Ainsi sont mises en place les caractéristiques géométriques et mécaniques qui permettront la production d'une série continue d'éclats allongés et de forme stéréotypée. Ces caractéristiques sont régénérées à chaque fois qu'une lame est détachée du nucléus. Toute erreur d'appréciation et tout défaut de la matière première peuvent conduire à un accident de taille : la poursuite du débitage nécessite la remise en forme du nucléus. La présence de lames est toujours l'indicateur d'un niveau de compétence technique élevé.

En 1969, Margaret Leakey avait signalé des lames dans un niveau archéologique de la formation de Kapthurin, sur les rives occidentales du lac Baringo, au Kenya. Depuis 1993, des prospections dirigées par Sally Mc Brearty, de l'Université du Connecticut, ont localisé de nouveaux sites et ont confirmé leur ancienneté : ils se situent à plusieurs mètres sous une épaisse

couche de cendres volcaniques datée de 240 000 ans.

UNE GRANDE MAÎTRISE DE LA TAILLE

Ces niveaux ont livré des vestiges qui témoignent de plusieurs méthodes de débitage de lames. Deux nucléus à un ou deux plans de frappe opposés avaient été aménagés sur des éclats épais. Une douzaine d'éclats et de lames aux talons soigneusement préparés ont été replacés sur un troisième nucléus. Ce remontage montre que la production a été interrompue par des phases de remise en forme du nucléus. Tous ces débi-



Le remontage, sur le bloc d'origine (en haut), de lames (en bas) et d'éclats de pierre taillés il y a plus de 240 000 ans montre le haut niveau technique des artisans qui ont procédé à ce débitage.

tages ont été réalisés par percussion directe à la pierre. Compte tenu de la fragilité de la matière première, les proportions de quelques lames sont remarquables et témoignent d'une grande maîtrise de la taille : certaines atteignent une douzaine de centimètres de long pour une épaisseur inférieure au centimètre.

Il y a encore une dizaine d'années, la communauté scientifique ne croyait pas à l'ancienneté du débitage laminaire. Plusieurs découvertes avaient été signalées dès la fin du XIX^e siècle, mais les préhistoriens refusaient d'en reconnaître la pratique à une autre espèce que *Homo sapiens sapiens* : la présence de lames dans un ensemble d'objets taillés était considérée comme un bon indice d'une appartenance au Paléolithique supérieur, qui a débuté il y a seulement 40 000 ans. On se souciait plus alors, dans l'enthousiasme de la recherche préhistorique naissante, de mettre de l'ordre dans la profusion de documents engendrée par la multiplication des fouilles.

Le développement, depuis une dizaine d'années, des grands travaux en Europe septentrionale (autoroutes, lignes T.G.V.) a favorisé les découvertes d'industries laminaires attribuables sans aucune contestation aux hommes du Paléolithique moyen. Des séries ont été mises au jour en Angleterre, en Belgique, dans la Manche, dans le Pas-de-Calais, dans le Nord, dans l'Yonne... Les plus anciennes datent de 250 000 ans, tandis que les plus récentes auraient été produites il y a plus de 60 000 ans, à la fin du Paléolithique moyen.

Ces découvertes ont entraîné un regain d'intérêt pour des débitages de lames du Proche-Orient : récemment révisé, leur âge s'échelonne de 300 000 à 80 000 ans. En Afrique du Sud, les plus anciens produits laminaires du Middle Stone Age (l'équivalent du Paléolithique moyen en Europe) datent de 130 000 à 60 000 ans.

Il est désormais prouvé qu'une nouvelle manière de penser et de traiter les volumes pour produire des lames, adaptée à de nouveaux besoins, a fait son apparition en Afrique, il y a au moins 240 000 ans, à la fin de la longue période de l'Acheuléen. C'est un aspect précurseur, mais momentanément sans lendemain, du potentiel technologique manifesté par les artisans acheuléens : cette conception du débitage n'est réapparue et ne s'est généralisée que plusieurs dizaines de milliers d'années plus tard.

Pierre-Jean TEXIER, CNRS ERA 28
Centre de recherches archéologiques

L'éruption du Pinatubo

Un panache thermique mélange les magmas.

En juin 1991, aux Philippines, le volcan Pinatubo entre en éruption, l'une des plus importantes éruptions du siècle. Le volcan émet d'abord un mélange de deux magmas, basalte et dacite, suivi d'une grande quantité de dacite, le moins dense de ce couple de magmas. Cette séquence est étrange : le fluide le moins dense qui réside normalement en surface aurait dû être éjecté en premier. L'étude d'une maquette expérimentale lève ce paradoxe apparent : le mélange des magmas résulte de la formation d'un panache thermique.

La surveillance sismique du site avant l'éruption a révélé l'existence, sous le volcan, d'une chambre magmatique de dacite. Ce magma, originaire de la croûte, est très visqueux (la viscosité du goudron), mais sa densité est relativement faible (trois fois celle de l'eau). Quelques semaines avant l'éruption, un magma basaltique pénètre dans cette chambre. Le basalte, qui provient du manteau terrestre, est plus dense, mais beaucoup moins visqueux que la dacite (sa viscosité est celle du miel). La température du basalte injecté (1 200 degrés) est supérieure à celle de la dacite dans la chambre (800 degrés).

Pour simuler la chambre magmatique les géophysiciens utilisent une petite cuve et des fluides d'emploi plus faciles que



Dans ce mélange de laves éjectées, le basalte est sombre et la dacite est claire.

les magmas : de l'eau plus ou moins salée (pour choisir la densité) où il ajoutent une quantité ajustée de polymère (pour régler la viscosité). Les viscosités et les densités reproduisent à cette échelle, le comportement des magmas dans la chambre. On modélise le phénomène en injectant lentement à travers une fente un liquide chaud et dense, correspondant au basalte, dans un réservoir rempli d'un liquide moins dense et plus visqueux, correspondant à la dacite.

Le liquide injecté s'étale tout d'abord sur le plancher de la cuve en une langue très fine. À proximité de la fente d'injection, le liquide supérieur se dilate en raison de l'augmentation de la température locale, et il se crée un panache thermique qui s'élève sous l'action de la poussée d'Archimède. Ce panache dans le liquide le plus visqueux est suffisamment puissant pour entraîner dans son ascension une mince pellicule du liquide injecté. Au cours de l'expérience, une petite quantité de ce liquide s'accumule près du plafond de la cuve et y stagne tant que l'injection se poursuit.

Lors du mélange des deux magmas, le basalte chauffe la dacite saturée d'eau. Comme la solubilité de l'eau dans ce magma diminue lorsque la température augmente, la dacite dégaze. Les bulles de vapeur ainsi créées augmentent la pression et dilatent la chambre magmatique, ce qui déclenche l'éruption.

Ces mécanismes, entraînement des basaltes suivi d'un dégazage, expliquent pourquoi le mélange dense se trouvait au sommet de la chambre au moment de l'éruption. De plus, l'analyse des résultats expérimentaux prédit que, dans la chambre magmatique du Pinatubo, la pellicule de liquide basaltique entraînée avait quelques centimètres d'épaisseur, conformément à la taille des structures de mélange relevées au Pinatubo et dans d'autres volcans similaires.

Don SNYDER et Stephen TAIT
Institut de physique du globe, Paris

Crapauds droitiers

Ils le doivent à leur estomac.

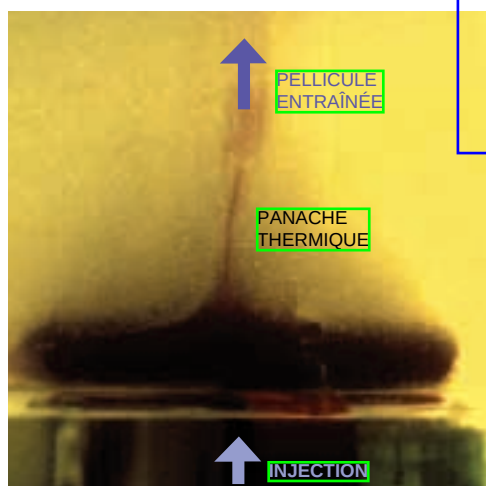
Pourquoi certains animaux, dont les hommes, utilisent-ils leurs membres de façon asymétrique ? Des primates, des souris et des oiseaux possèdent cette caractéristique : les poules grattent le sol préférentiellement avec leur patte droite. Une équipe des Universités de Padoue et d'Udine, en Italie, et de Nouvelle Angleterre, en Australie, a montré que des populations de crapauds sont constituées majoritairement de droitiers. La cause en serait une asymétrie des viscères.

Des crapauds européens (*Bufa bufo*) ont été soumis à des tests où ils devaient utiliser leurs membres antérieurs. Les chercheurs leur ont enveloppé la tête avec un ballon en caoutchouc, ou leur ont collé un morceau de papier humide sur la bouche et sur le nez. Dans plus de 55 pour cent des cas, c'est le membre antérieur droit qui était utilisé en premier pour enlever l'objet gênant.

Soumis à un test analogue, des crapauds de la canne à sucre (*Bufa marinus*), originaires d'Amérique du Sud, se répartissaient équitablement entre gauchers et droitiers. En revanche, dans un exercice où ils étaient plongés dans l'eau le ventre vers le haut, ils ont majoritairement utilisé leurs membres droits pour contrôler leur rétablissement.

Selon des études similaires sur d'autres animaux, la latéralisation des membres proviendrait de leur utilisation pour rechercher ou manipuler de la nourriture. Pour les crapauds, Tomio Naitoh, de l'Université Shimane, au Japon, et Richard Wassersug, de l'Université Dalhousie, au Canada, proposent une explication anatomique plus spécifique.

Les crapauds possèdent un fort réflexe de vomissement : lorsqu'ils ingèrent une substance toxique, ils régurgitent le contenu de leur estomac et l'estomac lui-même. Ils peuvent alors enlever toute trace de la substance toxique de la paroi interne de l'estomac. L'estomac des crapauds est asymétrique : lorsqu'il est régurgité, il s'étale plutôt vers la droite. Une plus grande habileté du membre antérieur droit, le plus proche de la surface à nettoyer, serait un avantage certain pour la survie du crapaud. La latéralisation aurait-elle aussi des causes internes chez les vertébrés supérieurs ? □



Dans une cuve fermée de un mètre de diamètre, remplie d'eau salée, on injecte un liquide analogue, mais plus dense et plus chaud qui s'élève, entraîné par un panache thermique.

Maladie de Creutzfeldt-Jacob

Une nouvelle forme de la maladie est apparue en Grande-Bretagne.

Il est trop tôt pour commenter les décisions politiques d'abattage des vaches britanniques ; trop tôt pour savoir si elles étaient sages, et si le principe de précaution était à ce point justifié. Les scientifiques savent-ils si la consommation de viande bovine britannique présente un risque pour l'homme ? Non. La réponse est frustrante, mais les biologistes s'interrogent sur la nature précise de l'élément infectieux, sur la façon dont il pourrait passer de la vache à l'homme, franchissant ainsi la barrière qui généralement protège une espèce des micro-organismes infectieux d'une autre espèce.

La maladie de la vache folle et celle de Creutzfeldt-Jacob qui atteint l'homme sont des encéphalopathies spongiformes. Les vaches atteintes perdent toute coordination motrice. Chez l'homme, la maladie se déclenche généralement vers 60 ans, et se manifeste par des troubles moteurs, puis par une démence ; quelques cas sont d'origine génétique (un cas sur dix environ), mais la majorité sont des cas sporadiques (sans cause apparente).

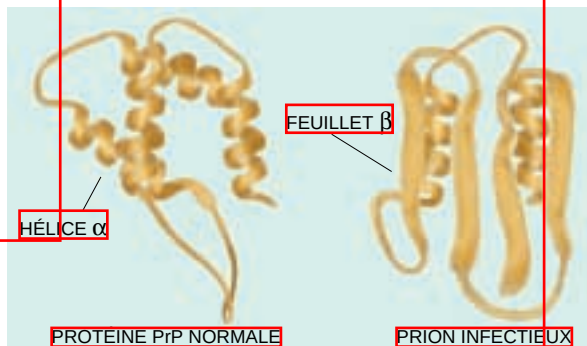
Il y a plusieurs années, certains patients ont été contaminés lors d'opérations neurochirurgicales par des instruments souillés, ou par l'administration d'hormone de croissance extraite d'hypophyse de patients contaminés (aujourd'hui, on dispose de l'hormone de croissance produite par génie génétique). En revanche, on ignore l'origine de la pathologie qui touche les quelques personnes mourant chaque année de la maladie de Creutzfeldt-Jacob (une quarantaine en France). Le cerveau des patients décédés présente des lésions typiques de la maladie : il est criblé de petits trous, ce qui lui donne l'aspect d'une éponge et justifie le nom d'encéphalopathie spongiforme.

Si quelques biologistes pensent que l'agent infectieux responsable des encéphalopathies spongiformes est un virus non identifié, la majorité accepte la thèse de Stanley Prusiner, de l'Université de San Francisco, pour qui il s'agit de particules protéiques

infectieuses, les PrP ou prions. Ces protéines sont naturellement synthétisées par les organismes, et l'on en connaît la séquence dans diverses espèces : elle est très similaire d'une espèce à l'autre. Cette similitude est souvent une caractéristique des protéines essentielles, et pourtant les souris qui en sont dépourvues sont quasiment normales : on ignore la fonction de cette protéine.

Selon l'hypothèse généralement admise, la conformation de la protéine serait modifiée dans les encéphalopathies spongiformes. La protéine normale est essentiellement constituée de tronçons en hélices (les hélices α) ; au contraire, dans les protéines anormales «infectieuses», on observe, outre les hélices α , une quantité notable de fragments en feuillets, dits β , structures quasiment absentes de la protéine normale. Ces structures ont été modélisées à partir des résultats fournis par deux méthodes d'analyse complexes.

Plusieurs expériences ont montré que seuls les animaux qui fabriquent la protéine normale sont susceptibles d'être infectés par des extraits de cerveau d'animaux atteints de la maladie (tous les abats – cerveau, reins, foie, etc. – sont infectieux). Diverses hypothèses ont été formulées pour expliquer le pouvoir pathogène des prions vis-à-vis des protéines PrP normales. Tel Midas qui transformait en or tout ce qu'il touchait, un prion modifierait la structure d'une



La modélisation de la protéine PrP normale indique qu'elle est essentiellement constituée d'hélices α , tandis que la protéine pathogène contient des tronçons en feuillets β ; le pouvoir pathogène serait lié à ce changement irréversible de structure.

protéine PrP normale, la rendant pathogène. Cette réaction en chaîne semble simpliste ; deux molécules identiques ne pouvant pas avoir deux états stables thermodynamiquement équivalents, la protéine normale doit subir une transformation irréversible analogue à une polymérisation en fibres. La protéine subirait une modification du même type que la protéine bêta-amyloïde qui s'accumule dans le cerveau des patients atteints de la maladie d'Alzheimer. Effectivement, la protéine PrP anormale, qui est résistante aux protéases (les enzymes qui normalement dégradent les protéines) s'accumule sous forme de plaques dans certains organes.

Selon Jean-Pierre Liautard, de l'Unité INSERM 431, à Montpellier, la protéine PrP aurait les propriétés des protéines chaperons, celles qui «surveillent» les protéines nouvellement synthétisées dans les cellules et leur font acquérir leur configuration biologiquement active. La protéine PrP serait un auto-chaperon et deviendrait pathogène lorsque la fonction de chaperon serait déficiente : elle permettrait à un excès de feuillets β de se former.

UN NOUVEAU VARIANT

Annick Alpérovitch, de l'unité INSERM 360, à l'Hôpital de la Salpêtrière, et ses collègues britanniques ont constaté une augmentation anormale du nombre de cas de patients jeunes décédés en 1994 et en 1995, en Grande-Bretagne. Normalement, les cas de patients de moins de 40 ans sont extrêmement rares (en France, entre 1968 et 1982, on a dénombré deux patients de moins de 30 ans). L'âge moyen des dix patients britanniques décédés récemment était de 29 ans, la durée de la maladie (entre six mois et deux ans) a été supérieure à celle de la maladie survenant chez des patients âgés. L'examen du cerveau a révélé de nombreuses plaques de protéines PrP accumulées, entourées de tissu spongiforme. La nature des lésions neuropathologiques

et la morphologie des dépôts de PrP semblent indiquer une augmentation des dépôts dans la matière grise. Le patient décédé récemment à Lyon était atteint d'une pathologie similaire à celle des Anglais. Selon les auteurs de l'article publié dans la revue *Lancet*, il s'agit peut-être d'une nouvelle forme de la maladie de Creutzfeldt-Jacob, mais tant qu'on n'aura pas montré que le prion infectieux de ces patients est d'origine bovine, on ne pourra affirmer que cette nouvelle forme est liée à l'épidémie britannique de maladie de la vache folle. □

Courir sur l'eau

Un lézard sur coussins d'air.

La foi est-elle indispensable pour marcher sur les eaux ? Pas pour le basilic (*Basiliscus basiliscus*), petit lézard Sud-américain : il court sur l'eau en s'appuyant sur des coussins d'air qui se forment sous ses pattes.

Jim Glasheen et Thomas McMahon, de l'Université Harvard, ont capturé des basilics au Costa Rica et les ont ramenés aux États-Unis, afin de filmer leur course à la surface d'un aquarium. Les images ainsi enregistrées ont permis l'analyse des mouvements effectués par les animaux pour se maintenir en surface.

Chaque pas se décompose en trois étapes. D'abord, la patte frappe l'eau. Ensuite, elle s'enfonce un peu sous la surface, en s'appuyant sur une poche d'air qu'elle maintient sous elle, comme un verre retourné que l'on plonge dans l'eau. Enfin, le lézard relève sa patte avant que la poche d'air ne disparaisse.

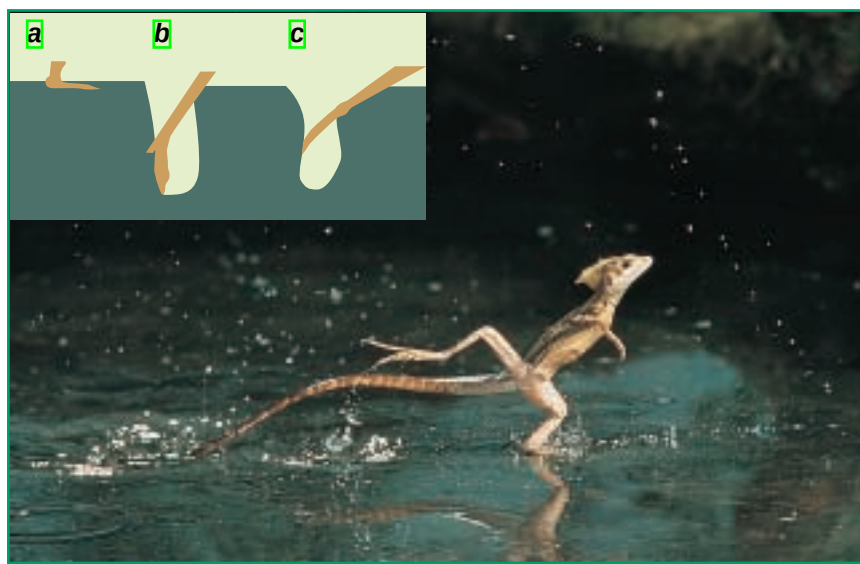
Au cours des deux premières étapes, des forces verticales dirigées vers le haut s'exercent sur la patte du lézard. Lorsque la patte frappe l'eau, elle est repoussée par une force réactive égale à celle qu'elle exerce. Lorsqu'elle s'enfonce, la poussée d'Archimède tend à la faire remon-

ter. La bulle d'air qui se forme autour d'elle et qui s'enfonce aussi dans l'eau augmente la masse d'eau déplacée : la poussée d'Archimède est plus grande que celle qui s'exercerait sur la patte seule. Enfin, le lézard relève sa patte avant qu'elle ne soit entièrement au contact de l'eau : les frottements visqueux sont ainsi réduits et l'animal n'a pas d'effort à fournir pour s'arracher à l'eau.

Les biologistes ont fabriqué, en aluminium, une réplique fidèle d'une patte de lézard. Ils en ont mesuré les caractéristiques hydrodynamiques en lui faisant frapper l'eau à différentes vitesses. Ils en ont déduit les valeurs des forces exercées par l'eau, à chaque étape du mouvement, qui dépendent surtout des vitesses auxquelles la patte du lézard frappe l'eau et s'y enfonce.

Les calculs montrent que le battement et l'enfoncement des pattes dans l'eau suffisent à compenser le poids du basilic, d'environ 90 grammes. En outre, pour les basilics de taille moyenne, qui font un pas tous les six dixièmes de seconde, c'est lors de l'enfoncement dans l'eau que la poussée vers le haut est la plus grande. De 77 à 87 pour cent de la quantité de mouvement nécessaire pour empêcher l'animal de couler sont fournis à ce moment.

En courant de la sorte, un homme pourrait-il se maintenir à la surface de l'eau par ses propres moyens ? Les pieds d'un athlète de 80 kilogrammes qui ferait une foulée en 0,26 seconde devraient s'enfoncer dans l'eau à plus de 100 kilomètres à l'heure. La puissance requise pour un tel exercice est 15 fois supérieure à celle d'un sprinter de haut niveau. La prière serait-elle plus efficace ?



Le basilic, un lézard Sud-américain, court à la surface de l'eau. Ses pas se décomposent en trois phases (en haut). La patte (en marron) frappe d'abord l'eau (a). Puis elle s'enfonce sous l'eau en s'appuyant sur une poche d'air (b). Enfin, la patte est relevée avant que la poche d'air ne disparaisse (c). L'animal est maintenu hors de l'eau principalement grâce aux forces de réaction qui s'exercent lors de la deuxième phase.

Dynamo céleste

L'interaction de particules émises par Io avec l'atmosphère jovienne produit une tache qui éclaire le fonctionnement du générateur électrique Io-Jupiter.

En 1979, l'exploration du Système solaire par la sonde *Voyager 1* révélait le volcanisme actif de Io, le satellite galiléen le plus proche de Jupiter. Avec la Terre, c'est le seul exemple d'une activité volcanique. Ce volcanisme est une source de particules chargées qui se déplacent le long des lignes de champ magnétique reliant Jupiter à son satellite, formant ainsi un circuit électrique. La détection récente d'une tache de lumière ultraviolette à la surface de Jupiter précise la nature du circuit électrique qui relie ces astres.

Une bulle magnétique isole de l'extérieur les planètes à champ magnétique. La protection n'est toutefois pas totale : des particules chargées du vent solaire peuvent s'engouffrer vers les pôles en suivant les lignes de champ magnétique. Lorsqu'elles arrivent dans l'atmosphère, ces particules excitent par collision les molécules atmosphériques, lesquelles, en se désexcitant, émettent un rayonnement visible et ultraviolet – les aurores polaires. L'atmosphère, localement chauffée par ces « précipitations », émet aussi un rayonnement infrarouge.

Chaque seconde, Io éjecte dans son atmosphère une tonne de gaz et de poussières. Située à 430 000 kilomètres de Jupiter, Io parcourt son orbite en 42 heures, tandis que Jupiter tourne sur elle-même en une dizaine d'heures, entraînant sa magnétosphère. Le champ magnétique jovien et les particules qu'il transporte balayent à plus de 50 kilomètres par seconde la matière éjectée par Io.

Le rayonnement solaire et les collisions ionisent le gaz émis par Io, dont une partie forme l'ionosphère et l'autre, entraînée par la rotation des lignes de champ magnétique de Jupiter (le long desquelles elles se meuvent), forme un tore de particules chargées (un plasma) qui s'étend à quelques rayons joviens le long de son orbite.

Si Io ne possédait pas d'ionosphère, elle serait neutre et les lignes de champ la traverseraient inchangées. Comme l'ionosphère de Io est conductrice, les lignes de champ ne peuvent y pénétrer et elles se déforment. Une tension magnétique apparaît de la même façon qu'un élastique qu'on essaierait de faire passer à travers une sphère dure se tendrait. Puis comme l'élastique qui, de plus

en plus tendu, glisserait d'un côté ou l'autre de la sphère, la ligne de champ glisse sur l'ionosphère de Io. La ligne de champ se détend et des oscillations, les ondes d'Alfvén, sont ainsi créées. Ces ondes se propagent le long des lignes de champ vers Jupiter à une vitesse qui dépend de la densité en particules du milieu traversé.

Les ondes d'Alfvén ont un champ électrique associé, parallèle aux lignes de champ magnétique. Durant leur trajet jusqu'à Jupiter, le champ électrique accélère les particules du tore de plasma créant un courant. Les particules énergétiques tombent alors sur Jupiter, produisant deux taches symétriques, à 65° de latitude Nord et Sud. La première observation de la tache Sud dans l'ultraviolet nous permet de connaître sa position précise, nécessaire à la détermination de paramètres physiques de la magnétosphère.

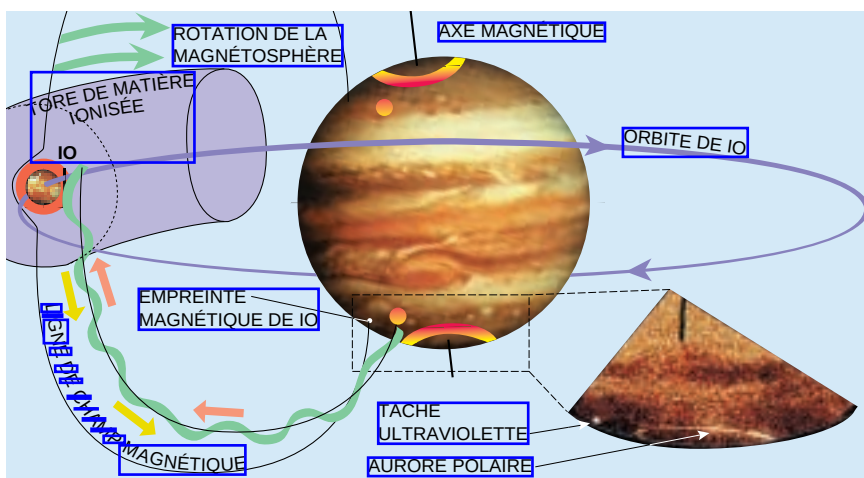
UN PUISSANT GÉNÉRATEUR DE COURANT

Les sondes *Voyager* ont mesuré l'intensité du courant circulant entre Io et Jupiter : un million d'ampères. Comme le mouvement de Io dans le champ magnétique de Jupiter engendre une différence de potentiel supérieure à 500 000 volts, la puissance électrique du générateur électrique Io-Jupiter est de 10^{12} watts (par hémisphère).

La puissance des précipitations de particules, mesurée par la luminosité de la tache ultraviolette, représente la moitié de la puissance totale et permet de déduire l'énergie des particules incidentes : entre 1 et 200 kiloélectronvolts pour les électrons et entre 25 et 500 kiloélectronvolts pour les protons. Pour atteindre ces énergies, les particules qui avaient initialement des énergies de quelques électronvolts ont été efficacement accélérées.

Comme la magnétosphère tourne beaucoup plus vite que Io, les ondes d'Alfvén se forment en avant de la position de Io sur son orbite. C'est pourquoi la tache ultraviolette est décalée par rapport à l'empreinte magnétique de Io. Alors qu'on pensait que cet écart était fixe, nous avons observé qu'il variait entre sept et douze degrés en longitude sur Jupiter. Cela signifie que les conditions de la formation des ondes d'Alfvén, de la propagation de ces ondes et de l'accélération des particules changent. Par exemple, cette variation pourrait s'expliquer par une modulation de la vitesse des ondes d'Alfvén dans le tore de Io, résultant d'une variation de la densité du tore.

Philippe ZARKA et Renée PRANGÉE, Observatoire de Meudon et IAS, Orsay



La magnétosphère de Jupiter tourne quatre fois plus vite que Io sur son orbite. Le volcanisme actif de Io éjecte du gaz qui, ionisé, forme une ionosphère conductrice (en rouge) et un tore de particules le long de son orbite. Les lignes de champ magnétique, qui ne peuvent pénétrer l'ionosphère, se tendent et la contournent. Leur détente produit alors des ondes d'Alfvén (en vert), qui se propagent jusqu'à Jupiter et accélèrent des particules. Ces dernières tombent sur l'atmosphère jovienne formant une tache visible dans l'ultraviolet décalée par rapport à l'empreinte magnétique de Io.

La fontaine d'atomes

L'horloge la plus précise au monde utilise une fontaine d'atomes de césium.

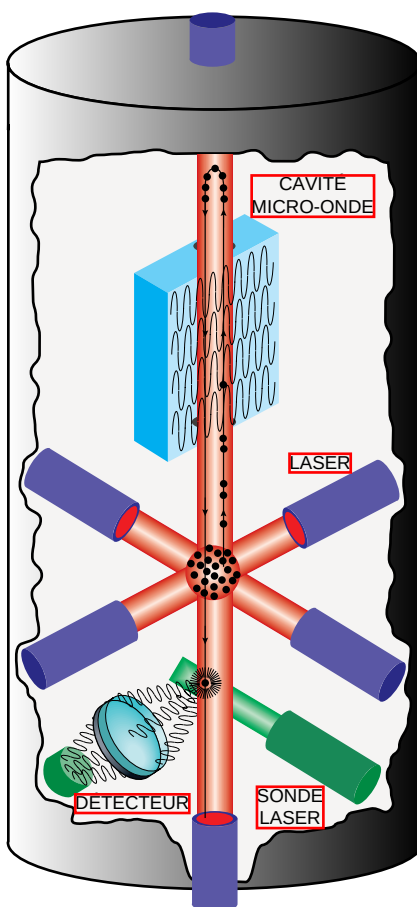
En 3 000 ans d'évolution, on est passé des horloges à eau, ou clepsydres, aux atomes : à l'Observatoire de Paris, André Clairon et ses collègues mesurent le temps en jetant en l'air des atomes de césium refroidis par laser. Leur horloge atomique est trois fois plus précise que les plus précises des horloges du moment : elle dérive de moins d'une seconde en dix millions d'années.

Le fonctionnement des horloges atomiques repose sur la quantification de l'énergie des atomes : un atome change d'énergie en absorbant ou en émettant un photon (ou grain de lumière) de fréquence particulière. L'étalon primaire de temps est fondé sur la fréquence de transition entre deux états d'énergies très proches de l'énergie minimale de l'atome de césium : par définition, la seconde est égale à 9 192 631 770 fois la période (l'inverse de la fréquence) de cette transition.

Dans les horloges atomiques classiques, on utilise un jet d'atomes de césium, à une température de 120 degrés, qui se déplacent à des vitesses de quelques centaines de mètres par seconde. Un aimant dévie les atomes qui sont dans le niveau d'énergie minimale et arrête les autres. Les atomes déviés passent ensuite dans une cavité où sont émises des micro-ondes de fréquence égale à la fréquence de la transition atomique que l'on veut provoquer : certains atomes absorbent un photon, puis sont déviés par un autre aimant et détectés. Un circuit asservit la fréquence des micro-ondes pour maximiser le nombre d'atomes qui changent d'état. On stabilise ainsi la fréquence appliquée dans la cavité micro-onde, qui est alors la fréquence naturelle de transition des atomes. Pour mesurer le temps, on utilise la fréquence des micro-ondes appliquées.

Si, en théorie, la fréquence d'une transition atomique est très stable, en pratique, les perturbations extérieures (champ magnétique, collisions entre atomes, etc.) et le mouvement des atomes décalent les fréquences de transition : la transition se produit pour toute une gamme de fréquence. Afin de stabiliser les horloges, on cherche donc à isoler et à ralentir les atomes.

Dans leur fontaine atomique, A. Clairon et ses collègues ont utilisé les récentes techniques de refroidissement par laser pour ralentir les atomes jusqu'à des vitesses de l'ordre du centimètre par seconde. Les atomes sont ensuite lancés dans la cavité, ce qui permet de diviser par 100 la gamme des fréquences de transitions par rapport aux horloges classiques.



Six lasers piègent et refroidissent des atomes de césium. Toutes les secondes, les faisceaux verticaux lancent un paquet d'atomes qui passe deux fois dans une cavité dans laquelle des micro-ondes portent des atomes à un niveau d'énergie supérieur. Le système de mesure (en vert) détecte le nombre d'atomes qui ont changé d'état en absorbant un photon micro-onde.

TOUJOURS PLUS PRÉCIS

Depuis 1985, on sait ralentir un jet d'atomes en l'éclairant par un laser dont les photons se propagent en sens inverse du jet : lorsque l'énergie d'un photon est égale à l'énergie requise pour faire changer un atome d'état d'énergie, ce photon peut être absorbé, ralentissant l'atome. Afin de compenser le décalage dû au mouvement des particules, on accorde le faisceau laser à une fréquence légèrement inférieure à celle de la transition utilisée, qui pour le césium est nommée D_2 . Située dans l'infrarouge, celle-ci permet l'emploi de lasers communs.

Dans la fontaine atomique, six lasers piègent et refroidissent les atomes à quelques millièmes de kelvin (presque le zéro absolu). Ces atomes sont ensuite lancés vers le haut, par paquets de un million ; puis, on interrompt les lasers verticaux, de sorte que les atomes soient soumis à la seule force de gravitation. Lors de son ascension et de sa descente, le paquet d'atomes traverse une cavité micro-onde accordée à la fréquence de transition atomique. Sous la cavité, on détecte le nombre d'atomes qui ont changé d'état, et un circuit de rétroaction, analogue à celui utilisé dans les horloges atomiques classiques, asservit la fréquence des micro-ondes émises.

Pour mesurer la stabilité de leur nouvelle fontaine, les physiciens ont comparé la fréquence obtenue à celle d'un maser (champ micro-onde auto-entretenu) à hydrogène, horloge atomique très stable à l'échelle de la journée. Après trois heures de comparaison, on a mesuré une stabilité relative de 3×10^{-15} . Afin de poursuivre leurs comparaisons plus longtemps, les physiciens construisent une seconde fontaine atomique. Ils espèrent ainsi mesurer une stabilité relative 50 fois supérieure à celle des horloges classiques.

Peut-on ralentir les atomes plus que cela n'a déjà été fait ? Oui, mais alors, ils tombent, entraînés par la gravité terrestre. Pour ralentir cette chute, on devrait se placer en microgravité, ce qui permettrait de multiplier la stabilité par dix. Les atomes se déplaceraient alors à quelques millimètres par seconde, ce qui correspond à une durée d'interaction dans la cavité de plusieurs secondes. Des atomes ont été récemment refroidis en microgravité, et une fontaine en cours de réalisation devrait voler à la fin 1996.

En outre, on améliorerait encore la stabilité en utilisant des fréquences de transition supérieures, telles qu'on en a trouvé pour l'atome d'argent. Des atomes d'argent refroidis par laser et placés en microgravité seront-ils les étalons temporels de demain ? ☐



POUR LA
SCIENCE

VOUS INVITENT
À L'ENREGISTREMENT
PUBLIC
DE L'ÉMISSION :
L'IMPOSSIBLE

**Les impossibles
de
la finance**

avec
Christian Walter,
actuaire au
Crédit lyonnais,
enseignant à l'ESSEC.

LE SAMEDI 11 mai 1996
À 15 HEURES
AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
SALLE DE CINÉMA
AVENUE FRANKLIN D. ROOSEVELT
75008 PARIS

π , e^π et $\Gamma(1/4)$

Démonstration d'une conjecture centenaire.

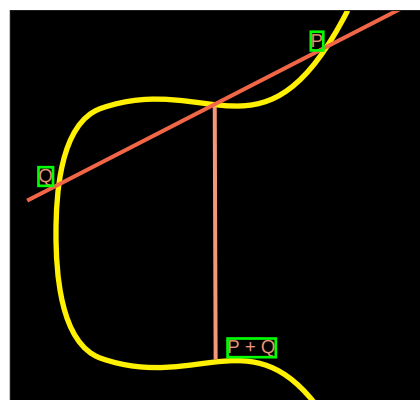
La démonstration du théorème de Fermat, par Andrew Wiles, avait mis en vedette les courbes elliptiques, composées de points dont les coordonnées x et y vérifient des équations de la forme $y^2 = 4x^3 - g_2x - g_3$. Aujourd'hui des mathématiciens français et russe obtiennent de nouveaux résultats liés à ces courbes et à l'«invariant modulaire» qui leur est associé.

Qu'est-ce que l'invariant modulaire ? Tout commence par le paramétrage des courbes elliptiques : on sait qu'on peut aussi les définir par un seul paramètre, un nombre complexe z (un nombre que l'on associe à un point d'un plan, au lieu de l'associer à un point d'une droite) et par une fonction p dite de Weierstrass. L'abscisse x de tout point de la courbe s'écrit sous la forme $p(z)$, tandis que l'ordonnée correspondante s'écrit sous la forme $p'(z)$, où p' est la fonction dérivée de p .

Ce paramétrage étant fait, les mathématiciens ont défini une sorte d'addition des points de la courbe, en associant un point noté $P + Q$ à deux points P et Q de la courbe : si le point P a pour coordonnées $(p(z), p'(z))$ et si le point Q a pour coordonnées $(p(t), p'(t))$, alors le point $P + Q$ a pour coordonnées $(p(z+t), p'(z+t))$. Géométriquement, le point $P + Q$ s'obtient en traçant la droite qui passe par les points P et Q ; cette droite coupe la courbe elliptique en un troisième point, dont le symétrique par rapport à l'axe des abscisses est la somme $P + Q$.

Peut-on classer les diverses courbes elliptiques ? Les mathématiciens utilisent à cette fin la fonction p et ses périodes. Une fonction d'une variable réelle, comme le sinus, a une période unique, égale en l'occurrence à 2π ; mais les fonctions p sont des fonctions de la variable complexe, et elles ont deux périodes de base. Le nombre $J(q)$ nommé invariant modulaire est défini à partir de leurs périodes ; il indique les ressemblances entre les courbes elliptiques : deux courbes ayant le même invariant modulaire ont des comportements identiques pour la loi d'addition de leurs points.

En 1969, Kurt Mahler, de l'Université de Canberra, avait conjecturé que l'invariant modulaire $J(q)$ est transcendant quand q est algébrique. Un nombre est transcendant s'il n'est pas algébrique, c'est-à-dire s'il n'est racine d'aucune



On définit une addition de points appartenant aux courbes elliptiques. Pour classer de telles courbes selon la façon dont leurs points s'additionnent, on utilise une fonction nommée invariant modulaire.

équation polynomiale à coefficients entiers. S'il n'est pas besoin d'être grand mathématicien pour vérifier que $\sqrt{2}$ est algébrique (puisque'il est racine de l'équation $x^2 = 2$), la démonstration de la transcendance d'un nombre est souvent très difficile : il a fallu attendre 1882 pour savoir que le nombre π est transcendant. La conjecture de Mahler a intéressé de nombreux théoriciens des nombres : en démontrant cette conjecture, on obtient la transcendance d'une famille infinie de nombres.

Avec Katia Barré-Sirieux, Guy Diaz et Georges Philibert, nous avons démontré la conjecture de K. Mahler en février 1995. Notre résultat a fait quelque bruit dans la communauté mathématique, parce qu'il résolvait un problème ancien, mais il a surtout ouvert une voie nouvelle pour l'étude de questions difficiles, et il est à l'origine de résultats spectaculaires : Yuri Nesterenko, de l'Université de Moscou, talonné par Patrice Philippon, de l'Université Paris VI, ont démontré l'indépendance algébrique des nombres π , e^π et $\Gamma(1/4)$, où la fonction Γ d'Euler prolonge la fonction factorielle aux nombres fractionnaires. Cela signifie que, si P est un polynôme de trois variables à coefficients entiers non tous nuls, le nombre $P(\pi, e^\pi, \Gamma(1/4))$ n'est pas nul. L'indépendance algébrique de π et e^π qui découle du travail de Y. Nesterenko et P. Philippon est un résultat dont les mathématiciens rêvaient depuis près d'une centaine d'années !

François GRAMAIN
Université de Saint-Étienne

La végétation par satellite

On étudie les échanges de carbone de la biosphère continentale en suivant les variations de couverture végétale du Globe.

Depuis 1750 environ, l'humanité rejette une quantité croissante de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère. Une partie du gaz libéré est fixée par les océans ou par les plantes et les sols, mais le reste s'accumule dans l'atmosphère, augmentant l'effet de serre et contribuant au réchauffement de la planète. Cette accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère sera-t-elle ralentie ou amplifiée par la végétation dans les prochaines décennies ? Pour étudier cette question, notre équipe s'est associée à celle de Gérard Dedieu, du Centre d'études spatiales de la biosphère, à Toulouse : ensemble, nous avons utilisé des capteurs embarqués à bord de satellites pour déterminer la production de matière organique par l'ensemble de la végétation mondiale, puis les échanges de dioxyde de carbone entre la végétation et l'atmosphère.

Les plantes fabriquent de la matière organique par photosynthèse en fixant le dioxyde de carbone de l'atmosphère, grâce à l'énergie solaire. Une partie de la biomasse formée est consommée par les herbivores, qui nourrissent eux-

mêmes des carnivores. Puis, lorsque les plantes et les animaux meurent, leur matière organique est décomposée en éléments minéraux assimilables par les plantes. Pendant la saison de croissance, la photosynthèse l'emporte sur la respiration des végétaux et des animaux, et les écosystèmes accumulent du carbone, qu'ils extraient de l'atmosphère. C'est l'inverse pendant la mauvaise saison.

Sur les continents, la photosynthèse n'a lieu que si des feuilles vertes absorbent le rayonnement solaire. Nous avons eu recours aux observations par satellite pour distinguer les feuilles vertes du sol nu : les feuilles, en effet, réfléchissent très peu le rouge (absorbé par la chlorophylle) et beaucoup le proche infrarouge (à cause des interfaces air-eau dans les feuilles) ; en revanche, les sols et les roches réfléchissent à peine plus le proche infrarouge que le rouge. On a donc construit des indices de végétation permettant, à partir de mesures par satellites, de calculer la fraction de sol occupée par de la végétation, puis le rayonnement solaire absorbé par cette dernière.

Le problème est un peu compliqué par l'atmosphère : d'une part, on doit

éliminer les zones couvertes de nuages, ce qui est un phénomène fréquent en zone équatoriale ; d'autre part, le contenu de l'air en vapeur d'eau et en aérosols modifie le spectre du rayonnement reçu par le satellite et impose des corrections atmosphériques.

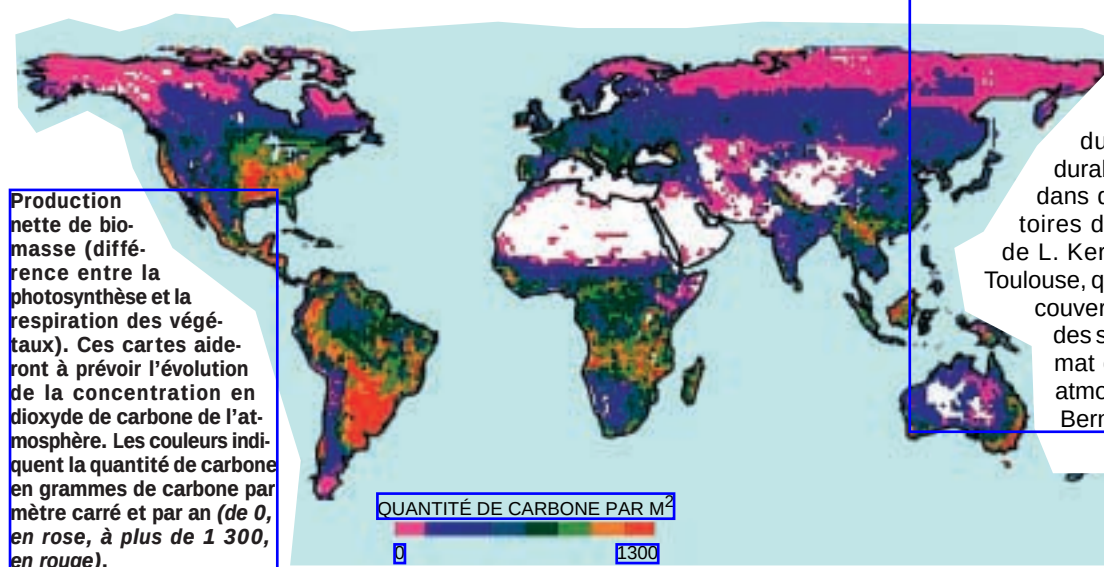
Malgré ces difficultés, nous avons établi des cartes mensuelles du rayonnement solaire absorbé par la végétation, avec une résolution spatiale de un degré de latitude et de longitude. Nous avons ensuite calculé la photosynthèse qui, en première approximation, est égale au produit du rayonnement absorbé par une efficacité de conversion biologique. Cette efficacité a été prise identique pour tous les types de végétation sur la base de données expérimentales. Nous avons ensuite calculé la respiration des plantes, qui dépend de la température et de la quantité de biomasse qui respire, et nous avons finalement obtenu la production de biomasse sur l'ensemble des continents (voir la figure).

EVOLUTION DE LA PRODUCTION

Revenons à la question initiale : comment évolue cette production végétale ? Chez la plupart des plantes, une augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone accroît la photosynthèse et la production de biomasse. On s'attend donc à ce que la végétation modère l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère en stockant un excédent de carbone dans la biomasse et dans la matière organique des sols ; toutefois l'effet observé fluctue beaucoup selon la température annuelle moyenne, la pluviométrie, etc. Notre suivi, année par année, du couvert végétal est en cours de corrélation avec les mesures globales de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone. Il restera à préciser si l'accroissement de production végétale est durable, ce qui est étudié dans de nombreux laboratoires dont le nôtre et celui de L. Kergoat, au CESBIO de Toulouse, qui simulent l'état de la couverture végétale à partir des seules données du climat et de la composition atmosphérique.

Bernard SAUGIER

et Anne RUIMY
Laboratoire
d'écophysiologie
végétale, (URA
1492) Orsay



Production nette de biomasse (différence entre la photosynthèse et la respiration des végétaux). Ces cartes aideront à prévoir l'évolution de la concentration en dioxyde de carbone de l'atmosphère. Les couleurs indiquent la quantité de carbone en grammes de carbone par mètre carré et par an (de 0, en rose, à plus de 1 300, en rouge).

La vidéo-chirurgie

FRANÇOIS DUBOIS

Aujourd'hui, les chirurgiens introduisent par de petites incisions les instruments miniaturisés grâce auxquels ils pratiquent les opérations qui nécessitaient de larges ouvertures, douloureuses et difficiles à cicatriser.

Endormir, pénétrer dans l'organisme humain, traiter et réveiller : ces différentes étapes d'une opération chirurgicale ont été rendues moins traumatisantes au cours des 20 dernières années. Les améliorations réalisées en anesthésie et en réanimation ont permis de nouvelles interventions ; simultanément, la chirurgie vidéo-endoscopique parfois qualifiée, aux États-Unis, de « seconde révolution française » a bouleversé la pratique chirurgicale des 15 dernières années. Cette technique est née de la volonté des chirurgiens de limiter les conséquences physiologiques de l'agression, de minimiser les risques liés à une large incision des tissus et d'accélérer la cicatrisation. La chirurgie vidéo-endoscopique est une chirurgie très peu invasive.

Lors d'une intervention classique, dite ouverte, le chirurgien atteint, par une large incision, l'organe cible qu'il observe directement, touche, coupe ou suture, avant de refermer la plaie. Lors d'une intervention vidéo-endoscopique, le chirurgien n'observe pas directement l'organe, mais seulement une image transmise par un dispositif optique sur un écran de télévision ; il ne tient pas directement les ciseaux qui découpent ou les pinces qui arrêtent la circulation sanguine, et qui sont sous la paroi, mais il commande ces instruments par des poignées à l'extérieur.

Cette méthode, dont nous allons examiner le principe, les applications, les avantages – et aussi les inconvénients – a suscité une nouvelle querelle des Anciens et des Modernes. Les pionniers de la chirurgie vidéo-endoscopique se sont heurtés à la résistance de leurs pairs ; au début, on refusa de publier leurs résultats dans les revues scientifiques internationales.

Ils ont dû travailler dans la réprobation officielle et ont subi de nombreux sarcasmes : on les traitait de charlatans ou de chirurgiens philippins aux mains nues ! Puis, en 1990, les Américains se sont intéressés à la méthode et, sous la pression des futurs opérés, la chirurgie vidéo-endoscopique s'est répandue : la méthode est aujourd'hui reconnue et enseignée dans les facultés.

Cinq petites ouvertures

La chirurgie vidéo-endoscopique est issue de la laparoscopie, une méthode qui permettait d'observer l'intérieur de la cavité abdominale. En 1902, un médecin allemand, G. Kelling, a, le premier, introduit un cystoscope dans la cavité péritonéale (ou abdominale) d'un chien ; l'instrument utilisé était un trocart (un tube évidé) de quelques millimètres de diamètre, équipé d'une petite lampe à l'extrémité, introduite dans l'abdomen, et d'un oculaire, à l'autre extrémité, par laquelle le médecin observait.

Ce dernier avait d'abord injecté de l'air dans la cavité péritonéale afin de décoller les membranes du péritoine qui normalement adhèrent à l'intestin et qui en interdiraient l'observation. Quelques années plus tard, en 1910, le Suédois H.C. Jacobaeus semble avoir été le premier à explorer par ce procédé les cavités pulmonaires et abdominales de l'homme. Toutefois ces méthodes, d'abord strictement réservées à l'observation de l'intérieur du corps humain, restèrent confidentielles jusque dans les années 1950 ; elles se développèrent alors comme aide au diagnostic, en gynécologie et en pathologie digestive ou pulmonaire.

Bientôt quelques gestes chirurgicaux complétèrent la stricte observa-

tion : par le trocart introduit dans la cavité abdominale ou thoracique, on observait les organes, et l'on commençait à sectionner des brides (des tissus fibreux anormaux) de la plèvre, à prélever des biopsies de tissus, ou encore à ponctionner des organes pour retirer des kystes, par exemple.

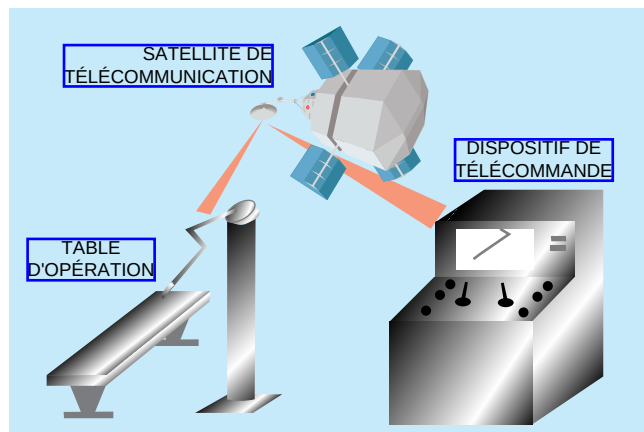
Au cours des années 1960, le système optique fut amélioré : on remplaça la petite lampe, à l'extrémité du trocart, par une source de lumière éloignée, transmise à l'extrémité de l'endoscope par des fibres optiques ; les tissus étaient mieux éclairés et n'étaient plus chauffés par la lampe. Dans les années 1970, les gynécologues Kurt Semm, à Kiel, Maurice Antoine Bruhat, de Clermont-Ferrand, et Hubert Manhès, de Vichy, ont fait les premiers gestes chirurgicaux sur des femmes : ils ont opéré sur des ovaires et sur des trompes de Fallope (qui relient les ovaires à l'utérus). Quelques opérations de chirurgie digestive ont été pratiquées au début des années 1980, mais elles restaient encore confidentielles.

En 1987, Philippe Mouret, à Lyon, fort de son expérience laparoscopique, réalise la première ablation coelioscopique de la vésicule biliaire, ou cholécystectomie. Dès les premières interventions, les chirurgiens ont eu besoin de toute une gamme d'instruments de petites dimensions, que l'on peut introduire dans l'abdomen par les trocars. Les gestes opératoires – écarter les tissus, couper, recoudre, faire coaguler, arrêter la circulation, les mêmes qu'en chirurgie ouverte – nécessitent des instruments miniaturisés : pinces, ciseaux, porte-aiguilles, etc. Grâce à cette panoplie, on réalise progressivement par chirurgie endoscopique les mêmes opérations que par chirurgie classique.

En quoi consiste cette méthode? Le chirurgien pratique quatre ou cinq petites incisions (nommées points de ponction) pour introduire dans l'abdomen du patient anesthésié des trocarts de cinq à dix millimètres de diamètre. L'un d'eux contient une fibre optique, reliée à la source lumineuse,

dont la lumière éclaire l'organe à opérer. Lors des premières opérations, le chirurgien observait l'organe éclairé par l'intermédiaire d'un télescope contenu dans le trocart. Il avait l'œil rivé sur l'oculaire du télescope, qu'il tenait d'une main, et il opérait de l'autre main. Aujourd'hui, le télescope est relié

à une microcaméra qui filme l'organe; l'image transmise est projetée sur un écran de télévision, de sorte que le chirurgien dispose de ses deux mains pour opérer, comme en chirurgie classique. Généralement, l'optique utilisée permet une observation dans l'axe du télescope, sur un champ aussi large que



1. LORS D'UNE OPERATION PAR VIDEO-CHIRURGIE, Une microcaméra est introduite dans l'abdomen du patient et filme l'organe à opérer; l'image du «champ opératoire interne» est observée sur un écran de télévision (*en haut à gauche*). Le chirurgien commande les instruments introduits dans l'abdomen par des poignées. On peut penser que, dans quelques années, le chirurgien ne tiendra plus les poignées des instruments, mais les contrôlera d'une console où écran d'observation et commandes seront rassemblées (*figure du bas*). Comme le chirurgien ne touche plus le patient, sauf pour introduire les trocarts et créer le champ opératoire interne, les opérations

très difficiles, exigeant des spécialistes qui sont parfois éloignés, pourraient faire appel aux moyens de télécommunication les plus élaborés: l'image de l'organe opéré, prise par la caméra, serait émise jusqu'à un satellite relais qui la retransmettrait sur le dispositif télévisuel de l'opérateur (*en haut à droite*). Observant son écran, le chirurgien «opérerait», et ses ordres seraient également transmis par l'intermédiaire du satellite: que le chirurgien soit à un mètre du patient ou à des milliers de kilomètres ne fait guère de différence. Du moins en théorie, car, en pratique, le chirurgien doit être présent pour recourir rapidement à la chirurgie ouverte, si nécessaire.

possible ; pour accéder à certaines zones, on utilise des télescopes qui, grâce à un jeu de miroirs, autorisent une vision latérale à 45, voire à 90 degrés ; des endoscopes flexibles facilitent l'exploration de tous les recoins.

Opérer un écran de télévision

Le télescope permet une exploration large de la cavité et l'observation des autres instruments. Outre ce trocart réservé à l'éclairage de la cible et à son observation, les autres contiennent les instruments : l'un contient les microciseaux, un autre les pinces qui saisissent les organes, un autre un écarteur qui repousse les tissus environnants pour libérer la zone d'intervention. La caméra filme l'organe et les instruments, de sorte que le chirurgien n'observe pas le champ opératoire directement, mais sur l'écran de télévision. Il actionne les instruments par l'intermédiaire de poignées, situées à l'extrémité des différents trocarts. Ses instruments sont ceux de la chirurgie classique : des ciseaux, des pinces, des porte-aiguilles, des écarteurs, des aspirateurs, tous adaptés à la chirurgie endoscopique, c'est-à-dire miniaturisés, allongés, orientables.

Reste une difficulté que nous n'avons pas encore évoquée : l'accès

à l'organe et sa visualisation. En chirurgie classique, le chirurgien ouvre la paroi et crée ainsi un champ opératoire, à l'air libre. En chirurgie vidéo-endoscopique, ce champ opératoire est formé par une « bulle d'air » créée en injectant du gaz dans l'espace qui sépare les deux feuillets du péritoine (les deux membranes qui recouvrent l'intestin), ou de la plèvre (les deux membranes qui recouvrent les poumons). On crée ainsi un pneumopéritoine ou un pneumothorax, dômes artificiels où les instruments évoluent librement.

Pour injecter le gaz, on utilise une aiguille dite de Veress, munie d'un dispositif de protection qui évite de blesser les organes une fois la membrane du péritoine traversée (l'aiguille se recouvre automatiquement d'un capuchon qui protège l'embout). Le gaz injecté doit être inerte et non toxique. De surcroît, il doit être soluble dans le sang afin de diminuer le risque d'embolie gazeuse : si le gaz n'était pas soluble, les bulles véhiculées par le sang risqueraient d'obstruer certains vaisseaux sanguins pulmonaires ou cérébraux. On utilise généralement du dioxyde de carbone.

En raison de certains inconvénients liés à l'usage de ce gaz et que nous évoquerons, les chirurgiens tentent de mettre au point des suspenseurs, des

sortes d'anneaux rigides qui décollent la paroi de l'organe. Toutefois, ces suspenseurs, malgré leurs avantages théoriques, sont encore imparfaits, et l'on soulève moins bien la paroi qu'avec un gaz sous pression.

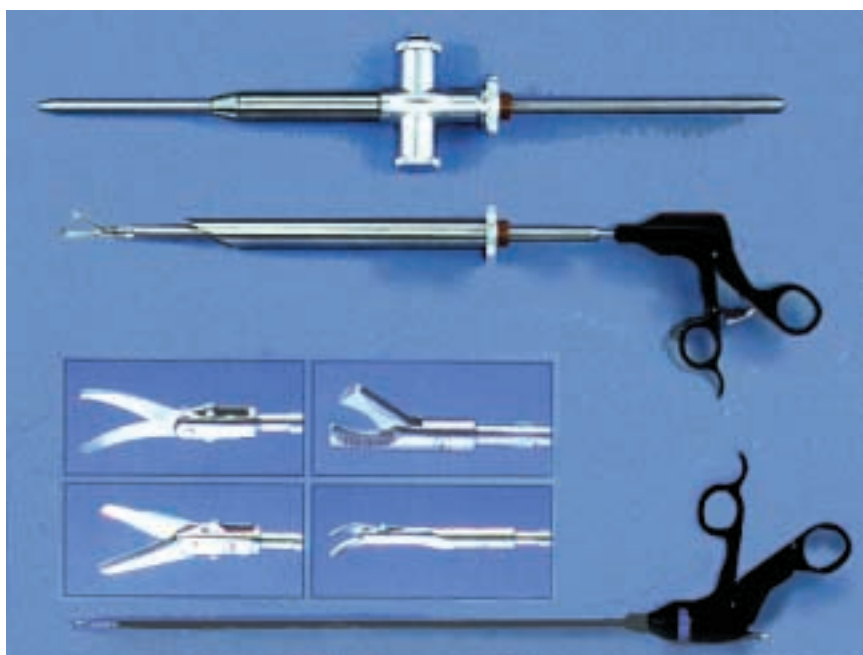
Au contraire, lors d'une intervention thoracique, l'usage de ce gaz n'est pas nécessaire : le poumon s'affaisse spontanément lorsque de l'air pénètre dans la cavité pleurale (entre les deux membranes de la plèvre qui recouvre le poumon). Normalement, le poumon adhère à la plèvre ; lorsque l'on inspire, la plèvre, entraînée par les côtes, se soulève, et les poumons, en dépression, s'emplissent d'air. Lorsque de l'air pénètre dans la plèvre, l'entraînement mécanique normalement exercé par les côtes cesse, et les poumons ne se remplissent plus. L'espace entre le poumon affaissé et les côtes permet au chirurgien d'opérer par vidéo-endoscopie.

Les domaines d'application

Pendant deux à trois ans, la vidéo-chirurgie endoscopique a été quasi réservée aux interventions sur la vésicule biliaire. Puis, dès 1989, elle a étendu son domaine à d'autres interventions digestives. En 1990, la chirurgie vidéo-endoscopique s'est répandue comme un raz de marée parmi les chirurgiens du monde entier et, aujourd'hui, elle s'applique à presque toutes les interventions sur l'appareil digestif, les poumons et la plèvre, à la chirurgie orthopédique, à la neurochirurgie, à la chirurgie du nez, de la gorge et des oreilles, à celle de l'appareil urinaire et même à la chirurgie plastique. Nous nous limiterons aux applications en chirurgie digestive, gynécologique et pulmonaire.

Dans ces domaines, pratiquement toutes les interventions peuvent être réalisées sous vidéo-endoscopie, mais il faut distinguer les opérations qui sont désormais du domaine quasi exclusif de la chirurgie vidéo-endoscopique et celles qui restent du domaine de l'exploit. On pratique couramment par chirurgie vidéo-endoscopique la chirurgie des trompes et des ovaires (quand il ne s'agit pas de cancer), l'ablation de la vésicule biliaire, l'appendicectomie, la cure des hernies de l'aine et, en chirurgie thoracique, la résection de bulles d'emphysème ou encore les pleurectomies (ablation de la plèvre).

En revanche, un chirurgien doit déjà avoir une bonne expérience de la chi-



2. LA PANOPLIE DES INSTRUMENTS utilisés en vidéo-chirurgie ressemble à celle de la chirurgie classique, mais tous les instruments sont miniaturisés. Des trocarts (*en haut et au milieu*) sont des tubes métalliques creux, où l'on introduit soit la source lumineuse qui éclaire le « champ opératoire interne », soit les instruments, tels des pinces ou des ciseaux (*en bas*), avec lesquels le chirurgien opère. Ces instruments mesurent entre 40 et 50 centimètres de long.

chirurgie vidéo-endoscopique pour réaliser par cette voie une hystérectomie (ablation de l'utérus), le traitement des hernies hiatales (ascension de l'estomac dans le thorax, avec remontée d'acide), une splénectomie (ablation de la rate), ou toute intervention en chirurgie pédiatrique.

Enfin, seuls des centres très spécialisés pratiquent des exérèses pancréatiques (ablation du pancréas), des gastrectomies (ablation de l'estomac), des résections pulmonaires (ablation partielle d'un lobe pulmonaire) et certaines interventions cardio-vasculaires. L'équipe d'Alain Carpentier, à l'hôpital Broussais, a pratiqué, pour la première fois, le 26 février 1996, une intervention à cœur ouvert sur une patiente atteinte de graves lésions de la valve située entre l'oreillette et le ventricule gauche.

La salle d'opération

Une opération par chirurgie vidéo-endoscopique met en œuvre une grande quantité d'appareils dans une salle d'opération déjà très encombrée par la table d'opération, les projecteurs, le générateur de bistouri électrique, les appareils d'anesthésie, de radiologie et d'échographie : ainsi la chirurgie vidéo-endoscopique nécessite-t-elle des salles d'opération de grandes dimensions, car on doit aussi pouvoir recourir, à tout instant, et parfois de façon urgente, à la chirurgie classique (quand une complication imprévue survient, le chirurgien recourt aux méthodes classiques et ouvre l'abdomen).

Les instruments spécifiques de la vidéo-chirurgie sont l'insufflateur de gaz qui injecte le gaz carbonique à un débit et à une pression déterminés et qui contrôle automatiquement ces paramètres durant toute l'intervention ; un dispositif qui injecte du sérum sous pression pour nettoyer la cavité après l'intervention ; une source de lumière puissante et d'intensité modulable ; une caméra et son moniteur, qui transmet l'image sur un écran, et un magnétoscope, qui enregistre les images. L'instrumentation comprend les éléments nécessaires pour créer et maintenir le pneumopéritoine, et les instruments pour réaliser le geste chirurgical lui-même.

En chirurgie, on utilise des instruments qui sont nettoyés et stérilisés après chaque intervention et qui ont une durée de vie très longue,



3. VUE FACTICE D'UN «CHAMP OPÉRATOIRE INTERNE» : cette illustration représente l'organe sur lequel le chirurgien intervient (l'estomac) et les instruments qu'il utilise. La source lumineuse est transmise par le trocart situé au milieu au premier plan. Les autres instruments soulèvent les tissus ou les incisent. Cette vue correspond à celle que transmet une microcaméra, introduite dans l'abdomen pour filmer l'opération.

parfois supérieure à celle du chirurgien lui-même. Du fait de leur complexité et de leur fragilité, les instruments endoscopiques sont difficiles à nettoyer, à stériliser et à entretenir. À cela s'ajoute la crainte de transmission de virus, tels le VIH ou celui de l'hépatite C, de sorte que le matériel à usage unique tend à se développer : ce matériel ne sert qu'à une seule opération, est produit en grande série, livré stérilisé, prêt à l'emploi, puis jeté après usage, ce qui épargne beaucoup d'heures de main-d'œuvre. Certains instruments sont livrés en «kits» à usage unique adaptés à tel ou tel type d'opération.

Des générateurs d'ultrasons miniaturisés peuvent être introduits par les trocarts et servir soit au diagnostic, soit au traitement : ils permettent de réaliser des échographies *in situ*, ou de pulvériser des calculs biliaires ou urinaires avec précision, puisque la source destructrice est amenée au contact du calcul à fragmenter. Le laser découpe, vaporise et coagule. Le plus utilisé en gynécologie est le laser à CO₂, qui assure bien les coagulations de surface, mais il n'est pas transporté par les fibres optiques. On peut également utiliser un laser pulsé pour fragmenter les calculs et faciliter leur extraction. Toutefois, en raison de son coût, et parce que d'autres techniques sont aussi performantes, le laser tend à être abandonné pour la chirurgie digestive.

Une chirurgie peu agressive

Les techniques mini-invasives, et surtout la chirurgie vidéo-endoscopique, se sont notablement développées au cours des dernières années, car leurs avantages sont multiples.

Le traumatisme lié à l'acte opératoire est réduit par rapport à une opération par chirurgie ouverte ; la plaie opératoire est minime, et une ouverture de dix centimètres, par exemple, est plus douloureuse et plus longue à cicatrifier que cinq incisions de deux centimètres. La douleur liée aux petites cicatrices est faible et gêne peu le mouvement et la respiration ; on évite le risque de rupture de la suture, source d'éventration ; le traumatisme viscéral, péritonéal ou pleural est réduit : les viscères restent dans leur milieu naturel, ne sont ni refroidis, ni desséchés, ni irrités par le contact des compresses ; ils sont manipulés au minimum. De ce fait, les contractions de l'intestin sont peu perturbées et le transit reprend rapidement.

L'opéré ressent peu de douleurs de paroi, peu de ballonnements post-opératoires, peu de gêne respiratoire, de sorte qu'il peut se lever et s'alimenter rapidement après le réveil, ce qui évite les complications liées à l'alitement : une mauvaise circulation sanguine dans les membres inférieurs avec risque de phlébite (obstruction des veines),

les risques d'infection pulmonaire ou urinaire, qui grèvent la chirurgie classique, surtout chez les sujets «à risques», telles les personnes âgées, handicapées, cardiaques ou obèses.

La période de diète préopératoire est réduite et les habitudes alimentaires des opérés changent peu. L'incapacité engendrée par l'acte opératoire est réduite ; les durées d'hospitalisation et d'arrêt de travail diminuent, avantage essentiel de la méthode, pour l'opéré et pour la société.

Au cours de l'opération, l'observation et l'exploration sont de bonne qualité, car le dispositif optique utilisé grossit les tissus observés entre cinq et quinze fois et révèle des détails que l'œil nu ne percevrait pas. De surcroît, le télescope étant orientable dans toutes les directions, il transmet l'image des moindres recoins, et le chirurgien qui voit la totalité de la cavité péritonéale, peut l'explorer aussi bien, voire mieux, que par une ouverture classique, même très large.

En outre, en raison de la discrétion des incisions, on minimise les risques de contamination par l'air : en chirurgie ouverte, la plaie risque d'être infectée par des micro-organismes véhiculés par l'air ou par le contenu des viscères. Le préjudice esthétique est minime : les points d'incision laissent peu de traces et sont dissimulés dans des replis de la peau. Enfin, cette méthode réduit les risques d'adhérences postopératoires : après une intervention, une cicatrice interne

crée un tissu fibreux qui empêche les tissus de glisser librement dans la cavité abdominale : l'intestin, par exemple, risque de s'enrouler autour de telles brides de tissu fibreux, provoquant une occlusion intestinale. Comme le traumatisme est moindre lors d'une opération par vidéo-endoscopie, ce tissu fibreux est moins abondant et les risques d'adhérence sont réduits.

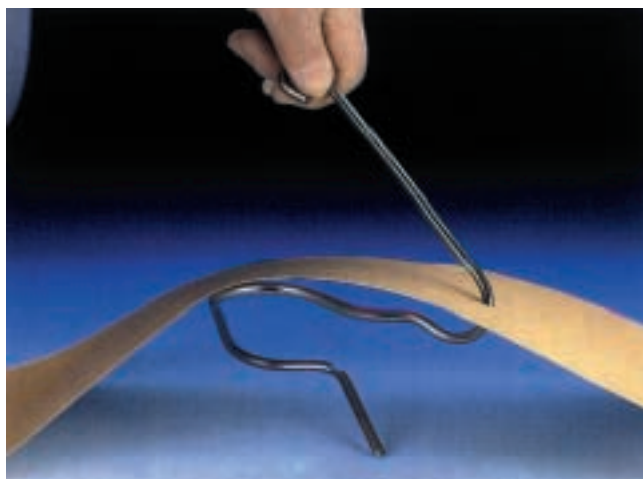
Les inconvénients

Toutefois, la méthode n'est pas totalement dénuée d'inconvénients potentiels. Pour le chirurgien, il s'agit d'une chirurgie fatigante, qui nécessite une attention de tous les instants. Au-delà de quelques heures, quatre environ (ce qui n'est pas très fréquent), l'opérateur devrait être remplacé : tels des copilotes, des «cochirurgiens» devraient opérer ensemble. De plus, le chirurgien n'observe pas les organes en relief, en trois dimensions, mais sur un écran en deux dimensions ; il doit reconstruire mentalement le relief, ce qui exige un certain entraînement. Il ne peut plus s'aider du sens du toucher, qui le renseigne en chirurgie ouverte, et l'absence de palpation manuelle est mal palliée par les instruments. Ainsi, un chirurgien habitué aux méthodes classiques doit se «recycler», contrainte souvent longue, pénible et onéreuse.

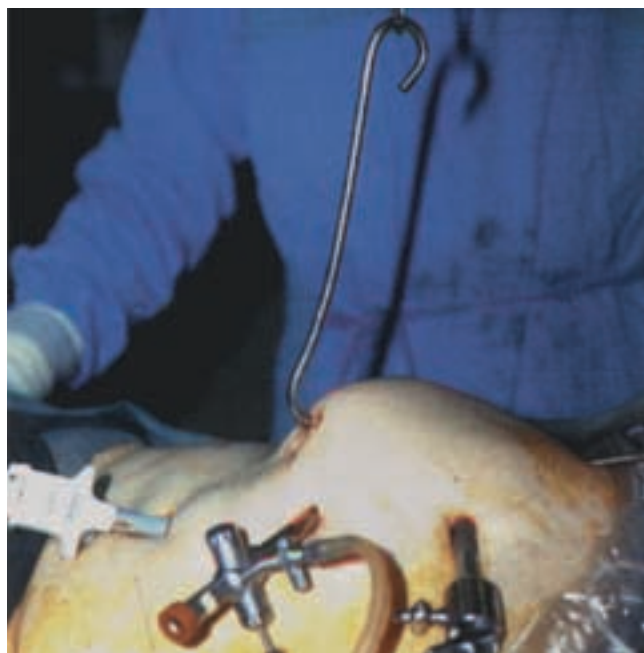
Pour le malade, l'intervention n'est pas dénuée de quelques risques, tels que des blessures d'organes ou de vais-

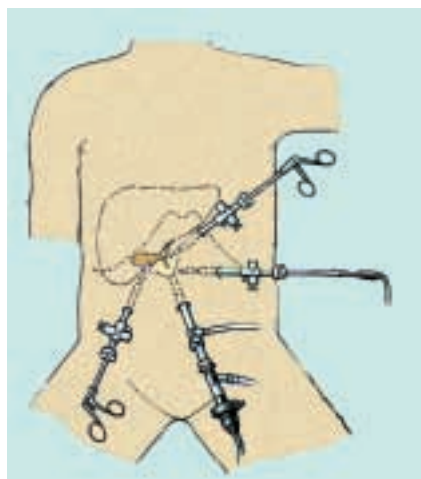
seaux lors de l'introduction des trocarts, mais ces accidents sont rares. De plus, l'utilisation de dioxyde de carbone sous pression – même si la pression est modérée et contrôlée en permanence – risque d'entraîner une augmentation de la concentration sanguine en dioxyde de carbone, laquelle se traduit par une augmentation de l'acidité du sang ; lors des interventions longues, et chez les sujets fragiles, cette hyperacidité sanguine peut déclencher des épisodes de tachycardie. Enfin, si le gaz dissous est brusquement libéré, le risque d'embolie gazeuse, minime, existe.

En plus des complications qui peuvent survenir au cours de l'opération, certaines apparaissent après : on constate une augmentation des complications locales, par exemple les fuites biliaires après cholécystectomie ou des fistules digestives (fuites de liquide digestif dues à des perforations de la paroi intestinale). Généralement, on ignore l'origine de ces complications, mais elles résultent souvent de l'utilisation d'un instrument qui n'était pas adapté, d'une technique approximative ou même – paradoxalement – d'un avantage de la technique que nous avons souligné : l'absence d'adhérences. Le tissu fibreux qui se forme après les opérations par chirurgie ouverte, s'il est parfois responsable d'occlusion, sert aussi de «colle», colmatant les éventuelles petites fissures mal suturées. En l'absence de ce tissu fibreux, des fistules



4. POUR DÉCOLLER la paroi abdominale des organes à opérer, on peut injecter un gaz sous pression, généralement du dioxyde de carbone. Toutefois, l'usage de ce gaz n'est pas dénué de risques, et certains chirurgiens préfèrent décoller mécaniquement la paroi à l'aide d'un suspenseur (le principe en est illustré ci-dessus). Ce dernier est suspendu à un crochet dont la hauteur règle celle de la paroi abdominale (à droite).



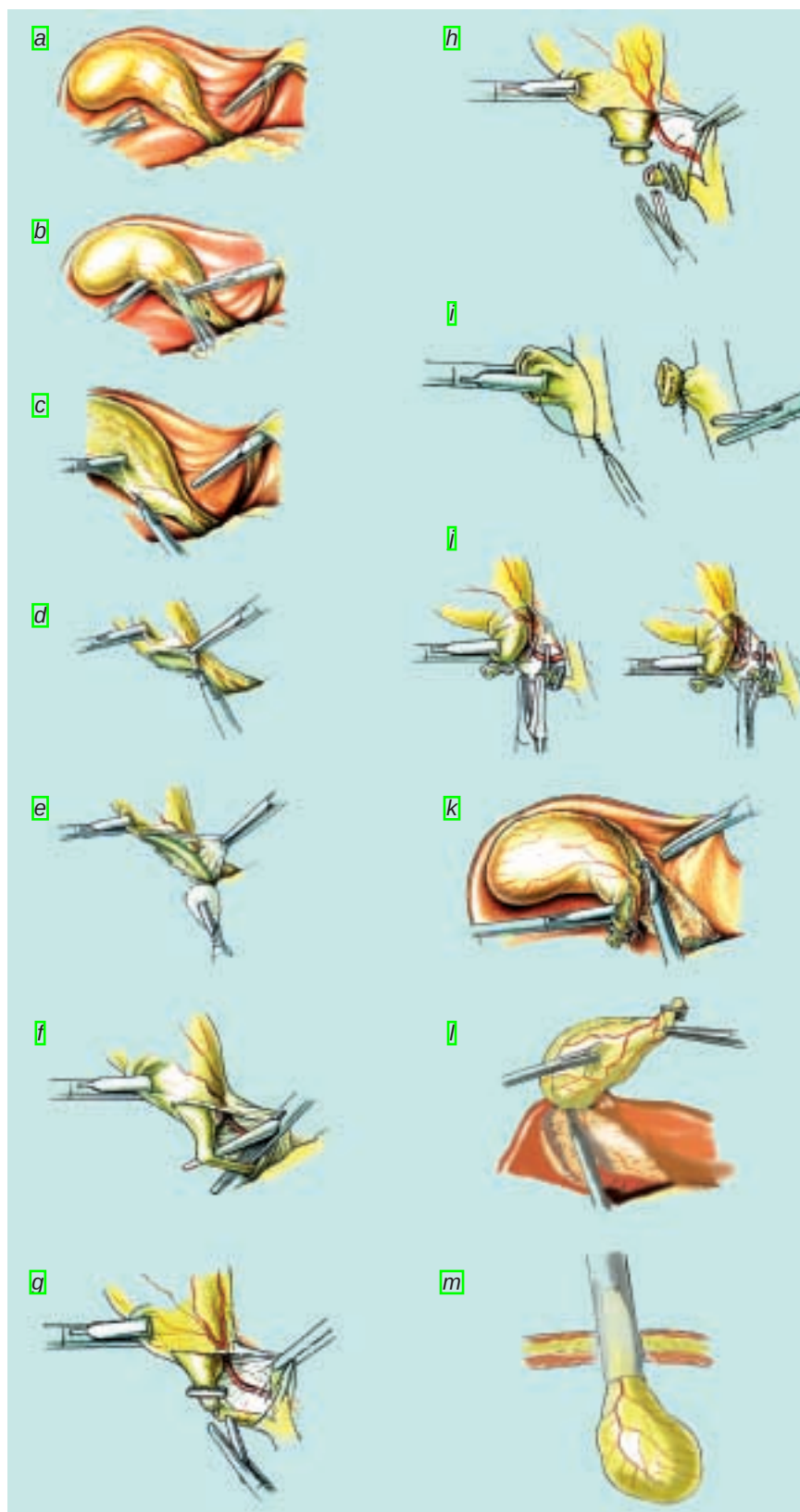


risquent d'apparaître. L'usage de la chirurgie vidéo-endoscopique est controversé dans les affections malignes, car on pense – sans en avoir la preuve – que les cellules cancéreuses risquent d'être disséminées.

Le coût de la chirurgie vidéo-endoscopique n'est pas encore estimé précisément, car de multiples facteurs, de nature opposée, interviennent. Toutefois, la réduction des durées d'hospitalisation et d'arrêt d'activité diminuent incontestablement les coûts : une intervention pratiquée par vidéo-chirurgie peut coûter jusqu'à deux fois moins cher que la même opération par chirurgie classique.

En revanche, l'installation est onéreuse : les instruments et l'installation spécifique de la vidéo-chirurgie, nommée la « colonne » (voir la figure 7) coûtent environ 250 000 francs, et il est prudent de disposer de plusieurs unités, pour pallier les pannes éventuelles. Le coût de l'entretien est élevé, et la maintenance nécessite de faire appel à des techniciens spécialisés. De plus, certaines équipes choisissent des instruments à usage unique, mais les bilans économiques des deux techniques (instruments stérilisés à usages multiples ou instruments à usage unique) ne sont pas encore bien établis.

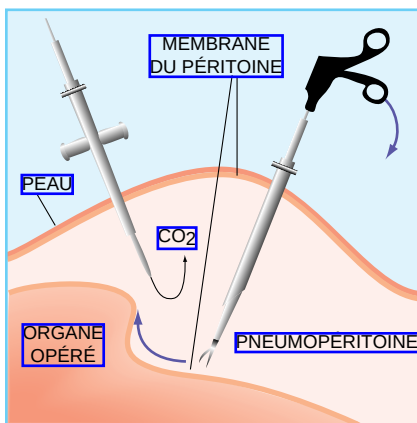
Certaines interventions durent plus longtemps, immobilisant davantage le personnel et les salles d'opération. Une heure de salle d'opération coûte 6 000 francs, soit l'équivalent de deux journées d'hospitalisation. L'évolution des techniques chirurgicales entraînera celle des centres de soins : les futurs hôpitaux offriront moins de lits d'hospitalisation, mais nécessiteront des plateaux techniques de plus en plus complexes et coûteux.



5. L'ABLATION DE LA VÉSICULE BILIAIRE, ou cholécystectomie, comprend plusieurs étapes : une fois les différents trocars introduits dans l'abdomen (en haut à gauche), la première étape consiste à dégager la vésicule au moyen de pinces (a) et à libérer l'« embouchure » (b à e). Lorsque ce canal est dégagé (f), on le ligature au moyen d'agrafes, et l'on coupe entre ces agrafes (g et h). Il faut ensuite faire un nœud autour de l'extrémité coupée qui reste en place (i). On interrompt la circulation sanguine et l'on coupe l'artère qui irrigue normalement la vésicule biliaire (j). La vésicule est désormais indépendante du reste de l'organisme, et il faut la retirer. Au moyen de pinces et de scalpels, le chirurgien dégage complètement l'organe (k et l) et l'extirpe par un des trocars (m).

La gestuelle du chirurgien

Comment devient-on vidéo-chirurgien? L'enseignement de la chirurgie comporte un aspect théorique, assuré par les cours et par les livres, et un aspect technique artisanal, qui s'apprend par compagnonnage : le futur chirurgien commence par regarder celui qui opère, puis il l'aide, d'abord en second, puis en premier ; ensuite, il se fait assister par un chirurgien chevronné et, enfin, il opère seul, en demandant conseil en cas de difficulté. Cette période d'apprentissage dure entre quatre et cinq ans. Il en est de même pour pratiquer la chirurgie vidéo-endoscopique :



tout chirurgien doit désormais être capable d'opérer par les deux techniques et de passer de l'une à l'autre.

En chirurgie vidéo-endoscopique, la gestuelle n'est pas naturelle : le chirurgien ne voit directement ni les organes à traiter, ni les instruments qu'il utilise. Il suit ses gestes sur un écran sans relief, et l'axe de vision est différent de l'axe de ses mouvements. De surcroît, les gestes sont inversés : comme l'instrument pivote autour du point d'introduction du trocart dans les tissus, on doit pousser vers la gauche quand on veut que les ciseaux aillent vers la droite (voir la figure 6). Pour l'apprentissage, on utilise des « fantômes », des mannequins, et l'on s'entraîne à réaliser les gestes de la dissection, de la section, de la ligature, des sutures, des nœuds, etc. Cela est lassant, voire humiliant, pour un chirurgien habitué à faire ces gestes instinctivement et élégamment et qui redevient maladroit et pataud !

Cette formation à la chirurgie vidéo-endoscopique des chirurgiens déjà qualifiés a soulevé plusieurs difficultés. Entre 1990 et 1992, la plupart des chirurgiens ont dû se reconverter à cette discipline nouvelle, mais les équipes capables de les former étaient peu nombreuses : les délais étaient souvent

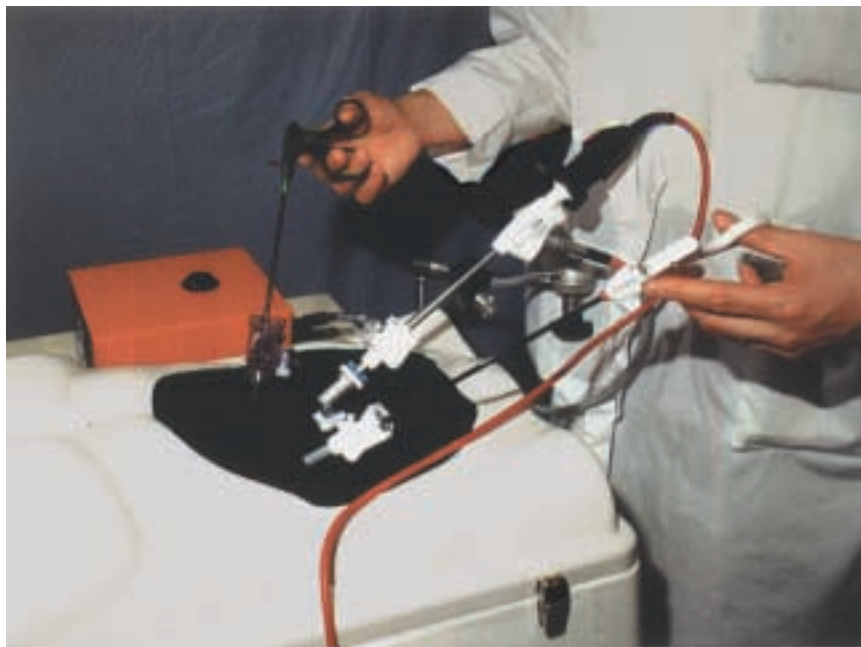
longs, et la qualité de l'enseignement parfois médiocre. Aujourd'hui, les centres de formation, tant publics que privés, sont nombreux et compétents, et la plupart des universités dispensent un enseignement à la fois théorique et pratique, sanctionné par un diplôme auquel ont accès aussi bien les internes en chirurgie que les chirurgiens déjà en activité.

Aussi bien que les pilotes de ligne s'entraînent sur des simulateurs de vol, les chirurgiens pourraient-ils s'exercer sur des simulateurs? Non, du moins pour le moment, d'une part en raison du coût et du marché limité que représenteraient de tels simulateurs de vidéo-chirurgie et, d'autre part, en raison d'une difficulté technique difficilement surmontable : contrairement à un relief ou à une piste d'atterrissage fixes, les organes abdominaux sont mobiles et se modifient sous l'action de chaque geste chirurgical. La modélisation est difficile, car on ne peut prévoir les réactions et les mouvements des organes. Au contraire, pour les organes immobiles, tels le cerveau, l'œil, l'oreille et le système ostéo-articulaire, on peut envisager des simulateurs et une chirurgie assistée par ordinateur.

Si l'apprentissage de la gestuelle se fait sur des fantômes inertes, certains gestes, tels la création d'un pneumopéritoine ou le contrôle d'une hémorragie, doivent être réalisés sur des sujets vivants ; en dépit des questions éthiques soulevées par l'expérimentation animale, mieux vaut que le chirurgien s'entraîne sur un animal que sur l'homme !

L'expérimentation animale reste indispensable à la recherche, à la mise au point et à l'étude des conséquences de ces techniques de pointe ; les données doivent être recueillies chez un mammifère aussi proche de l'homme que possible sur le plan physiologique. L'animal le plus utilisé est le porc de 30 kilogrammes. D'ailleurs, les chirurgiens de pays tels que la Grande-Bretagne, où l'expérimentation animale est interdite, viennent apprendre les techniques de vidéo-chirurgie en France ou en Allemagne.

La vidéo-chirurgie étendra son domaine d'action à mesure que la technique progressera. Les interventions qui restent aujourd'hui du domaine de l'exploit deviendront routinières et sûres. Certains inconvénients actuels, par exemple l'utilisation de dioxyde de carbone, seront mieux maîtrisés, voire



6. DES MAQUETTES servent à l'apprentissage de la vidéo-chirurgie. Un chirurgien habitué à la chirurgie classique dite ouverte, doit réapprendre tous les gestes, et s'accoutumer aux difficultés que présente la méthode : il ne voit pas directement l'organe opéré, mais une image, à deux dimensions, projetée sur un écran de télévision ; il ne peut s'aider du sens du toucher qui le renseigne en chirurgie ouverte, et il doit s'habituer à inverser ses gestes : les trocars étant mobiles autour d'un point fixe (l'endroit où ils pénètrent dans la peau), quand il veut amener l'outil vers la gauche, il doit pousser la poignée vers la droite (voir le schéma, en haut).



7. LA «COLONNE» qui sert aux interventions par vidéo-chirurgie comporte une source lumineuse, un dispositif de contrôle de la pression du gaz injecté sous la paroi abdominale, un dispositif de reconstruction des images enregistrées par le télescope d'observation, un écran qui projette ces images et un magnétoscope qui les enregistre.

supprimés. Le travail du chirurgien sera facilité par l'utilisation d'instruments plus aisés à manier. Des procédés simples permettront aux chirurgiens de voir en trois dimensions : les techniques actuelles nécessitent le port de lunettes inconfortables ou un recours peu satisfaisant à l'holographie.

Chirurgie sans chirurgien ?

Les futurs dispositifs optiques amélioreront la résolution et élargiront le champ d'observation pour les trocars de faible diamètre. Des porte-caméra télécommandés réagiront à des capteurs fixés sur la tête de l'opérateur ou seront commandés par la voix : il suffira au chirurgien de tourner la tête vers la droite ou d'ordonner «droite» pour que l'instrument ainsi commandé «obéisse». La télémanipulation fait également l'objet d'un programme de recherche européen dans le cadre du projet *Eurêka* ; des micromoteurs et des microcapteurs devraient permettre d'automatiser certaines interventions.

Ainsi quelques prothèses de hanche ont déjà été posées avec davantage de

précision grâce à des ordinateurs : l'image tridimensionnelle de l'os sur lequel l'intervention doit avoir lieu est numérisée grâce à des radiographies et à des images obtenues par scanner ; l'ordinateur définit le canal à percer pour que la prothèse s'ajuste parfaitement ; grâce à des micromoteurs commandés par l'ordinateur, l'os est percé, et la prothèse est mise en place.

Reste un pas à franchir : si l'homme est assisté de machines suffisamment performantes pour le remplacer, si le chirurgien n'observe plus l'organe qu'il opère, mais une image de cet organe sur un écran de télévision, il n'est plus nécessaire qu'il soit dans la salle d'opération, ni même à proximité : il pourrait être à des milliers de kilomètres. Les systèmes de transmission des images par satellite pourraient permettre de s'affranchir de la présence directe de l'opérateur, qui officierait à distance. Toutefois, le temps de transmission de l'information (un dixième de seconde pour que l'image parvienne au chirurgien et un dixième de seconde pour que l'ordre soit transmis) risque d'être supérieur à ce que l'on tolère si, par exemple, une hémorragie se déclenche.

Enfin, le chirurgien peut décider à tout moment de recourir à la chirurgie ouverte, si bien que la vidéo-chirurgie à distance, réalisable en théorie, ne sera peut-être jamais pratiquée couramment. Les progrès de la robotique, de l'intelligence artificielle et de la télématique aideront sans doute les chirurgiens à réaliser avec sécurité des actes dont la simple évocation paraît aujourd'hui osée, mais la chirurgie sera encore longtemps pratiquée par des chirurgiens.

François DUBOIS, membre de l'Académie de chirurgie, est professeur à la Faculté et chirurgien des Hôpitaux de Paris.

F. DUBOIS, *Cholécystectomie sous cœlioscopie*, in *Nouvelle Presse Médicale*, n° 18, p. 980, 1989.

J. TESTAS et B. DELAITRE, *Chirurgie digestive par voie cœlioscopique*, éditions Maloine, 1991.

Ph. MOURET, *La cholécystectomie endoscopique à 4 ans*, Lyon Chirurgical, 87, 179, 1991.

M.A. BRUHAT et F. DUBOIS, *Cœlio-chirurgie abdomino-pelvienne*, Springer, 1992.

A. CUSHIERI, G. BUSS et J. PERISSAT, *Operative Manual of Endoscopic Surgery*, Springer-Verlag, 1992.

Lumière et trous noirs

NORBERT QUIEN • RAINER WEHRSE • CHRISTOPH KINDL

L'exemple d'un disque de matière qui tourne autour d'un trou noir illustre l'effet d'un fort champ de gravitation sur la propagation de la lumière. Des simulations sur ordinateur font apparaître comment les images se déforment et se multiplient.

«Très bien, dit le Chat, et cette fois il s'évanouit lentement, en commençant par le bout de sa queue pour finir par le sourire qui demeura en suspens quelque temps après tout le reste.

«Eh bien, j'ai souvent vu un chat sans sourire, pensa Alice, mais un sourire sans chat ! C'est bien la chose la plus étrange que j'aie jamais vue!».

Lewis CARROLL,
Alice au pays des merveilles

Une étoile très massive, qui s'effondre en trou noir à la fin de sa vie, illustre une propriété essentielle des objets physiques : le couplage de la matière et de la masse. Tout comme le chat du Cheshire de Lewis Carroll, qui disparaît dans le néant en ne laissant que son sourire, la matière de l'étoile s'évanouit, ne laissant que la masse et son champ gravitationnel. La matière située à proximité tombe vers le centre immatériel de la masse, où elle disparaît ; ainsi la masse du trou noir et l'intensité de son champ gravitationnel ne cessent de croître avec le temps.

Les objets massifs et compacts comme les trous noirs engendrent des effets spectaculaires et singuliers. La matière, aspirée dans un tel maelström cosmique, n'en échappe plus jamais ; la gravitation est si intense que même la lumière y est piégée. Comme il est impossible d'extraire la moindre information sur ce qui se produit à l'intérieur d'une sphère dite de Schwarzschild entourant la masse, cette sphère est un horizon infranchissable. À l'intérieur de cette sphère de Schwarzschild, les rayons lumineux sont si courbés qu'ils bouclent sur eux-mêmes.

Même à l'extérieur de cet asile interdit, on observe des phénomènes étranges. Les rayons lumineux qui passent à proximité sont fortement déviés et peuvent même tourner plusieurs fois autour du trou noir.

Au XVIII^e siècle déjà, on supputait l'existence d'objets qui, par leur masse imposante, captureraient la lumière qu'ils émettaient et restaient invisibles pour un observateur éloigné. Le géologue et astronome britannique John Mitchell (1724-1793), puis le mathématicien et physicien Pierre Simon de Laplace (1749-1827) ont élaboré les premières représentations de ces corps célestes. Il y a 30 ans, lorsque les théories modernes de la physique permirent des calculs plus précis, la majorité des astronomes se persuadèrent que les trous noirs existaient.

Comme aucun rayonnement ne peut s'en échapper, il est difficile de prouver l'existence de ces objets étranges : on ne peut qu'observer l'effet de leur énorme champ gravitationnel sur la matière proche. Ainsi l'afflux des nuages de gaz, ou les étoiles déchirées par les marées induites par le trou noir, doivent former un disque d'accrétion autour du trou et tourner à très grande vitesse. Au cas où, selon une hypothèse vraisemblable, on trouverait des trous noirs dans le noyau de certaines galaxies, ils devraient se manifester par la vitesse de rotation particulièrement élevée de la matière

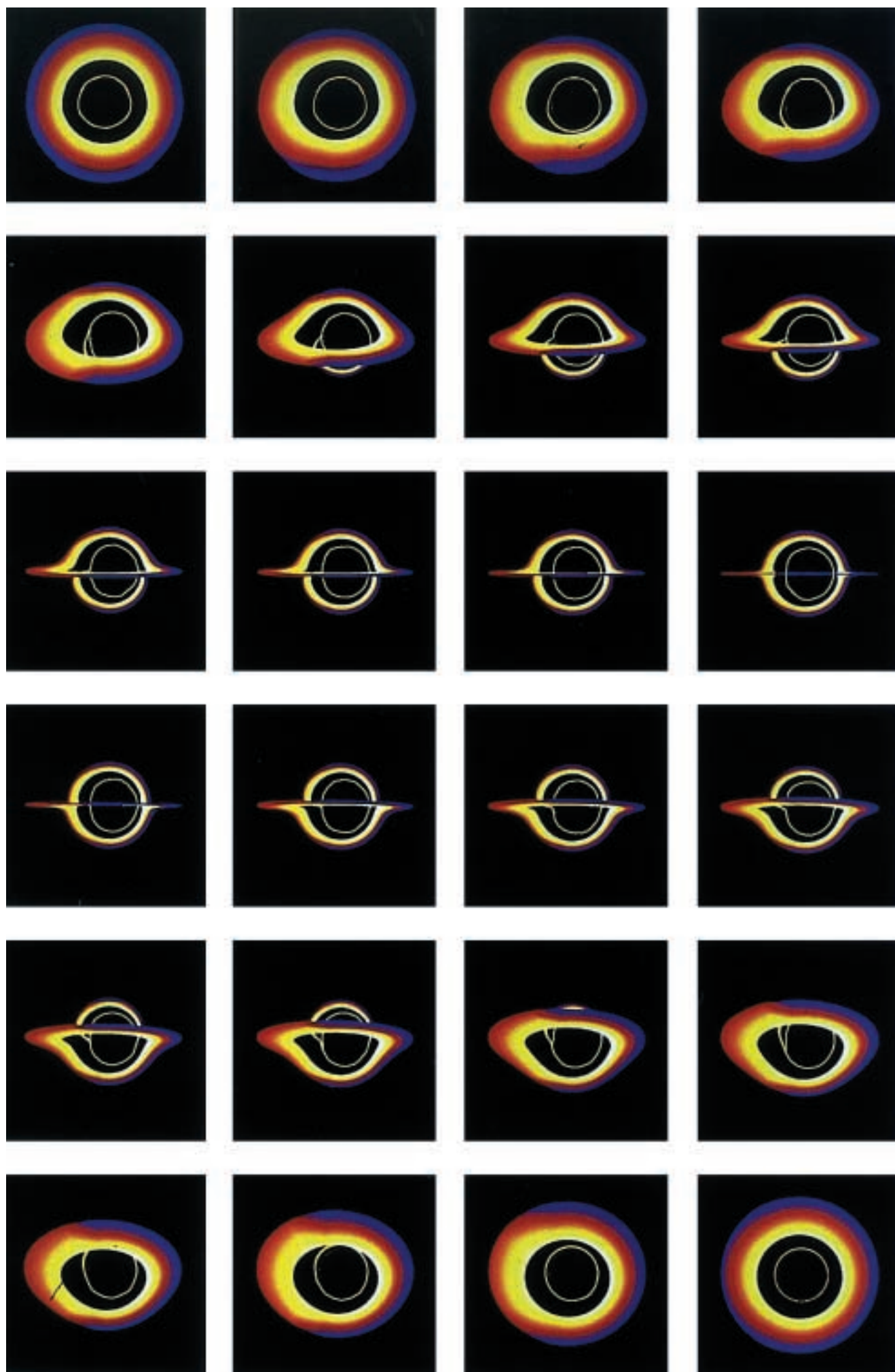
présente dans cette zone. Les observations récentes incitent à penser qu'il existe des trous noirs dans notre Voie lactée et dans d'autres galaxies.

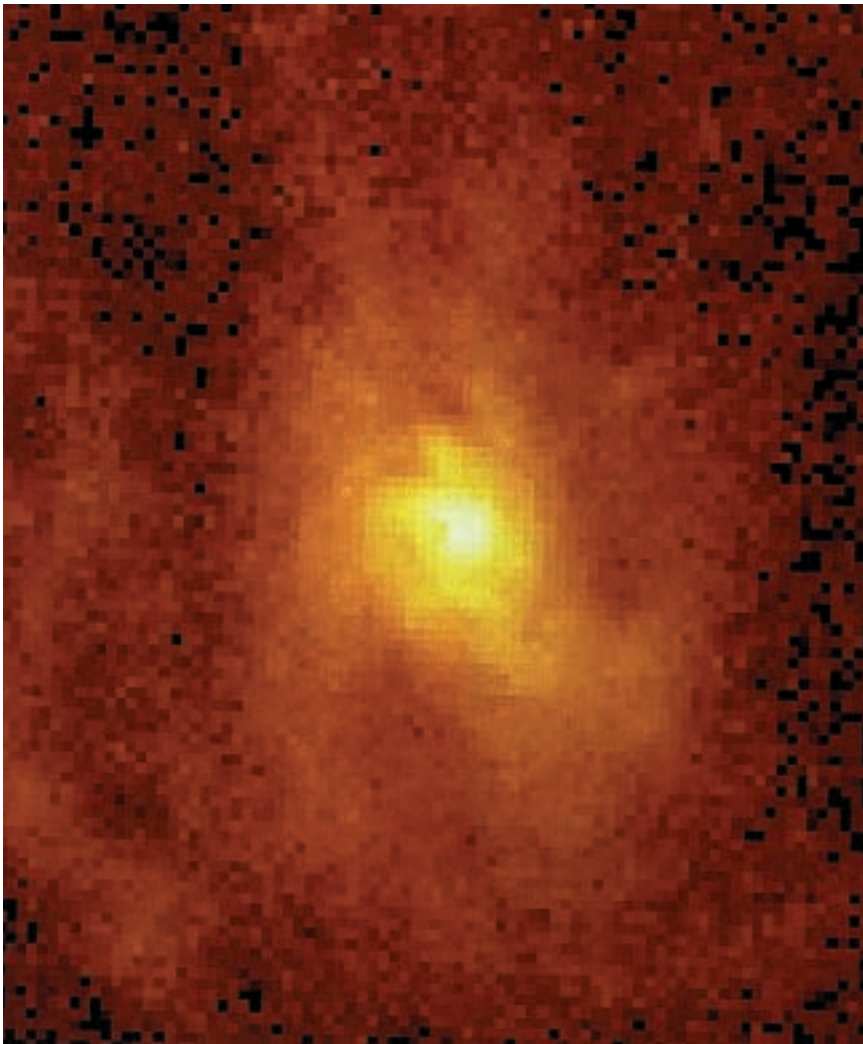
Le frottement et d'autres processus chauffent les gaz du disque d'accrétion jusqu'à plusieurs millions de degrés, de sorte que ces gaz émettent un rayonnement intense et de très forte énergie, jusqu'aux fréquences des rayons X. Les astronomes supposent aujourd'hui que l'extrême intensité lumineuse des noyaux de galaxies résulte de la présence de trous noirs, de masses égales à 100 millions, voire un milliard de masses solaires. Les quasars, qui ont en leur centre un trou noir, émettent un rayonnement 1 000 à 10 000 fois plus intense qu'une galaxie ordinaire. Chaque année, l'équivalent d'une masse solaire est engloutie dans le trou noir central.

Comme la luminosité des noyaux de galaxies où se trouverait le trou noir varie en quelques heures, le diamètre du dispositif rayonnant n'est pas plus grand que la distance que parcourt la lumière dans le même temps : il devrait avoir, quelques heures-lumière environ, la taille de notre Système solaire.

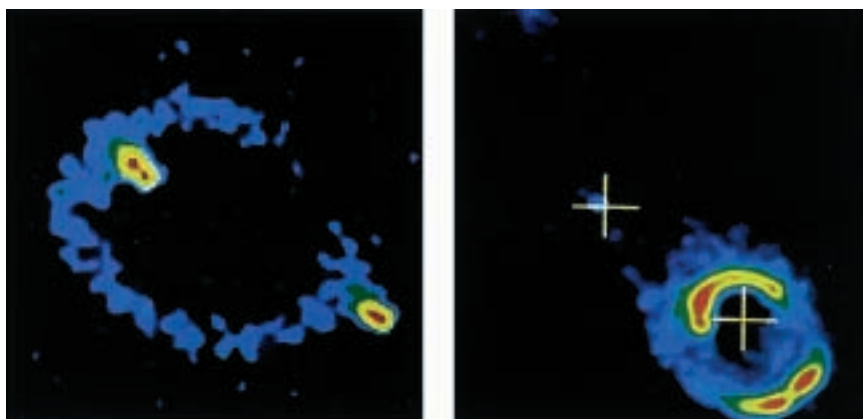
Etant donné la grande distance qui sépare ces objets de la Terre (plusieurs millions à quelques milliards d'années-lumière) et leur faible étendue, même les meilleurs télescopes ne pourront en distinguer les détails.

1. PERCEPTION DE L'ENVIRONNEMENT D'UN TROU NOIR. La série de clichés se lit de gauche à droite, et de haut en bas ; elle représente ce que verrait un observateur qui se déplacerait progressivement du pôle Nord du système constitué d'un trou noir en rotation et de son disque d'accrétion, à travers l'équateur jusqu'au pôle Sud. La simulation sur ordinateur est réalisée en intégrant les équations de la géométrie de Kerr. La masse du trou noir représente 100 millions de masses solaires, le diamètre du disque d'accrétion, un milliard de kilomètres (soit le double de la longueur de la trajectoire de la planète Mars).





2. PHOTOGRAPHIE DE LA GALAXIE M87, distante de 50 millions d'années-lumière : un grand disque de gaz chauds de 60 années-lumière de diamètre tourbillonne autour d'un centre, à 550 kilomètres par seconde. Ces données sont caractéristiques de la présence d'un trou noir gigantesque dont la masse est deux à trois milliards de fois celle du Soleil.



3. EFFETS OPTIQUES DE DEUX LENTILLES GRAVITATIONNELLES. L'objet céleste MG1131+049 (à gauche) émet un jet de matière qu'une galaxie située entre l'observateur terrestre et l'objet émetteur transforme en un anneau (en bleu) ; cet effet optique a été prédit par Einstein, et l'on dénomme cette structure «anneau d'Einstein». Une composante du jet (jaune et rouge) est dédoublée. L'image de l'objet céleste MG1654+1346 (à droite) a aussi une forme annulaire. La croix au centre de l'anneau indique la position de l'image de l'objet céleste dont une partie de la lumière est transformée et décalée par la galaxie intermédiaire. La croix centrale, indique la position de la galaxie active qui émet le jet, cette image n'étant pas déformée par la galaxie intermédiaire. Les radiographies ont été réalisées par J. Hewitt et G. Langston avec le Very Large Array de Socorro (Nouveau-Mexique).

Aussi, pour comprendre la répartition spectrale et spatiale de la lumière émise, nous sommes tributaires des simulations sur ordinateur. Ces dernières sont, comme on peut s'y attendre, complexes, car elles doivent tenir compte de nombreuses lois physiques : l'hydrodynamique des courants de matière, l'électromagnétisme pour l'émission et la propagation de la lumière, la physique quantique et les théories de la relativité, restreinte et généralisée.

Déformation des images par la courbure de l'espace-temps

Comment un observateur verrait-il un trou noir et son disque d'accrétion toroïdal s'il pouvait s'en approcher ? Pour illustrer les effets déterminants, nous avons utilisé la méthode informatique du lancer de rayons. Cette méthode permet de calculer le trajet des rayons lumineux dans un environnement spécifié. Dans le cas des trous noirs, on ne peut suivre, comme c'est l'usage, la trajectoire des rayons de la source émettrice à l'observateur (la plupart des rayons émis ne lui parviendrait pas), aussi tire-t-on profit de la réversibilité du trajet de la lumière et calcule-t-on les trajets de l'observateur à la source.

Dans un décor familier – par exemple la vue intérieure d'une chambre –, les rayons lumineux se propagent selon une géodésique, la trajectoire qui minimise la distance parcourue. En l'absence de masse très importante, la lumière se propage en ligne droite, et atteint l'œil de l'observateur après un certain nombre de réflexions sur les objets du décor. Dans cet espace plan, c'est-à-dire sans courbure (au sens de la théorie de la relativité), la géométrie euclidienne s'applique, et deux droites parallèles ne se rencontrent jamais.

Or ces lois simples ne s'appliquent pas à notre cas en raison des propriétés de l'interaction matière-lumière. La lumière se propage dans le vide à vitesse constante (300 000 kilomètres par seconde) et indépendamment du système de référence. Autrement dit, la vitesse de la lumière est toujours la même pour un observateur, qu'il soit immobile ou se déplace dans l'espace à une vitesse quelconque.

Les conséquences de cette invariance furent résumées par Einstein

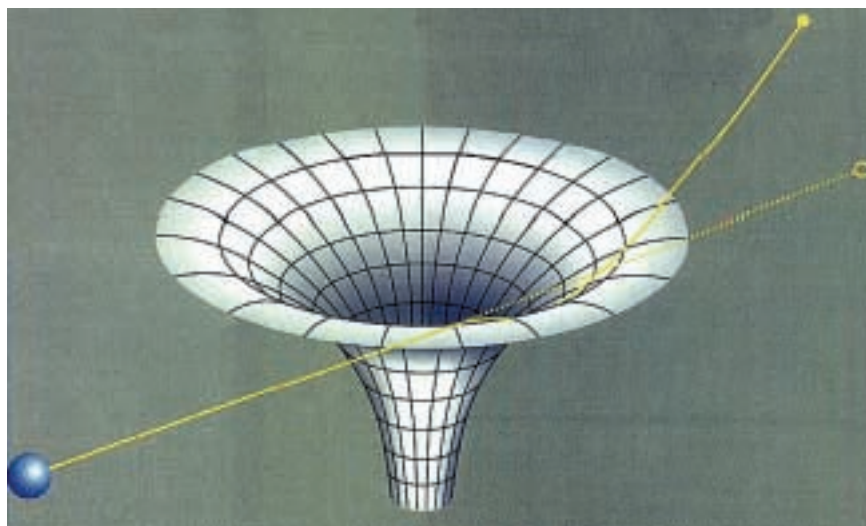
en 1905 dans sa théorie de la relativité restreinte. L'espace tridimensionnel et le temps ne sont pas des données indépendantes, mais les éléments couplés (parce que la vitesse de la lumière est constante) d'un espace-temps à quatre dimensions. La géométrie qui en découle, élaborée par le professeur de mathématiques d'Einstein à Zurich, Hermann Minkowski, complète les équations euclidiennes : la distance entre deux points dépend non seulement de variables d'espace, mais aussi d'une variable temporelle. Pourtant la géométrie de Minkowski ressemble à la géométrie euclidienne : la géodésique reliant deux points est encore une droite, et donc l'espace-temps est plan.

Les choses changent en présence d'une masse et de son champ gravitationnel. Comme l'a démontré Einstein dans sa théorie de la relativité générale (essentiellement une théorie de la gravitation), l'espace-temps est courbé par la masse ; réciproquement, cette courbure de l'espace-temps modifie le mouvement d'une masse. Or, dans un espace-temps à courbure positive, la géodésique entre deux points n'est plus une droite. Contrairement à la géométrie euclidienne, deux parallèles se rencontrent, tout comme, sur une sphère, des méridiens proches de l'équateur, assimilables à des droites parallèles, se coupent aux deux pôles.

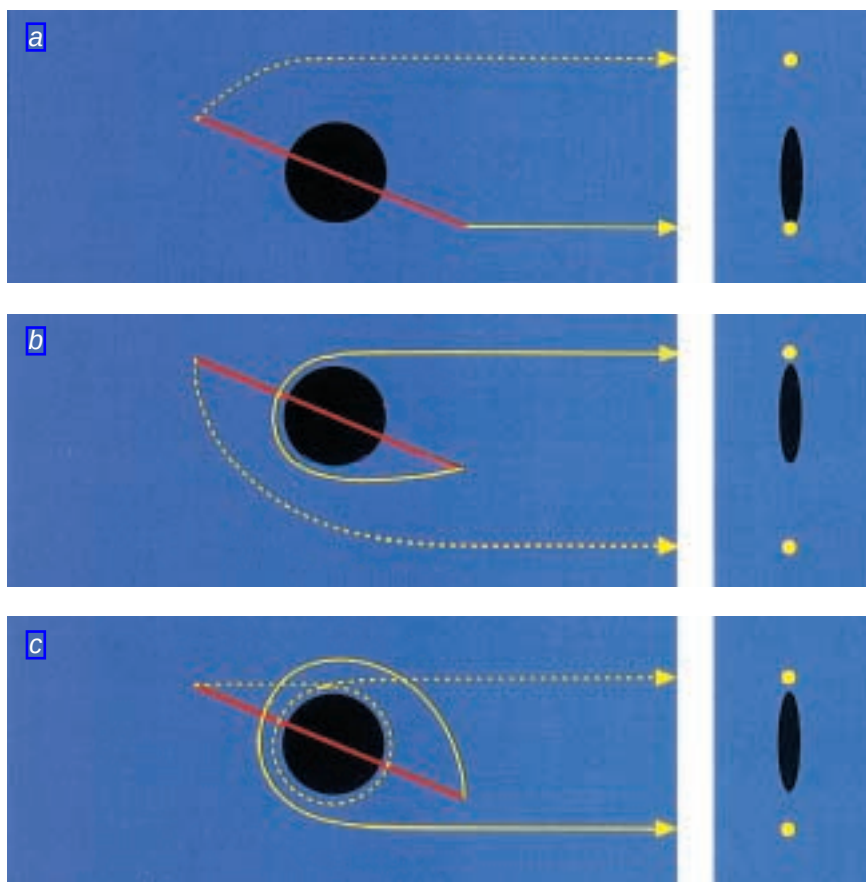
Un champ gravitationnel dévie même la lumière. Schwarzschild calcula cette déviation. En mai 1916, à Postdam, quelques semaines avant sa mort d'une blessure de guerre alors qu'il était lieutenant d'artillerie sur le front russe, il résolut les équations établies par Einstein dans le cas d'un trou noir immobile.

Cette prévision de la théorie de la relativité générale fut confirmée par les astronomes britanniques pendant l'éclipse solaire de mai 1919 : sur des photographies, les étoiles à proximité immédiate du disque solaire semblaient décalées par rapport à leur position normale dans le ciel : leur lumière était attirée par la masse du Soleil et déviée par rapport à une ligne droite joignant l'observateur à l'étoile.

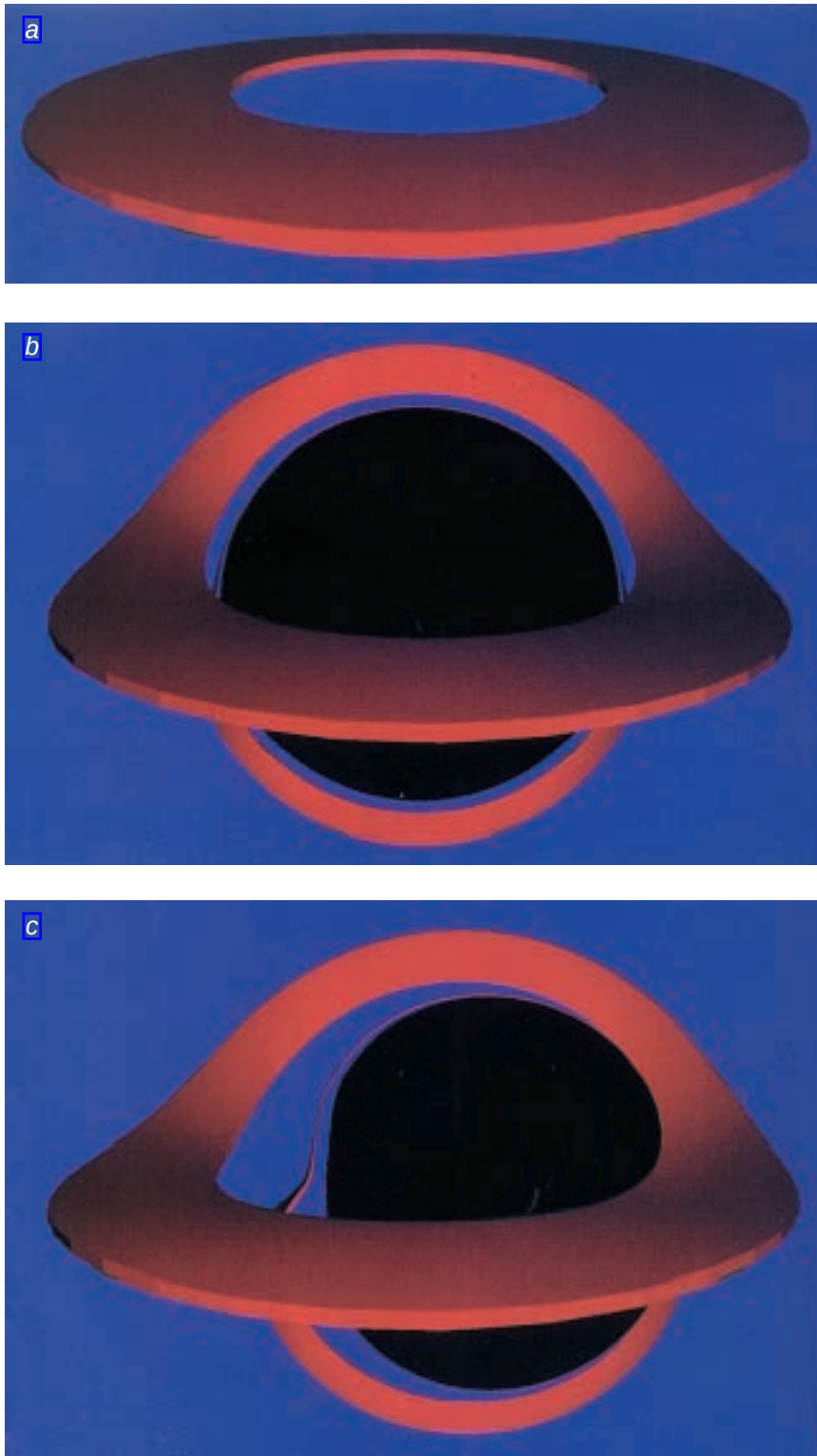
Dans nos simulations sur ordinateur, la notion de droite est modifiée, et il faut suivre chaque rayon lumineux dans un espace-temps courbe. Pour ce faire, nous avons utilisé des procédés numériques modernes afin



4. SELON LA THEORIE DE LA RELATIVITE GENERALE, l'espace est courbé par la masse. Le champ gravitationnel, représenté ici à deux dimensions autour d'un corps massif (le Soleil), est déformé en entonnoir. Un rayon lumineux qui, sur la trajectoire qui le mène d'une étoile à l'observateur terrestre, passe à côté du Soleil, est dévié par cette courbure de l'espace. Par conséquent, l'observateur voit l'étoile, par rapport à sa position habituelle dans le ciel, comme si elle était déviée de quelque 1,75 seconde d'arc. Des masses plus importantes, comme celles des trous noirs, dévierait davantage la lumière.



5. LA DEVIATION DE LA LUMIERE permet à un observateur d'apercevoir des régions du disque de matière (en rouge) situées derrière le trou noir. Les rayons lumineux (en jaune) sont perçus directement ou après plusieurs rotations autour du trou. L'image directe (premier ordre) contient tous les rayons lumineux émis par la face avant du disque et qui parviennent à l'observateur directement, et les rayons qui empruntent le chemin le plus court à partir de la face arrière (a). Les rayons qui entourent le trou noir à moitié constituent la première image indirecte (b), alors que tous ceux qui n'atteignent l'observateur qu'après avoir accompli une rotation complète forment la seconde image indirecte (c). A droite, on a représenté l'image des points du disque tels que vus par l'observateur.



6. VUE D'UN DISQUE D'ACCRETION qui tourne autour d'un trou noir massif (de 100 millions de masses solaires). L'image est déformée par l'intense champ gravitationnel du trou noir. Dans cette simulation, l'observateur a une vue d'ensemble de tout le disque de matière d'un milliard de kilomètres de diamètre. Il regarde le plan du disque sous un angle de 13 degrés au-dessus de l'horizon. Pour améliorer la perspective, le disque est teinté comme s'il était éclairé par une lampe superpuissante tenue par l'observateur. En l'absence de masse centrale, c'est-à-dire dans la géométrie de Minkowski, l'observateur perçoit le disque de matière comme le système annulaire de Saturne (a). Pour tenir compte de la masse du trou noir, il faut passer à la géométrie de Schwarzschild (b). Le domaine où les rayons lumineux sont définitivement piégés est en noir. Le disque ressemble à un rebord de chapeau déformé. L'anneau intérieur, très fin, est une image indirecte d'ordre supérieur. Si le trou noir et le disque d'accrétion tournent, la géométrie de Kerr donne une autre image (c). Dans ce cas, des termes supplémentaires de l'équation de propagation induisent une asymétrie de l'image.

de résoudre des équations différentielles qui dépendent de la géométrie choisie. Aussi les images obtenues représentent n'importe quelle structure, sauf ce qui se passe à l'intérieur du rayon de Schwarzschild.

Nous avons représenté ainsi un disque de matière qui entoure un trou noir massif. L'espace-temps a une symétrie de révolution par rapport à l'axe du disque, et les rayons lumineux sont déviés vers le centre. Cette courbure des rayons lumineux fait que l'observateur peut voir des parties cachées des objets. S'il est situé au-dessus du plan du disque, il peut même distinguer des domaines du disque qui se trouvent, par rapport à lui, derrière le trou noir. La lumière émise par ces domaines passe au-dessus ou au-dessous du rayon de Schwarzschild.

La lumière émise derrière le trou noir, par exemple vers le haut, est déviée vers le centre par la forte gravitation et atteint l'observateur après une trajectoire parabolique. La trajectoire d'un rayon lumineux peut même entourer complètement le trou noir avant d'échapper définitivement au champ gravitationnel. Ainsi l'observateur perçoit non seulement l'image directe, mais aussi les images indirectes du premier et du second ordres, voire d'ordres plus élevés, où la lumière tourne plusieurs fois autour du trou noir. Par exemple, dans la première image indirecte, il perçoit, en haut du trou noir, la face inférieure de la moitié du disque qui est de son côté ; de même, la face postérieure du disque apparaît en bas du trou noir.

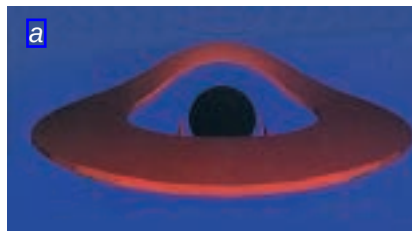
La géométrie de Schwarzschild s'applique quand la masse centrale ne tourne pas. Si l'étoile qui s'effondre est en rotation – ce qui est le cas le plus probable –, le trou noir tourne aussi. Dans ce cas, la géométrie est plus complexe ; le mathématicien néo-zélandais Roy Kerr a résolu, par un superbe tour de force mathématique, l'équation établie par Einstein pour un trou noir en rotation. La géométrie de Kerr ne change rien d'essentiel à l'image du disque de matière. Ce disque ressemble à celui qui tourne autour d'un trou noir défini par la géométrie de Schwarzschild ; toutefois, les termes de rotation des équations font que le rayon de Schwarzschild et l'horizon ne coïncident plus : la rotation a introduit une asymé-

trie. Si l'ensemble trou noir-disque tourne (vu de dessus) dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, l'image est déformée vers la droite, et le point culminant de l'image du disque est repoussé du même côté. La rotation du trou noir produit un effet d'entraînement qui dévie les rayons lumineux plus vers la droite que vers la gauche.

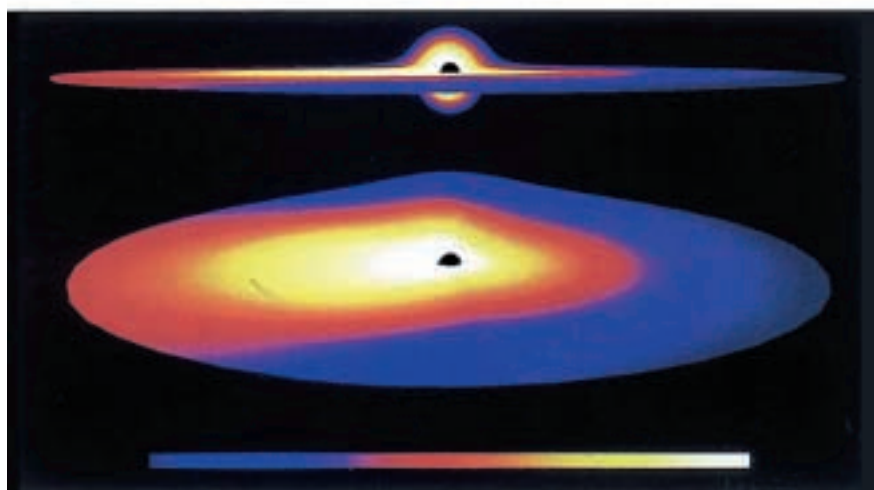
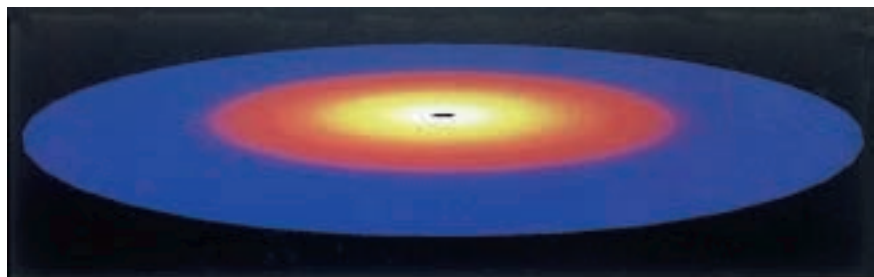
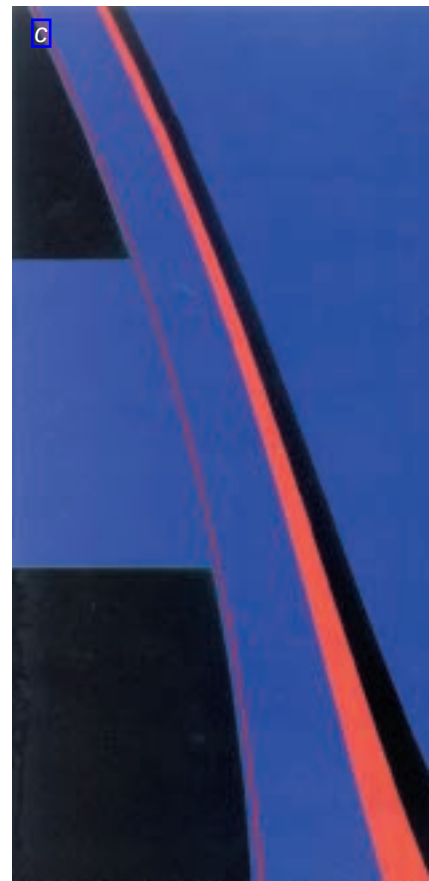
La moitié gauche de la première image indirecte a une structure en forme de coude. Comme dans la géométrie de Schwarzschild, la lumière de cette image, que l'on perçoit en haut de l'horizon, provient de la face avant du disque. À l'inverse, la lumière que l'on distingue en bas émane de la face arrière. Une différence importante subsiste : la lumière de la face avant tourne autour de la moitié du trou noir et frôle presque l'horizon, les rayons passant très près de cette frontière. En ce qui concerne la lumière de l'arrière du disque, les géodésiques continuent à s'éloigner de l'horizon et, de ce fait, l'image paraît encore plus loin de ce dernier. Le passage d'un trajet optique à l'autre se situe exactement sur les faces gauche et droite du disque (par rapport à l'observateur) et n'est visible sous forme de coude qu'à cause de l'asymétrie résultant de la rotation.

Supposons maintenant qu'un trou noir en rotation comporte aussi une charge électrique. Dans les équations, nous devons aussi tenir compte des termes de charge. E. Newman, de l'Université de Pittsburgh, en Pennsylvanie, a généralisé la description de Kerr pour en faire la géométrie Kerr-Newman. Toutefois, les images ne sont guère modifiées. Si l'on simule la géométrie de Kerr selon plusieurs angles, on observe comment la vue du disque lumineux de matière pourrait changer au cours d'un vol autour du système. Une telle mission ne serait pas possible dans la pratique, la fusée spatiale serait déchiquetée, mais l'animation donne une idée des images qui seraient perçues.

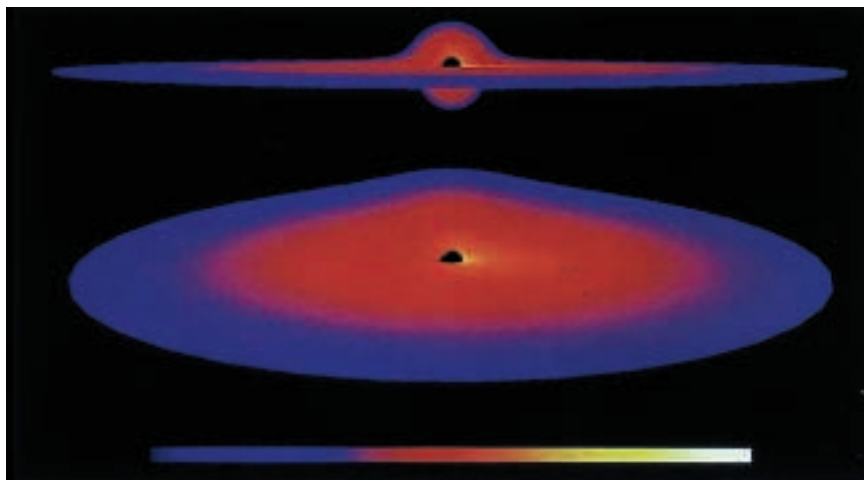
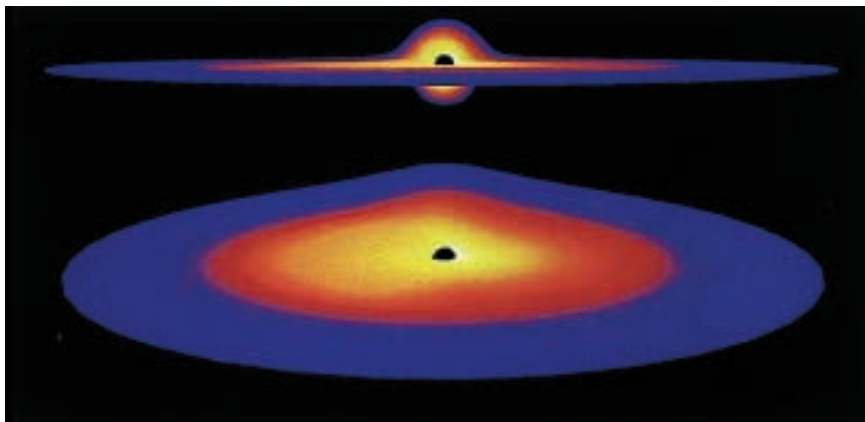
L'animation illustre les modifications du rayonnement du disque, image après image. Pour cela, on calcule, à travers chaque section de l'image, l'ensemble du flux lumineux émis par chaque point du disque. Il apparaît que la luminosité du disque, quand on le regarde dans son plan, est bien supérieure à celle constatée dans la géométrie de Minkowski.



7. SIMULATION ANALOGUE A CELLE DU MILIEU DE LA FIGURE 5 (géométrie de Schwarzschild), mais la masse du trou noir est divisée par trois. En a, une vue générale ; en b, la coupe agrandie du domaine central. On distingue la première et - proche de l'horizon - la seconde images du disque. Sur l'image de droite (c), une partie du bord droit de l'horizon est encore agrandie ; une partie de la zone noire du trou noir est effacée pour une meilleure lisibilité de l'image. On distingue une partie de la troisième image indirecte.



8. SIMULATION DE L'IMAGE D'UN GRAND DISQUE D'ACCRETION au voisinage d'un trou noir en rotation. En haut, géométrie de Minkowski ; en bas, géométrie de Kerr. Les paramètres du système correspondent à ceux de la figure 5, sauf le diamètre du tore, 18 fois plus grand, soit à peu près le diamètre de notre Système solaire. On a calculé la marche des rayons ultraviolets à la longueur d'onde de 88 nanomètres. Les couleurs indiquent l'intensité du flux d'énergie : du bleu foncé au blanc, en passant par le rouge (variation de 10^{18}).



9. MEME SYSTÈME QUE CELUI DE LA FIGURE 7 de la géométrie de Kerr, à cette différence près que la longueur d'onde est de 360 nanomètres (*ultraviolette, en haut*) et de 1 000 nanomètres (*infrarouge, en bas*). L'échelle de couleur – du bleu foncé au blanc – représente une variation de 10^6 du flux énergétique.

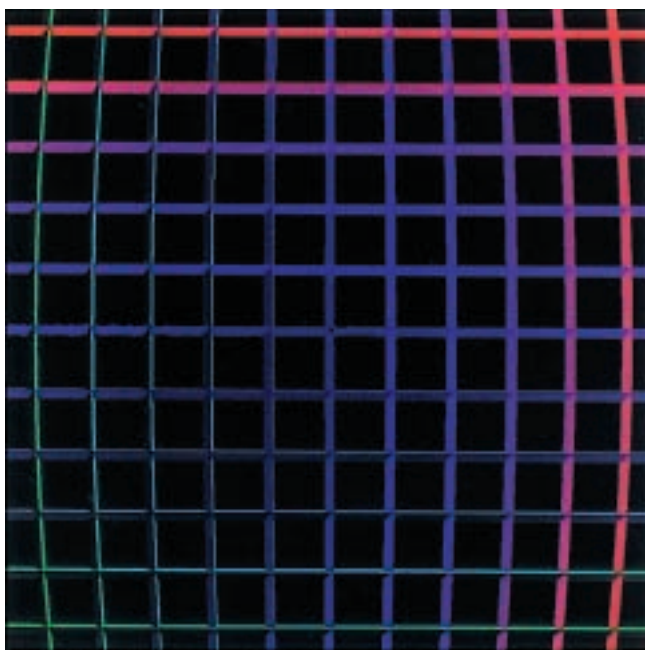
Les lois de la théorie de la relativité générale révèlent qu'une part considérable du rayonnement émis par le disque atteint l'observateur.

Les trous noirs sont des lentilles gravitationnelles

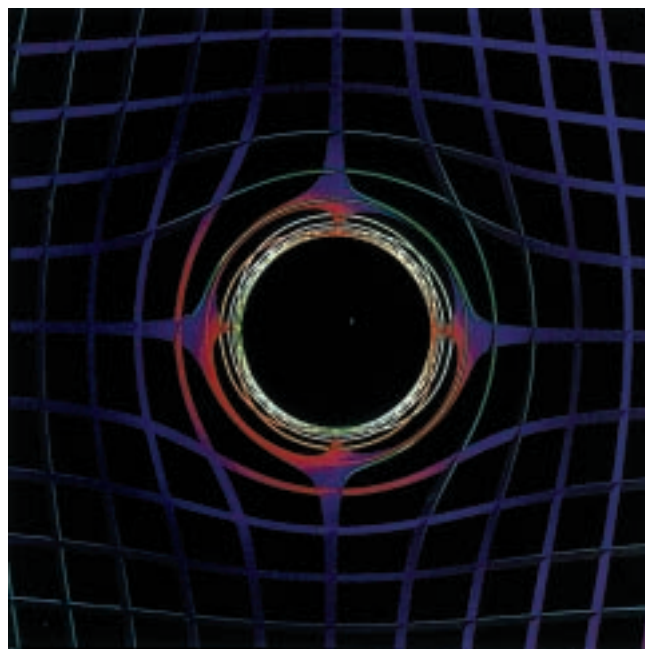
Les rayons lumineux issus d'un objet éloigné sont déviés par le champ gravitationnel du trou noir quand ils passent à sa proximité, tout comme la lumière d'une étoile est déviée par le Soleil. Un trou noir déforme l'image d'un corps céleste qui se trouve, du point de vue de l'observateur, derrière ce trou. Ces effets optiques sont comparables à ceux d'une lentille dans l'optique géométrique, et l'on assimile les trous noirs à des lentilles gravitationnelles.

Isaac Newton, qui avait découvert la loi de la gravitation en 1666, subodorait que la lumière pouvait être déviée par la masse d'un corps. Dans les années 1930, Einstein reconnut qu'un objet massif dévierait la lumière d'une étoile située derrière cet objet, de telle sorte que l'étoile apparaîtrait non pas comme un point lumineux, mais comme un anneau entourant l'image de cette étoile en l'absence de l'objet massif.

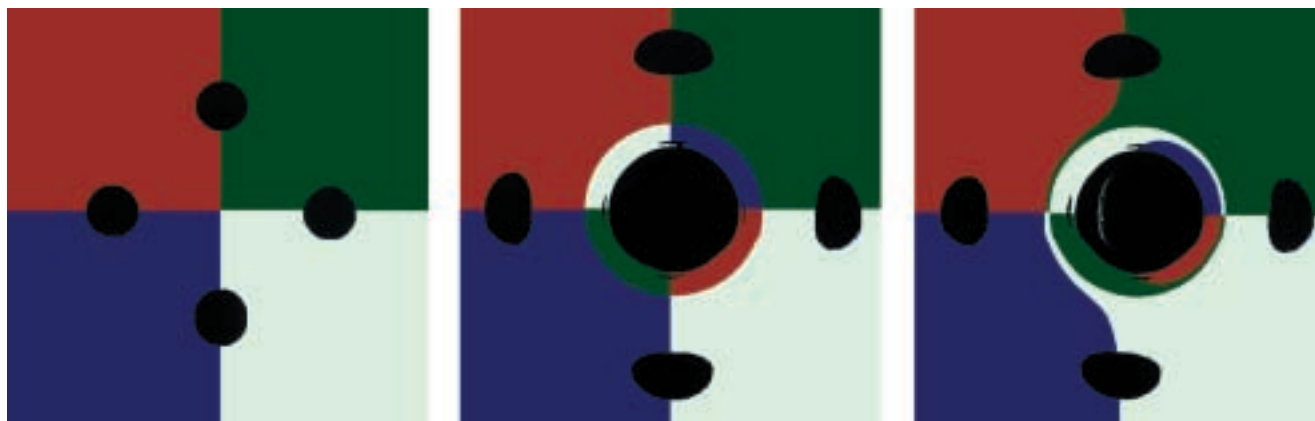
Ce mirage ne dépend que de la masse de l'objet qui dévie les rayons



10. QUADRILLAGE RÉGULIER DE L'ESPACE dans la géométrie de Minkowski (*à gauche*). La répartition des couleurs a été choisie de manière à donner l'impression que les barreaux de la grille, de section triangulaire, sont éclairés par un faisceau de lumière émis par l'observateur. Les parties des barreaux dont la normale est perpendiculaire



au rayon lumineux réfléchissent peu de lumière et paraissent sombres, contrairement aux parties des barreaux de la grille qui interceptent les rayons lumineux et qui apparaissent plus claires. Un trou noir statique, qui se trouve entre la grille et un observateur (géométrie de Schwarzschild), déforme l'espace-temps (*à droite*).

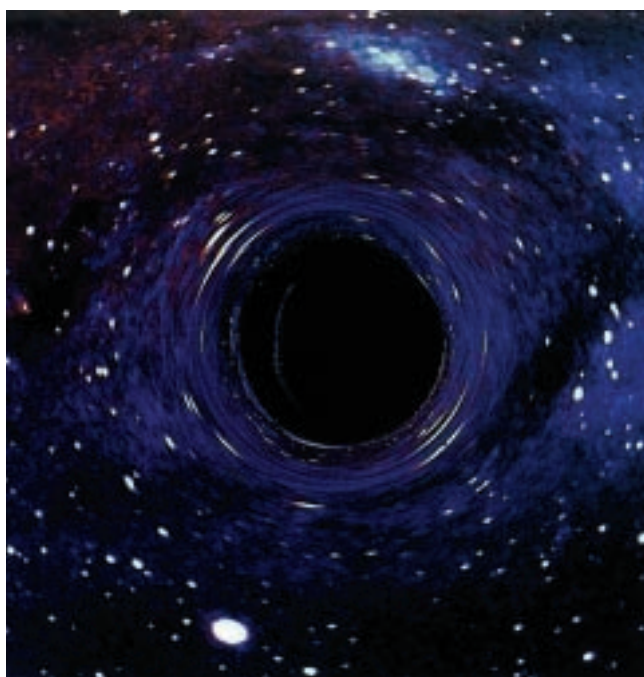


11. UN TROU NOIR agit comme une lentille gravitationnelle. Pour simuler son effet sur un arrière-plan, on divise celui-ci en quatre zones colorées différemment. Les quatre points noirs servent de repères (à gauche). Un trou noir qui se trouverait entre cette surface et l'ob-

servateur déformerait fortement l'image de la surface. La première simulation (au centre) résulte de la présence d'un trou noir statique (géométrie de Schwarzschild), la seconde (à droite), est le résultat d'un trou noir en rotation (géométrie de Kerr).



12. PHOTOGRAPHIE DU NUAGE D'ANDROMÈDE, galaxie voisine de notre Voie lactée (à gauche). Un trou noir qui se trouverait dans l'axe de visée de l'observateur agirait comme une lentille gravita-



tionnelle, et les images presque ponctuelles des étoiles se déformeraient pour ressembler à des taches circulaires ou «anneaux d'Einstein» (à droite, simulation en géométrie de Kerr).

lumineux, et les galaxies massives sont aussi des lentilles gravitationnelles. La répartition des étoiles et des nuages de gaz des galaxies fait que l'on obtient généralement plusieurs images partielles et plus ou moins intenses de la source de lumière située à l'arrière-plan. En 1979, Dennis Walsh, de l'Université de Manchester, et ses collègues Robert Carswell et Ray Weyman remarquèrent que deux quasars angulairement très proches présentaient des spectres presque identiques. Les chercheurs n'avaient pas découvert de jumeaux cosmiques, mais la première lentille

gravitationnelle : si le quasar paraît double, c'est que sa lumière est déviée par une galaxie interposée entre lui et la Terre. Nous connaissons aujourd'hui de nombreux exemples de len-

tilles gravitationnelles. La comparaison de ces observations et des simulations sur ordinateur confirment que les simulations sont conformes à la réalité.

Norbert QUIEN, Rainer WEHRSE et Christoph KINDL travaillent à la simulation sur ordinateur de trous noirs, à l'Université de Sarrebruck, en Allemagne.

Banesh HOFFMANN, *Histoire d'une grande idée, la relativité*, collection Regards sur la Science, éditions Pour la Science, 1985.

J.D. FOLEY, A. van DAM, S.K. FEINER et J.F. HUGHES, *Computers Graphics*, Addison Wesley, 1990.

J.-P. LUMINET, *Les trous noirs*, éditions du Seuil, 1992.

J. FRANK, A. KING et D. RAINE, *Accretion Power*, Cambridge University Press, 1992.

Vésicules et trafic intracellulaire

JAMES ROTHMAN • LELIO ORCI

Une collaboration transatlantique découvre la machinerie qui assure la formation des vésicules, ces conteneurs minuscules et indispensables qui stockent des protéines, puis les transportent là où elles sont nécessaires dans la cellule.

Toutes les cellules à noyau, qu'elles appartiennent aux colonies de levures, aux plantes ou à l'organisme humain, ont une organisation interne qui ressemble à celle d'une ville bien gérée. Dans les deux cas, le fonctionnement général résulte d'une coordination entre des services spécialisés. Dans les cellules, ces «services» sont délimités par des membranes et se nomment les organites.

Une visite rapide des services les plus importants d'une «cité» cellulaire commence à la membrane externe. Cet organite s'apparente aux murs d'enceinte percés de quelques portes qui entouraient autrefois les villes : la membrane contrôle l'apport de nourriture et d'autres matériaux, ainsi que l'excrétion de substances fabriquées dans la cellule. À l'intérieur des cellules, un autre service crucial joue le rôle d'une grande usine : c'est ici, dans le réticulum endoplasmique, que sont produites de nombreuses protéines, les principales molécules actives des cellules. Après leur synthèse, ces protéines sont transportées vers un autre service, l'appareil de Golgi, où elles sont modifiées (souvent par l'addition de sucres), puis expédiées vers d'autres destinations, à l'intérieur ou à l'extérieur de la cellule. Dans la cité cellulaire, l'appareil de Golgi est un centre de tri.

Les cellules comportent également leurs centres de recyclage, les lysosomes, qui cassent les protéines trop vieilles, ainsi que d'autres molécules, afin de récupérer leurs constituants.

Les lysosomes détruisent et recyclent également des substances externes, qui ont été captées par la cellule.

Les cellules disposent bien sûr d'un système de transport afin d'acheminer les protéines entre les différents services. Ce système est comparable aux zones de fret des aéroports : toutes les marchandises ayant une même destination sont rassemblées dans un même conteneur, une vésicule de transport, qui ne s'ouvre qu'à destination. Les cellules produisent plusieurs sortes de vésicules de transport, chacune étant spécialisée dans une voie d'expédition intracellulaire ou un type de cargaison ; elles produisent également des vésicules de transport qui stockent des substances indispensables à la communication intercellulaire (des neuromédiateurs ou des hormones, l'insuline par exemple) ; la cargaison est déversée à l'extérieur des cellules quand parvient un signal spécifique.

À l'évidence, les vésicules de transport sont indispensables au bon fonctionnement des cellules et des individus. Pendant des années, néanmoins, on a ignoré comment elles naissent. Récemment, avec nos collègues, nous avons réussi à préciser plusieurs aspects moléculaires de leur formation. Outre leur intérêt intrinsèque, ces résultats pourraient avoir des applications médicales : les cellules tumorales, par exemple, ne peuvent se multiplier que si leurs vésicules de transport fonctionnent correctement ; en conséquence, toute substance inhibant leur

formation devrait augmenter l'effet des médicaments anticancéreux.

Notre aventure illustre bien la stratégie de la biologie cellulaire actuelle : elle se fonde sur la microscopie (qui a révélé l'existence de vésicules de transport) et elle doit la finesse de son analyse à la biochimie (qui a détaillé de nombreuses réactions moléculaires intervenant dans la formation des vésicules). Elle éclaire également le fonctionnement de la recherche scientifique. Ceux qui connaissent mal la science considèrent souvent les découvertes comme le résultat de processus impersonnels, purement intellectuels, où la logique trouve limpidement la solution des problèmes. Ils ignorent ainsi le rôle que jouent les erreurs, les coups de chance inattendus et l'acharnement opiniâtre. Et les publications scientifiques ne montrent jamais le plaisir de «la chasse» ! Une grande part du nôtre est d'avoir travaillé en étroite collaboration, malgré l'océan Atlantique qui nous séparait et ne nous permettait que des entrevues annuelles.

Qui êtes-vous donc ?

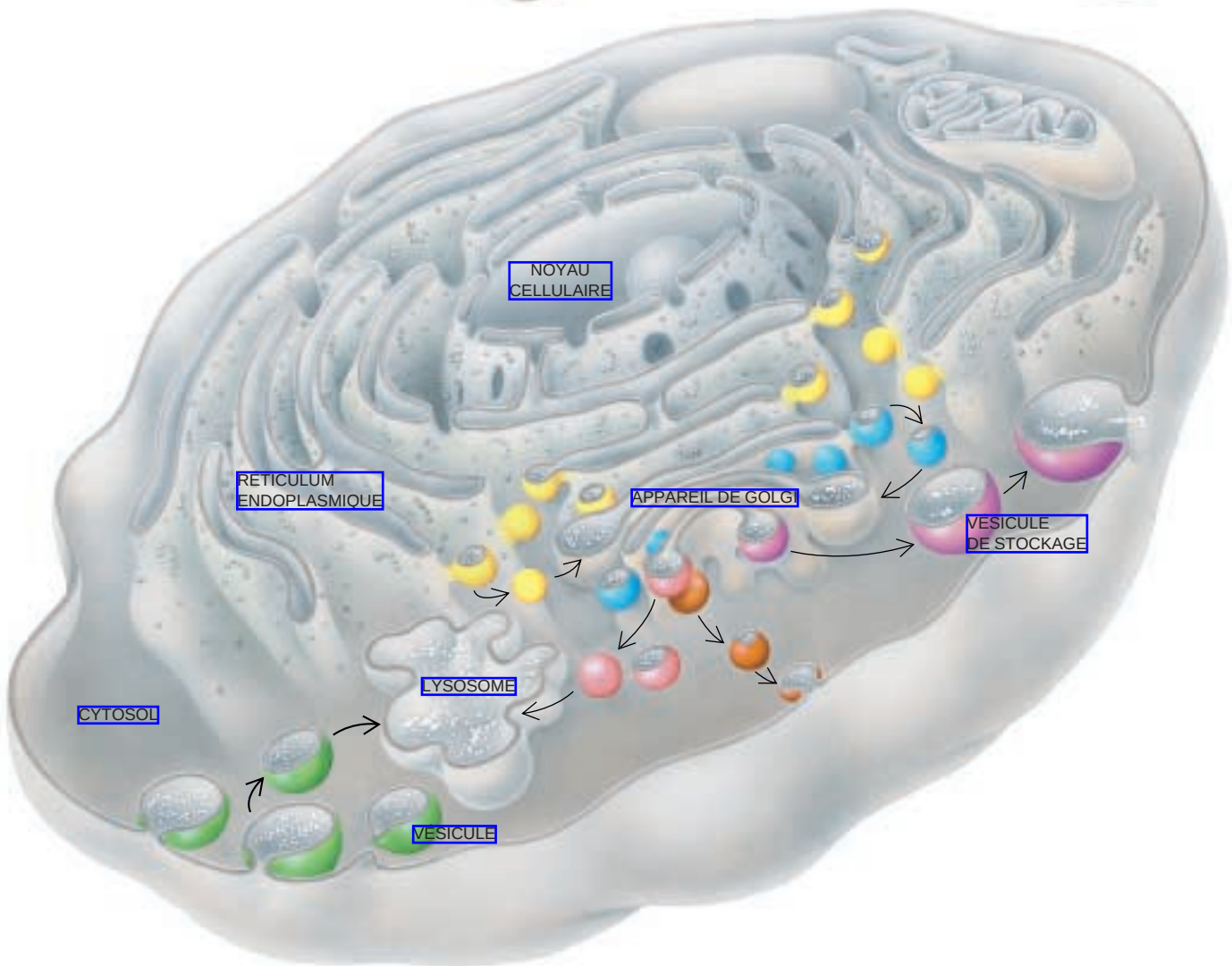
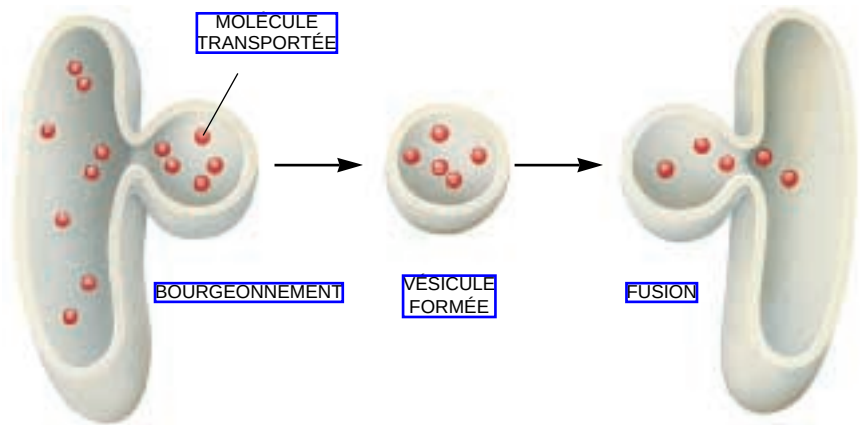
Avant le début de notre collaboration, vers le milieu des années 1980, l'examen au microscope de coupes de cellules entières avait déjà identifié quelques étapes de base du transport des protéines par des vésicules. Grâce aux travaux effectués dans les années 1960 par George Palade (prix Nobel de physiologie et de médecine en 1974), les biologistes savaient que ces

vésicules naissaient par bourgeonnement à partir de la membrane des organites : le bourgeonnement engendrait de petites poches qui se détachaient de l'organite, puis migraient dans le cytosol (ce milieu riche en protéines, où flottent les organites) et venaient se fixer sur la membrane extérieure d'un autre organite. Puis la membrane de chaque vésicule fusionnait avec celle de l'organite cible, tandis que les protéines contenues dans la vésicule se déversaient à l'intérieur de la cible. Autrement dit, une fois à destination, le « conteneur » s'ouvrait et déchargeait sa cargaison.

Afin d'élucider les mécanismes détaillés du bourgeonnement, nous

voulions l'étudier *in vitro* : hors d'une cellule, sans éléments étrangers. Avec un système de ce type, nous pouvions manipuler les éléments de la

« machine » à fabriquer des vésicules afin de déterminer quelles étaient les premières molécules à intervenir, puis les suivantes, etc. Toutefois personne



1. LES CELLULES regorgent de vésicules de transport. Certaines (*en jaune*) acheminent des protéines du réticulum endoplasmique, où elles sont fabriquées, vers l'appareil de Golgi, où elles sont modifiées. D'autres (*en bleu*) leur font faire la navette entre les divers compartiments de l'appareil de Golgi. Trois sortes de vésicules sont issues de cet appareil. Les unes (*en orange*) libèrent immédiatement des protéines hors de la cellule. D'autres – les vésicules sécrétrices (*en rose foncé*) – relarguent leur contenu

lorsqu'un signal leur en est donné. Une troisième catégorie (*en rose clair*) conduit les enzymes digestives jusqu'à des compartiments nommés lysosomes, qui dégradent des molécules variées, y compris celles que d'autres vésicules (*en vert*) ont fait entrer dans la cellule. Les vésicules naissent par bourgeonnement à partir de la membrane d'un organite (*schéma supérieur*) ; elles déchargent leur contenu (*en rouge*) par fusion de leur membrane avec celle de l'organite cible.

n'avait encore obtenu un tel système «acellulaire», jusqu'à ce que l'un d'entre nous (J. Rothman) en mette un au point, en 1980.

En 1984, J. Rothman et ses collègues publièrent un article où ils annonçaient que leur système acellulaire permettait de recréer la formation des vésicules que l'on observait dans les cellules entières : ils avaient provoqué le bourgeonnement de vésicules de transport à partir des membranes de l'appareil de Golgi, un organite composé de plusieurs compartiments. La plupart des vésicules issues de ces membranes servent de navettes entre les divers compartiments de l'appa-

reil de Golgi ; ce sont elles qui furent observées. D'autres vésicules distribuent des protéines vers des sites plus éloignés (voir *L'appareil de Golgi*, par James Rothman, *Pour la Science*, novembre 1985).

C'est alors que commença notre collaboration, de façon mémorable. Moins d'une semaine après la parution de l'article en question, en fin d'après-midi, le téléphone sonna dans le laboratoire de J. Rothman. Ce dernier, interrompant son travail, prit la communication, mais avant qu'il n'ait dit «allô», une voix grave se lança, en anglais avec un accent italien, dans un monologue soutenu, rapide et totale-

ment incompréhensible. J. Rothman, qui n'est pourtant pas avare de discours prolongés, était réduit au silence par ce flot. Après de longs instants, perplexe, il laissa son interlocuteur monologuer et reprit son travail. Après quelques instants encore, où les seuls mots perceptibles étaient «collaboration» et «nous serons confrères», J. Rothman, à bout, s'écria : «Mais qui êtes-vous donc?»

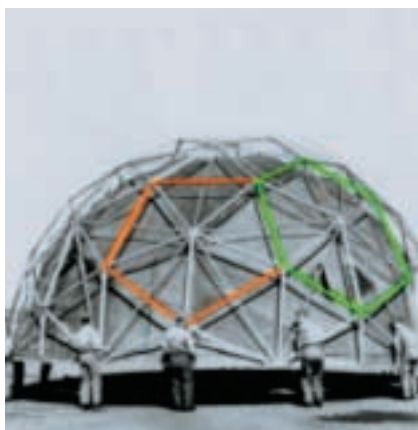
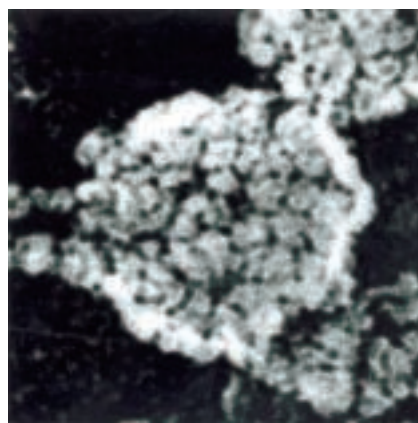
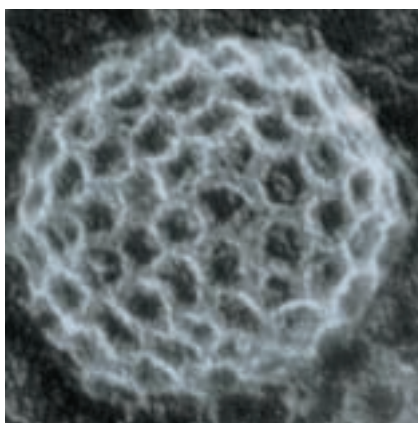
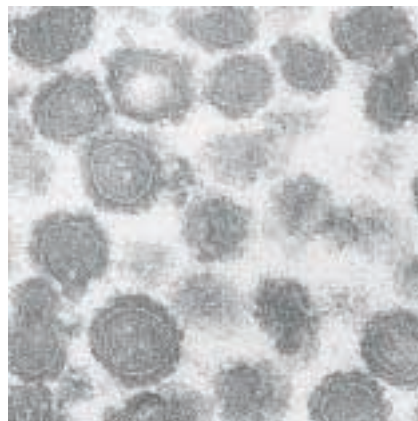
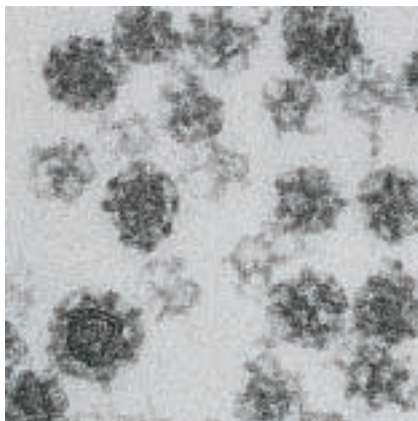
La voix marqua une pause, puis annonça très calmement et très distinctement : «Je suis Lelio Orci et j'enseigne à l'Université de Genève.»

Naturellement, J. Rothman reconnut immédiatement ce nom : L. Orci était un chercheur bien connu en microscopie électronique. Il présenta ses excuses, tandis que L. Orci parla plus lentement, et il s'ensuivit une conversation longue et productive, alors qu'il était déjà largement plus de minuit à Genève.

Idée fausse, travail fructueux

Quelques semaines plus tard, J. Rothman était à Genève pour établir un projet qui utiliserait les techniques de microscopie genevoises afin de déterminer si les vésicules qui bourgeonnaient de l'appareil de Golgi, dans les extraits acellulaires, étaient douées de propriétés particulières. Nous voulions notamment savoir si ces vésicules étaient recouvertes d'une pellicule épaisse et enveloppante, essentiellement composée d'une protéine fibreuse nommée clathrine.

Nous nous posions cette question, car on savait que certaines vésicules de transport possédaient des enveloppes de ce type, le seul connu à l'époque (les vésicules à enveloppe de clathrine véhiculent des protéines de l'extérieur de la cellule vers les lysosomes, où elles sont dégradées ; elles résultent d'un bourgeonnement de la membrane externe de la cellule, vers le cytosol). Toutefois, en l'absence d'un système acellulaire, on n'avait pas pu décrypter ce mécanisme de bourgeonnement. Si L. Orci parvenait à confirmer que les vésicules originaires de l'appareil de Golgi étaient enveloppées de clathrine, J. Rothman pourrait alors entreprendre immédiatement des études biochimiques dans son système acellulaire, afin d'établir un modèle de formation de ces vésicules.



2. COMPARAISON DES ENVELOPPES de clathrine et de protéines COP. On trouve des enveloppes de clathrine principalement sur des vésicules qui apportent aux lysosomes des substances provenant de l'extérieur de la cellule. Des images de microscopie électronique montrant une coupe (*en haut à gauche*) ou la surface (*au centre à gauche*) de ces vésicules révèlent l'organisation de l'enveloppe. Sa constitution en hexagones et en pentagones rappelle celle d'une structure architecturale nommée «dôme géodésique» (*en bas à gauche*). Des enveloppes composées de protéine COP (*à droite, en haut et au centre*) recouvrent les vésicules de transport qui bourgeonnent à partir de l'appareil de Golgi. Leur structure est très différente des enveloppes de clathrine.

Un premier modèle avait été proposé vers 1960, à partir d'études de Toku Kanaseki et de Ken Kadota, de l'Université d'Osaka. En 1969, T. Kanaseki et K. Kadota purifièrent des vésicules enveloppées et découvrirent que la structure de ces enveloppes avait une régularité étonnante. L'explication de cette régularité apparut six ans plus tard, lorsque Barbara Pearse, à Cambridge, découvrit que cette enveloppe était principalement composée de plusieurs exemplaires d'une protéine qu'elle nomma clathrine. T. Kanaseki et K. Kadota comprirent ensuite que le bourgeonnement provenait de cette protéine : l'élaboration de la « cage » de clathrine, probablement à partir d'éléments membranaires, déformerait la membrane sous-jacente (qui est une structure très malléable) pour constituer, une fois détachée de la membrane d'origine, la fameuse vésicule enveloppée.

Vers 1984, ce modèle simple avait montré ses limites. Lorsque J. Rothman obtint un bourgeonnement dans ses tests *in vitro*, il observa que ce processus ne pouvait pas se produire à partir des membranes isolées seules : le cytosol était nécessaire, ainsi qu'une source d'énergie, ce qui indiquait que l'enveloppe provenait de substances

contenues dans le cytosol. Toutefois le modèle originel de T. Kanaseki et K. Kadota était attrayant et méritait d'être testé.

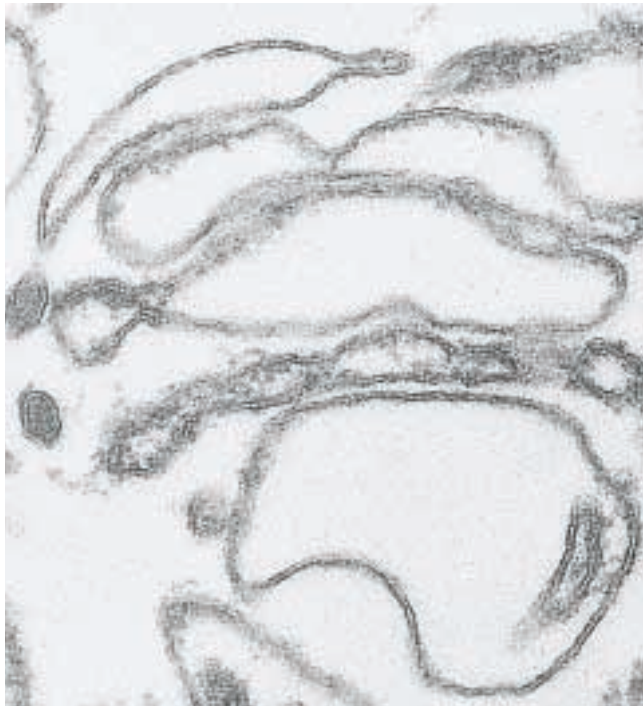
Peu après le retour de J. Rothman à Stanford, l'un de ses étudiants commença à donner suite au projet : Benjamin Glick forma, *in vitro*, des vésicules de transport en incubant l'appareil de Golgi en présence de cytosol et d'une source d'énergie. Il envoya alors à Genève les échantillons qu'il avait prélevés pour une analyse au microscope. En quelques jours, l'équipe genevoise détermina que les vésicules issues de l'appareil de Golgi étaient effectivement recouvertes d'une enveloppe, mais d'un type complètement différent des enveloppes de clathrine : les anticorps spécifiques contre la clathrine ne la

reconnaissaient d'ailleurs pas. Ainsi les cellules utilisaient au moins deux classes de vésicules de transport. On sait aujourd'hui qu'il y a encore d'autres sortes de vésicules de transport et qu'à chacune correspond une enveloppe distincte.

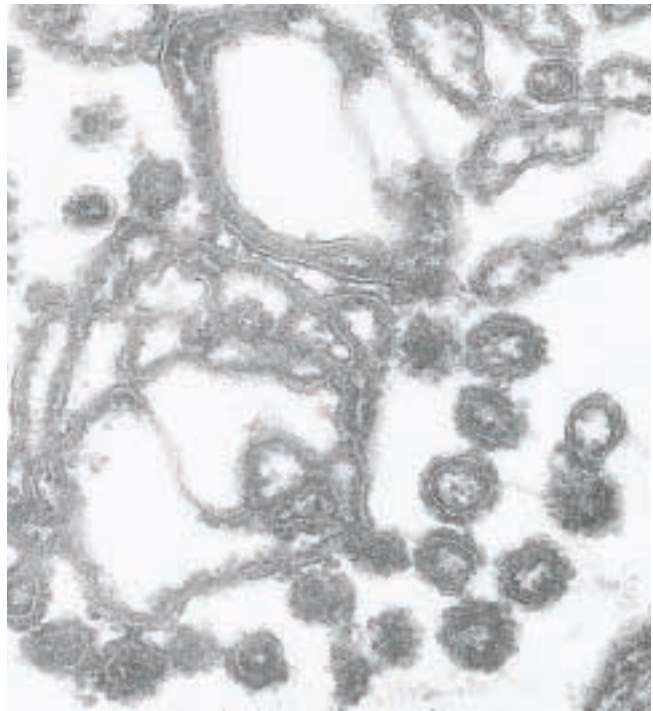
Cette première observation montre l'intérêt des erreurs : notre hypothèse erronée – la présence d'enveloppe de clathrine autour des vésicules de l'appareil de Golgi – nous a amenés à faire une expérience qui nous a détournés des vésicules recouvertes de clathrine et nous a conduits vers une nouvelle voie de recherche qui a permis d'élucider la formation des vésicules de transport en général. Entre-temps, la compréhension des mécanismes de formation des vésicules recouvertes de clathrine a pro-



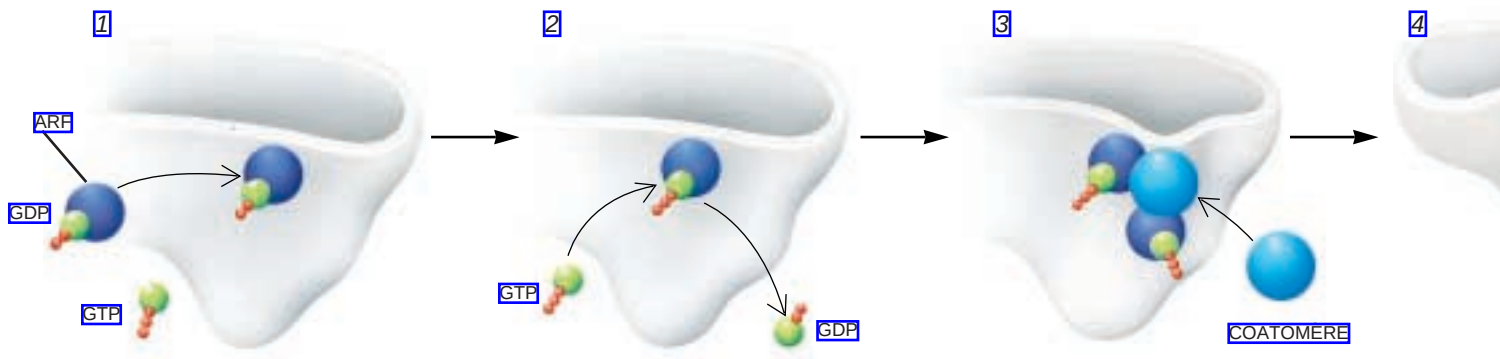
3. Deux vésicules COP en cours de bourgeonnement, à partir d'une membrane de l'appareil de Golgi.



4. LA MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE a révélé que le bourgeonnement des vésicules COP est commandé par les coatomères (voir la figure 5). Lorsque seule la protéine ARF est fixée aux membranes de l'appareil de Golgi, aucun bourgeonnement ne se produit ; les membranes



restent planes (micrographie de gauche). En revanche, la liaison de coatomères à ces membranes, déjà pourvues de molécules d'ARF, déclenche le bourgeonnement de vésicules enveloppées (micrographie de droite).



5. LA FORMATION D'UNE VÉSICULE COP sur une membrane de l'appareil de Golgi est bientôt suivie de l'élimination de l'enveloppe. La vésicule commence à se développer (1) quand une protéine, l'ARF, liée à une très petite molécule nommée GDP, adhère à la membrane. Bientôt (2) une enzyme remplace la GDP par la GTP, modification qui permet à l'ARF de recruter un complexe de protéines : le coatomère

(3). La liaison de l'ARF et de coatomères provoque la formation d'un bourgeon (4), puis son détachement (5) de la membrane. La vésicule ne fusionne ensuite avec son organe cible qu'après l'élimination de son enveloppe, ce qui se produit lorsque la conversion de la GTP en GDP, par libération d'un groupe phosphate (partie droite de 5), provoque le détachement des molécules d'ARF et des coatomères (6 et 7).

gressé plus lentement ; il y a peu de temps que l'on a obtenu un système acellulaire pour les étudier.

Pour comprendre comment se forment les vésicules issues de l'appareil de Golgi, nous devons d'abord connaître la composition de leur enveloppe. Cette recherche dura plusieurs années. Avant tout, il nous fallait isoler un échantillon pur de ces sphères minuscules, ce qui était alors une tâche redoutable. Après bien des déboires, en 1989, Vivek Malhotra et Tito Serafini en isolèrent une quantité infime, mais suffisante pour des analyses qui démontrèrent que l'enveloppe était composée de huit types de protéines que nous avons nommées protéines COP (de l'anglais *COat Protein*, c'est-à-dire «protéine d'enveloppe»).

Un nouveau type d'enveloppe

Pour clarifier le mécanisme du bourgeonnement, nous avons alors étudié les protéines COP et leurs interactions. En 1990, nous avons d'abord découvert que sept des huit types de protéines COP forment un gros complexe avant de se fixer en bloc à la membrane de Golgi. Nous avons nommé coatomères ces complexes ; les protéines de la huitième sorte se fixaient indépendamment. Cette découverte simplifiait les choses : nous pouvions dès lors analyser les étapes principales du bourgeonnement sans devoir étudier séparément chaque protéine de l'enveloppe.

Puis la chance intervint, et nos esprits, préparés à la recevoir, en tirèrent parti. Un soir de 1990, dans le labo-

ratoire de J. Rothman, Gerard Waters était en train d'examiner ses résultats après avoir essayé de purifier une substance qui est nécessaire pour que les vésicules de transport fusionnent avec les membranes des organites cibles. Par pure coïncidence, T. Serafini passait par là et, en regardant par-dessus l'épaule de G. Waters, il fut stupéfait de ce qu'il aperçut.

Expliquons brièvement pourquoi. Pour purifier une protéine, on sépare les composants d'un extrait cellulaire en différents groupes, ou fractions, selon leurs propriétés physiques et chimiques, puis on teste chaque fraction à la recherche de l'activité attendue (on examine, dans notre cas, si la fraction provoque la fusion d'une vésicule et d'une membrane). Puis on subdivise les fractions actives et l'on teste à nouveau les fractions de fractions. Généralement on élimine les fractions inactives. On obtient finalement un échantillon ne contenant que la protéine douée de l'activité biologique considérée : une protéine purifiée.

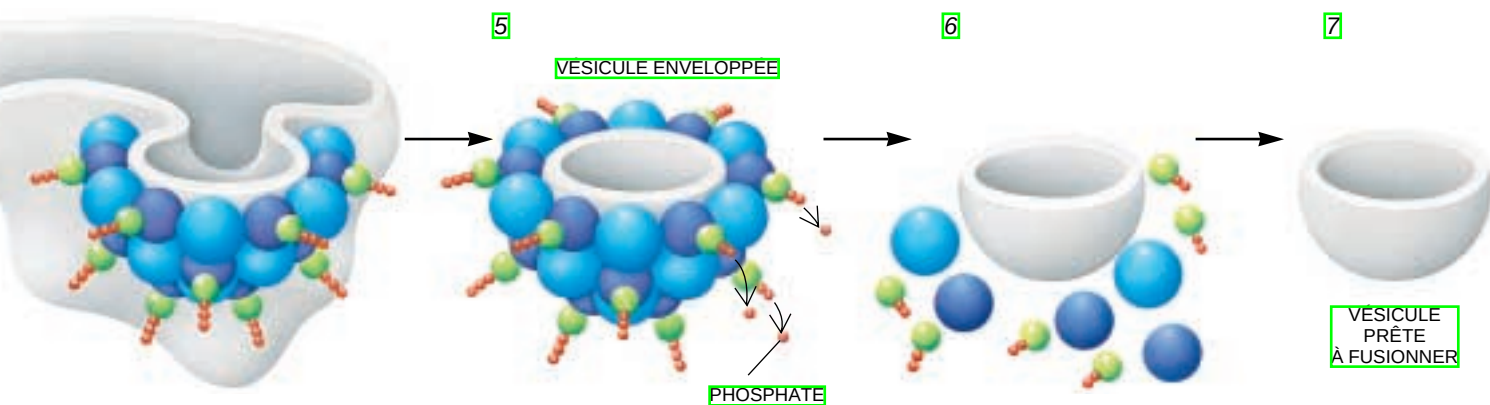
Par acquit de conscience, G. Waters venait d'analyser encore une fois le contenu protéique d'une fraction qui n'était pas active et que, depuis des mois, il éliminait parce qu'elle semblait inutile. C'est précisément ce contenu protéique qui avait frappé T. Serafini, tant il ressemblait à ce que lui-même et V. Malhotra avaient précédemment identifié comme les protéines COP.

Rapidement l'analyse montra que la fraction inactive était, en effet, presque essentiellement constituée de sept protéines COP, étroite-

ment associées. Nous savions qu'elles étaient associées, car cette fraction résistait obstinément à toute tentative de fractionnement supplémentaire. C'était un comble ! Tandis qu'une partie du laboratoire de J. Rothman s'évertuait à isoler des vésicules enveloppées (afin d'obtenir des quantités infimes des protéines de l'enveloppe), l'autre possédait ces mêmes protéines à foison, et les jetait ! Grâce à la vigilance de T. Serafini et de G. Waters, ce gaspillage prit fin, on admit l'existence du coatomère et des années d'efforts furent épargnées. Nous avons maintenant à notre disposition une source intarissable des protéines du coatomère.

Nous nous sommes alors intéressés à la huitième protéine. Pour diverses raisons, nous soupçonnions qu'elle correspondait à une molécule dénommée ARF (pour *Adenosine-diphosphate Ribosylation Factor*, ou «facteur de ribosylation de l'adénosine diphosphate»). Cette molécule fut décrite pour la première fois par Richard Kahn et Alfred Gilman, de l'Université du Texas, et l'on savait qu'elle permettait à la toxine du choléra de provoquer la maladie. Toutefois son rôle «normal» chez l'individu demeurait un mystère. Grâce à R. Kahn, qui nous donna des anticorps spécifiques contre cette molécule, nous avons établi que la huitième protéine COP était bien l'ARF.

Après six années de travail acharné, nous avons ainsi toutes les protéines de l'enveloppe à l'état pur et nous étions enfin prêts à décrypter le mécanisme du bourgeonnement. Nous avons commencé ce projet en 1991,



après le déménagement du laboratoire de J. Rothman au Centre de recherche sur le cancer Memorial Sloan-Kettering, à New York, et nous avons énormément progressé en deux années seulement.

Le bourgeonnement est dévoilé

Nous nous sommes d'abord demandés si le coatomère et l'ARF étaient les seules protéines nécessaires au bourgeonnement des vésicules COP issues de l'appareil de Golgi : d'autres protéines intervenaient-elles au moment du bourgeonnement ? Un premier travail a montré que non. Bien que nous ayons initialement utilisé des extraits de cytosol brut, contenant plusieurs milliers de protéines différentes, les méthodes de la biochimie ont indiqué que le coatomère et l'ARF faisaient le travail toutes seules.

Puis nous avons voulu ajouter les protéines une par une, et non toutes ensemble, afin de déterminer les rôles respectifs de chacune. Nous avons observé que l'ARF se fixait à la membrane de l'appareil de Golgi en l'absence du coatomère, puis attachait ce dernier à la membrane. Ainsi le coatomère ne s'associe pas directement à l'appareil de Golgi. La microscopie électronique révéla que, lorsque l'ARF est fixé seul à la membrane de l'appareil de Golgi, celle-ci demeure plane, alors que l'ajout de coatomère et d'ARF provoque le bourgeonnement d'une vésicule. Ainsi l'ARF et le coatomère ont des rôles distincts dans la formation des vésicules de transport : le coatomère commande la déformation de la membrane et le bourgeonnement, tandis que l'ARF déclenche ces événements, en signifiant au coatomère où et quand faire son travail.

Nous avons ensuite progressivement élucidé des étapes intermédiaires du bourgeonnement. L'ARF, qui flotte dans le cytosol, est normalement reliée à une molécule de guanosine diphosphate (GDP) : une molécule composée d'une base azotée, d'un sucre et de deux groupes phosphate. Lorsque le complexe du GDP relié à l'ARF rencontre l'appareil de Golgi, une enzyme membranaire remplace le GDP par une molécule apparentée provenant du cytosol, la guanosine triphosphate (GTP), qui porte trois groupes phosphate. Cette modification est doublement importante : d'une part, seule l'ARF associée à la GTP peut s'arrimer solidement à la membrane, ce qui permet ensuite au coatomère de se lier ; d'autre part, la fixation de la GTP sur l'ARF apporte une énergie qui est importante pour la formation de la vésicule.

Comment s'effectue alors le bourgeonnement ? Chaque coatomère s'accroche à la membrane par une ou plusieurs molécules d'ARF ; leur nombre exact n'est vraisemblablement ni constant ni important. Nous pensons (mais nous n'en avons pas encore la preuve) que ces complexes s'enchaînent alors régulièrement, les uns à côté des autres, jusqu'à former une cage analogue à celles de clathrine sur la membrane. Progressivement ce réseau s'accroît et s'incurve, transformant en vésicule la partie de membrane qui est emprisonnée dans l'enveloppe. L'émergence des vésicules COP résulte ainsi du même mécanisme que celui qui engendre les vésicules recouvertes de clathrine. Pour qu'une vésicule bourgeonne, une nouvelle enveloppe doit s'élaborer, pièce par pièce, à partir de constituants du cytosol ; en outre, l'assemblage est commandé par l'ARF et nécessite de l'énergie apportée par la GTP.

Bien que l'enveloppe soit primordiale pour le bourgeonnement des vési-

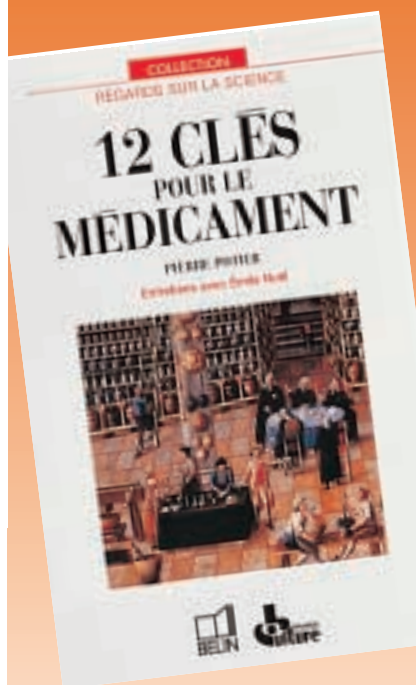
cules COP, elle empêche ultérieurement la fusion de la membrane de la vésicule avec celle de l'organite cible ; la vésicule doit donc perdre son enveloppe pour fusionner avec sa cible et y déverser son contenu. Ce « déshabillage » se fait par le mécanisme inverse de celui qui élabore l'enveloppe : dans une vésicule portant encore son enveloppe, les molécules d'ARF restent associées à la GTP. Bientôt pourtant, un groupe phosphate de la GTP est coupé, formant la GDP et libérant de l'énergie. De ce fait, les molécules ARF perdent leur affinité pour la membrane vésiculaire et s'en détachent. Les coatomères se dissocient également, puisque l'ARF est indispensable à leur liaison ; ils laissent derrière eux une vésicule « dévêtue », libre de fusionner avec un organite cible. Ainsi, au cours du bourgeonnement, la cellule installe quelques « bombes GTP à retardement » dans l'enveloppe, à la suite de quoi les charges éclatent pour éliminer cette enveloppe.

Comme celle-ci se désagrège avant que la vésicule n'atteigne sa destination, elle ne sert manifestement pas à diriger la vésicule vers sa cible. On suppose plutôt que la membrane vésiculaire contient d'autres protéines qui se chargent de cette fonction et qui attirent également des protéines supplémentaires nécessaires à la fusion proprement dite des vésicules avec la membrane de leur cible.

Un mécanisme commun

Toutes les vésicules de transport se forment-elles comme les vésicules COP ? On l'a pensé quand des collègues de J. Rothman ont découvert que l'élaboration de l'enveloppe de clathrine est également déclenchée par la fixation, sur les membranes, de molécules d'ARF associées à de la GTP. Partis de la clathrine, nous y revenons.

Entretiens avec Émile Noël



12 CLÉS POUR LE MÉDICAMENT

La plupart des médicaments actuels sont d'origine naturelle. Découverts le plus souvent par hasard, certains sont hérités du passé, d'autres sont plus récents. La quête de nouveaux produits toujours plus efficaces et mieux tolérés reste l'un des objectifs de la recherche de pointe.

Code : 2020 215 pages – 75 F



Bon de commande en p. 98

En réalité, la plupart des vésicules observées au microscope dans les cellules ne semblent pas être enveloppées : faut-il en conclure que le phénomène de bourgeonnement que nous avons décrit ne concerne que les vésicules COP ou les vésicules à clathrine ? Bien sûr que non. Cette absence fréquente d'enveloppe est simplement due au fait que l'enveloppe se désagrège rapidement après le bourgeonnement, rendant difficile sa visualisation par les méthodes classiques d'observation. C'est ainsi que, dans l'histoire de la découverte des vésicules, on a souvent supposé que leur formation survenait par un mécanisme différent de celui expliqué ici... jusqu'au moment où un système acellulaire de bourgeonnement était mis au point et permettait de surprendre l'état transitoirement « habillé » de la vésicule.

Ainsi les vésicules qui transportent des protéines du réticulum endoplasmique vers l'appareil de Golgi sont les dernières en date pour lesquelles on a récemment trouvé une enveloppe. Randy Schekman, de l'Université de Berkeley, L. Orci et leurs collaborateurs respectifs ont montré que, dans ce cas, le rôle de l'ARF est tenu par une molécule analogue et qui déclenche le bourgeonnement. Un autre ensemble de protéines, nommées protéines COP II, remplace le coatomère.

Aujourd'hui il est quasi certain que toutes les cellules à noyau utilisent le même principe de formation des vésicules de transport. Ce système est si efficace qu'il a été conservé lorsque des espèces très simples, unicellulaires, ont évolué et formé des êtres pluricellulaires plus complexes. L'ARF ou une molécule apparentée déclenche la formation de l'enveloppe en captant

de la GTP et en se fixant sur la membrane. Cet initiateur recrute ensuite des composants supplémentaires, qui s'enchaînent en un dôme sphérique. Ainsi une petite partie de la membrane bourgeonne sous la forme d'une vésicule recouverte par une enveloppe. Ultérieurement les molécules de GTP favorisent l'élimination de l'enveloppe, pour laisser la vésicule fusionner avec un organelle cible.

Si l'enveloppe n'est importante que pour le bourgeonnement, pourquoi les cellules en utilisent-elles plusieurs sortes ? Sans doute parce que l'enveloppe sélectionne le contenu des vésicules. Parfois les protéines transportées se trouvent dans la membrane, directement fixées sur l'enveloppe. Parfois la « cargaison » est associée à l'enveloppe par un intermédiaire – un récepteur – qui plonge dans la membrane. L'emploi d'enveloppes différentes permettrait d'« embarquer » différentes cargaisons à partir d'un point de départ unique ou de compartiments différents.

D'autres questions restent ouvertes. On connaît mal, notamment, le mécanisme détaillé de la fixation de l'ARF ou des molécules analogues à la membrane, ou de l'ancrage aux protéines du coatomère. Certains lipides (des molécules de graisse) semblent aider l'ARF à capter le coatomère, et les protéines de transport pourraient participer à l'élaboration de l'enveloppe. Nous aimerions également mieux connaître les activités spécifiques des diverses sous-unités du coatomère. La biologie des vésicules a bien progressé, et il est apparu qu'aucune ville n'est aussi efficace que les cellules pour acheminer ses travailleurs de place en place.

James ROTHMAN dirige le Programme de biochimie et biophysique du Centre de recherche sur le cancer Memorial Sloan-Kettering. Lelio ORCI est directeur du Département de morphologie et professeur d'histologie et de biologie cellulaire à l'Université de Genève.

L. ORCI, B.S. GLICK et J.E. ROTHMAN, *A New Type of Coated Vesicular Carrier That Appears Not to Contain Clathrin : Its Possible Role in Protein Transport within the Golgi Stack*, in *Cell*, vol. 46, n° 2, pp. 171-184, 1986.

M.G. WATERS, T. SERAFINI et J.E. ROTHMAN, «Coatomer» : A Cytosolic Protein Complex Containing Subunits of Non-

Clathrin-Coated Golgi Transport Vesicles, in *Nature*, vol. 349, pp. 248-251, 17 janvier 1991.

T. SERAFINI, L. ORCI, M. AMHERDT, M. BRUNNER, R.A. KAHN et J.E. ROTHMAN, *Coated Vesicles*, in *Cell*, vol. 67, n° 2, pp. 239-253, 18 octobre 1991.

J. OSTERMANN, L. ORCI, K. TANI, M. AMHERDT, M. RAVAZZOLA et J.E. ROTHMAN, *Stepwise Assembly of Functionally Active Transport Vesicles*, in *Cell*, vol. 75, n° 5, pp. 1015-1025, 3 décembre 1993.

J.E. ROTHMAN, *Mechanisms of Intracellular Protein Transport*, in *Nature*, vol. 372, pp. 55-63, 3 novembre 1994.



Algorithmes et Optimisation

**La Société de Calcul
Mathématique, S.A**

Des solutions algorithmiques efficaces au service des entreprises, dans tous les domaines :

- optimisation de stocks, de transports, de livraisons,
- mathématiques économiques, bancaires, financières ; algorithmes de codage,
- Calcul scientifique, Calcul Mathématique Assisté par Ordinateur.

La S.C.M. annonce :

Le logiciel de Calcul Mathématique Assisté par Ordinateur : *Simplex-AMP*, conçu par Jean-Michel Drouffe, est maintenant disponible dans sa version de base.

Fonctionnant sur PC équipé de Windows, cet *Assistant Mathématique*

est très simple d'emploi et est doté d'une interface très conviviale. Il réalise les opérations usuelles : définition d'une fonction, dérivations, opérations sur les polynômes, les matrices, trigonométrie, etc., et est doté d'un puissant langage de programmation.

Il peut être utilisé, dans l'enseignement, par les élèves à partir de la seconde et leurs professeurs, et dans l'industrie, par les techniciens et les ingénieurs. C'est à ce jour le seul logiciel satisfaisant aux normes conçues par la S.C.M. dans le cadre des études menées pour *Digital Equipment Corp.* Le logiciel, sous sa version de base, est disponible à un prix très bas : 300 F T.T.C.

L'*Institut de Calcul Mathématique*, en charge des opérations de recherche fondamentale liées aux activités de la S.C.M., est désireux de nouer des liens

- avec des équipes (industrielles ou universitaires), dans le but d'élaborer des programmes de recherche en commun,
- avec des chercheurs et des étudiants (niveau maîtrise et au-delà), désireux de participer aux programmes en cours ou à venir.

L'I.C.M. publie tous les trois mois la "Lettre de l'I.C.M.", forum d'in-

formation et de débats sur les orientations des mathématiques et leurs débouchés, destiné aux étudiants (niveau maîtrise et au-delà) et aux chercheurs. Au sommaire du numéro 2, daté avril 96 :

- Un dossier sur l'emploi en mathématiques, par Bernard Beauzamy,
- Thésard CIFRE, par Thierry Beley,
- L'emploi des jeunes en sciences : un point de vue «exotique», par Régis Caboz,
- L'enseignement de l'informatique, par Maurice Nivat.

Abonnement 100 F pour 4 numéros.

Tél : 47 07 52 92
Fax : 48 07 83 97

I.C.M. et S.C.M. :
37, rue Tournefort, 75005 Paris



Institut de Calcul Mathématique

La reconnaissance aérienne

DINO BRUGIONI

Dans les années 1950 et 1960, en pleine guerre froide, les services d'espionnage des deux camps surveillaient la planète en la photographiant par avion ou par satellite. La difficile interprétation des images obtenues a profondément influencé les relations internationales.

Chaque matin, depuis 35 ans, un agent de la CIA se rend à la Maison-Blanche avec un dossier qui contient une dizaine d'images et leur interprétation. Ces photographies aériennes et spatiales, choisies parmi le millier qui a été pris la veille, révèlent les points névralgiques du Globe. Certains hauts fonctionnaires reçoivent des documents similaires.

C'est le président Dwight Eisenhower qui, le premier, a utilisé les photographies de reconnaissance pour la surveillance des troupes stationnées à l'étranger, le suivi de l'application des accords de désarmement, l'évaluation des forces militaires hostiles et l'élaboration de programmes d'armement adaptés. À cette époque, la reconnaissance spatiale a fourni des renseignements opportuns, qui ont parfois permis aux superpuissances de ne pas déclencher une offensive inutile : les images, qui dévoilaient des arsenaux moins imposants et des intentions moins belliqueuses que prévu, ont souvent évité la guerre.

Tous ceux qui, comme moi, ont quotidiennement analysé ces photographies ont observé une évolution fascinante. Le gouvernement américain s'apprête à rendre publiques plus de 800 000 photographies satellites collectées par la CIA au cours des 12 premières années de la reconnaissance aérienne, entre 1960 et 1972.

Cette période restera importante dans l'histoire : l'Union des républiques socialistes soviétiques (URSS) construisait ses premiers sites de lancement de missiles balistiques intercontinentaux, la guerre du Viêt Nam faisait rage, le nombre de pays disposant de l'arme nucléaire est passé de quatre à au moins six, les États-Unis et l'URSS ont engagé

les négociations sur la limitation des armes stratégiques. Israël a construit ses premières usines de retraitement du plutonium, les Soviétiques ont installé des missiles à Cuba, la Chine a fait exploser sa première bombe atomique et la course à l'espace se déroulait en même temps que la guerre des Six-Jours, au Moyen-Orient. Tous ces événements étaient observés, à partir de l'espace, par les services de renseignements américains. Les photographies prises ont révolutionné la connaissance de pays comme l'URSS et la Chine, mais aussi du reste du monde.

Arthur Lundahl, le premier directeur du Centre américain d'interprétation photographique, a estimé que les agents de renseignements n'exploitaient que 15 pour cent des informations contenues dans les clichés enregistrés. La publication des images donnera une vision nouvelle (au sens propre et au sens figuré) de l'histoire politique du milieu du XX^e siècle, ainsi que de divers sujets allant de l'archéologie à la zoologie.

Toutes les images publiées ont été produites dans le cadre du programme Corona de la CIA. L'armée de l'air a mené un programme plus modeste, nommé Samos, entre 1958 et 1963. Les satellites utilisés pour ces deux programmes furent les plates-formes les plus novatrices parmi celles qui ont été

utilisées par les États-Unis ; elles étaient épaulées par des ballons photographiques aériens (dans le cadre du programme Genetrix) et par les avions de reconnaissance à haute altitude U-2 et SR-71.

Eisenhower était tenu au courant des résultats de chaque mission. Il considérait cette technique comme un moyen d'éviter les désastres tels que celui de Pearl Harbor, encore dans toutes les mémoires, et il jugeait très important de bien connaître les capacités stratégiques de l'URSS et de la Chine. Vers la fin de son mandat, il utilisa également la reconnaissance spatiale pour lutter contre le groupe de pression militaro-industriel américain, qui exagérait les capacités soviétiques afin de servir ses ambitions.

Au fil des ans, les sommes considérables que les États-Unis ont consacrées à la reconnaissance spatiale ont été largement rentabilisées par les précieuses informations recueillies : les photographies spatiales révélaient non seulement les véritables forces de l'ennemi, mais permettaient aussi d'élaborer des programmes de contre-armement plus efficaces.

Le projet Corona commença officiellement au mois de janvier 1958, mais c'est seulement le 18 août 1960 que le premier satellite fut lancé avec succès, après 12 échecs. Ensuite, 93 autres satel-

LE 10 NOVEMBRE 1962, À LA COLOMA, CUBA

Vus du ciel, les sites de missiles sol-air soviétiques SA-2 forment des étoiles à six branches. Déployées pour la première fois à la fin des années 1950 et encore utilisées aujourd'hui, les batteries de SA-2 étaient conçues pour abattre les avions d'attaque ou de reconnaissance ; la détection de ces signatures, sur des images de Cuba prises juste avant la crise des missiles, a indiqué aux experts américains la présence de sites protégés. Ces derniers étaient en fait des sites de missiles de portée moyenne et intermédiaire.

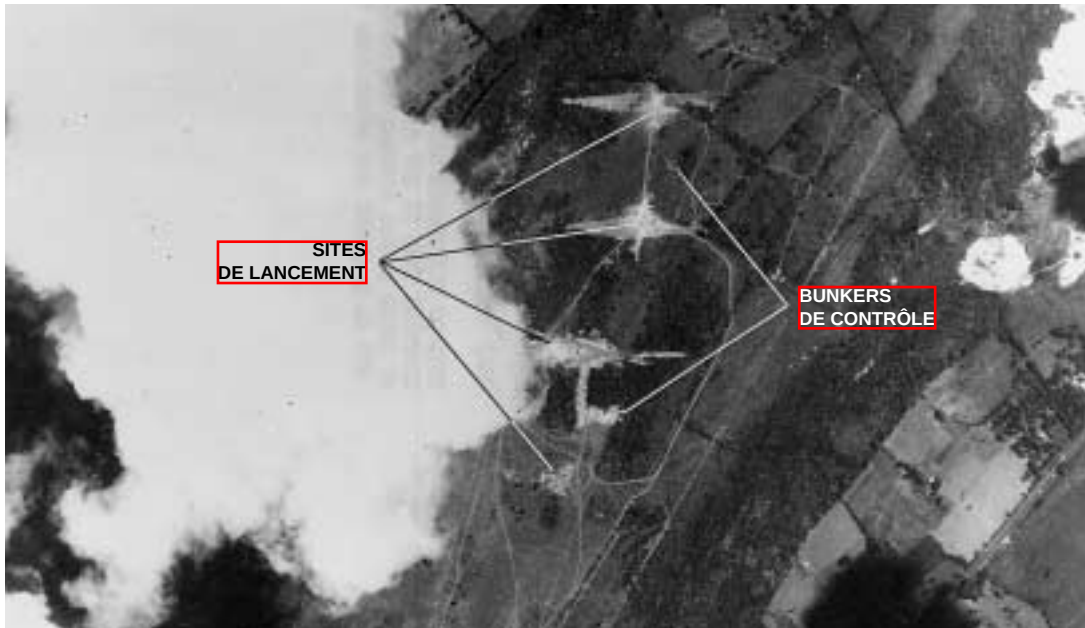




LE 14 OCTOBRE 1962, A SAN CRISTOBAL, CUBA

Le 16 octobre 1962 au matin, l'agent de renseignements Arthur Lundahl présenta cette photographie au président John Kennedy et à ses conseillers. Lundahl était le meilleur analyste de l'époque ; il expliqua pourquoi cette image prise deux jours auparavant suggérait que des missiles balistiques soviétiques de moyenne portée avaient été déployés sur l'île de Cuba. D'une portée de 1 800 kilomètres, ces missiles pouvaient atteindre la ville de Washington et de nombreux autres sites américains plus au Sud. Prise par un avion espion U-2 d'une altitude de 21 300 mètres, la photographie montre un groupe de sept missiles, quelques lance-missiles et des «tentes de prépara-

tion» qui servaient à apprêter le missile et l'ogive pour le lancement. Kennedy ordonna d'effectuer des vols d'avions U-2 pour couvrir la totalité de l'île. Ces vols révélèrent que, outre les missiles de moyenne portée, des aires de tir de missiles intermédiaires, d'une portée double, étaient en cours de construction. Ces missiles balistiques de portée intermédiaire pouvaient atteindre des cibles situées n'importe où sur le continent américain, à l'exception du Nord de la côte Pacifique. Au cours des discussions avec les Soviétiques, Kennedy savait, grâce à la reconnaissance aérienne, que les États-Unis possédaient au moins sept fois plus d'armes stratégiques que les Soviétiques (des bombardiers à long rayon d'action, des missiles balistiques intercontinentaux et des sous-marins lanceurs d'engins).



LE 15 OCTOBRE 1962, A GUANAJAY, CUBA

Pendant la crise des missiles cubains, les analystes comptaient beaucoup sur l'aspect spécifique, ou «signature», des sites de lancement des missiles en URSS. Les détails caractéristiques indiquant le début de la construction d'un site de missiles balistiques de portée

intermédiaire SS-5 y avaient été observés à maintes reprises. Dès leur identification à Cuba, Kennedy a été informé de l'installation prochaine de missiles de plus longue portée, en complément des missiles balistiques de moyenne portée. La riposte instantanée (par le blocus de l'île) a empêché les navires soviétiques de livrer les missiles SS-5 à Cuba.

LE 20 NOVEMBRE 1962, AU CAMP MILITAIRE DE HOLGUIN, CUBA

Les analystes ont mis au point quelques disciplines originales, telles que la «tentologie» : ils ont appris à déterminer les forces militaires à partir du nombre de tentes détectées. Les images de tentes installées sur quatre sites soviétiques, à Cuba, pendant la crise des missiles, ont révélé que chaque site hébergeait environ 1 500 hommes de troupe. L'alignement des tentes et la disposition méthodique des équipements militaires les plus récents permirent aux analystes de conclure à la présence de troupes soviétiques d'élite plutôt que de forces cubaines.

LE 18 AOUT 1962, DANS L'OCEAN ATLANTIQUE, AU LARGE DE CUBA

La «caissologie» est l'étude minutieuse de la forme, des saillies et des crochets de transport des caisses servant à l'expédition des équipements militaires. Ces caisses protègent les équipements contre les intempéries, les embruns et les regards indiscrets. Elles peuvent néanmoins être photographiées, au moment du chargement ou du déchargement, par des avions ou par des satellites (voire par des espions présents dans le port). Une analyse minutieuse et la photogrammétrie, associée à la provenance des caisses, permettent souvent d'en identifier le contenu. En 1962, les analystes ont identifié des caisses contenant des patrouilleurs lance-missiles (photographiés ici par un avion volant à basse altitude de l'armée américaine). Des chasseurs Mig-21, des bombardiers Beagle Il-28 et des avions cargos Crate Il-14 transportés par bateau à Cuba ont également été identifiés.



lites ont été mis en orbite, avec des noms de code tels que Keyhole («trou de serrure») : la série commença par des satellites KH 1, 2, 3 et 4, puis suivirent sept satellites KH-5 dans le cadre du programme Lanyard et le satellite KH-6 du programme Argon.

Les satellites étaient lancés sur une orbite elliptique à une altitude com-

prise entre 180 et 930 kilomètres. Ils prenaient chacun des milliers de photographies au cours d'au moins 16 révolutions orbitales d'une durée d'une heure et demie chacune. Après 1962, l'utilisation de deux caméras permit de réaliser des prises de vues stéréoscopiques. Au moment opportun, une rétrofusée renvoyait la capsule conte-

nant le film vers la Terre. Dérivant au bout d'un parachute, la capsule et son précieux contenu étaient récupérés en vol par un avion militaire.

L'obtention de photographies à partir de satellites n'était que le début de l'élaboration du renseignement. Des spécialistes devaient ensuite détecter, identifier, décrire et évaluer les objets et motifs

Une planète surveillée

Aujourd'hui n'importe qui peut acheter des prises de vues provenant de satellites et les exploiter, avec des moyens informatiques modestes, de façon à obtenir des images de la surface terrestre de résolution supérieure à celles montrées dans cet article.

De nombreux satellites d'observation de la Terre forment un filet quienserre notre planète et scrutent en permanence sa surface, terrestre ou maritime. Les domaines d'application sont variés : cartographie, sciences de la Terre, aménagement du territoire, écologie et, bien entendu, renseignement militaire ou gouvernemental, ainsi que surveillance et gestion des crises.

Ces satellites, à de rares exceptions près, n'embarquent plus d'appareils de photographie à sels d'argent, dont la récupération des clichés est délicate. Ils mesurent les radiations électromagnétiques émises ou réfléchies par la Terre dans des gammes de fréquence beaucoup plus étendues que celle de la lumière visible et qui vont de l'infrarouge aux ondes radar, permettant d'accéder à des informations impossibles à obtenir par un simple examen visuel. Les valeurs des mesures radiométriques correspondant à de petits rectangles de la surface terrestre sont rangées dans des tableaux de chiffres à double entrée. Ce sont ces tableaux, mis sous forme de fichier numérique, que l'on nomme des «images». Leur traitement par ordinateur permet de créer sur l'écran quantité d'images dérivées mettant en valeur l'information recherchée.

Les satellites de la série Keyhole, lancés pour observer un événement spécifique, passaient à basse altitude au-dessus de la zone où se déroulait cet événement : ils subissaient un freinage atmosphérique qui limitait leur durée de vie à quelques pas-

sages. Aujourd'hui les satellites d'observation sont généralement héliosynchrones (dont le plan de l'orbite reste parallèle à la direction du Soleil), à une altitude telle que le frottement atmosphérique est négligeable. Le but est de faire passer le satellite à la même heure solaire, à une latitude donnée, et de le faire repasser sur les mêmes traces au sol, avec une périodicité donnée. Suivant la périodicité choisie, l'altitude varie entre 600 et 1 000 kilomètres. Les progrès en gravimétrie et en mécanique spatiale ont été tels que les orbites sont déterminées à mieux que le décimètre. La prédictibilité des orbites offre en outre l'avantage de pouvoir intégrer les prévisions météorologiques dans la programmation des prises de vues.

La frontière entre satellites militaires et satellites civils est floue, d'une part parce que lanceurs et plateformes sont généralement construits à partir de la même technique et, d'autre part, parce que les procédés de traitement d'images sont les mêmes pour des applications civiles et pour les applications militaires. En outre, le libre accès aux images provenant de satellites commerciaux est un principe juridique reconnu. Ainsi les satellites français de la famille SPOT fournissent depuis dix ans des images commerciales de haute qualité dont une grande partie a été exploitée à des fins de renseignement, tandis que la Fédération de Russie commercialise, à des fins civiles, des images obtenues par des satellites qui étaient initialement réservés au renseignement.

L'imagerie civile se distingue en théorie de l'imagerie civile par la limite de résolution au sol. Au moment du lancement du premier satellite SPOT (SPOT 1, en 1986), cette

limite était juridiquement fixée à dix mètres dans la gamme optique ; une résolution plus fine qualifiait l'image de «militaire». La limite actuelle, fixée à cinq mètres, est théorique : le gouvernement américain a autorisé, en mars 1994, la construction de satellites commerciaux d'observation de la Terre dotés d'un pouvoir de résolution de un mètre. Quickbird, premier satellite commercial à cette résolution, devrait être lancé en 1997, suivi, la même année, par Worldview Imaging. Aucune limite n'est fixée pour l'imagerie radar et l'imagerie infrarouge, dont les longueurs d'onde ne permettent pas d'atteindre la même résolution au sol que les ondes lumineuses, mais donnent accès à une grande richesse d'informations.

La résolution n'est toutefois pas une panacée, ne serait-ce qu'en raison du flux de données qu'elle engendre, et il importe toujours de choisir des images dont la résolution est adaptée à l'application envisagée.

Les informations recherchées sur les images spatiales ont souvent un caractère d'urgence et sont parfois d'importance vitale pour la sécurité d'un pays. Il est donc compréhensible qu'un gouvernement ne puisse faire une confiance totale à des systèmes commerciaux dont les images sont susceptibles d'être soumises à embargo ou dont la totale disponibilité en cas de crise ne serait pas garantie, et qu'il soit nécessaire de développer, parallèlement à des systèmes commerciaux, des systèmes exclusivement consacrés à la défense. Dans un programme de défense commun, la France, l'Italie et l'Espagne ont lancé, en 1995, un satellite d'observation de la Terre, Hélios, exclusivement militaire.

Philippe DELAVEAU
Centre géographique interarmées

présents sur les photographies. Cette tâche, parfois fastidieuse, requiert beaucoup d'attention et, souvent, de l'intuition. Les analystes identifient des «signatures», qui sont des caractéristiques reconnaissables présentant un intérêt. Par exemple, on peut repérer une unité de blindés grâce à des traces parallèles ayant l'air de pistes de bowling, qui sont, en fait, les pas de tir des chars.

Ces signatures sont soigneusement répertoriées dans des manuels de clés de photo-interprétation. Chaque manuel couvre un sujet et un pays donnés, comme par exemple les missiles déployés par la Chine. Les analystes utilisent ces manuels régulièrement mis à jour, à la fois au quartier général et sur le terrain.

La photo-interprétation a connu son baptême du feu lors de la Seconde Guerre mondiale, quand les analystes alliés ont mis au point un système fondé sur trois phases distinctes de distribution des informations. Au cours de la première phase, dite de «flash», les informations jugées vitales pour le combat étaient envoyées en urgence aux commandants présents sur le terrain. La deuxième phase était une étude plus détaillée des photographies ; elle donnait lieu à un rapport écrit. Au cours d'une troisième phase, l'analyse était encore affinée. À quelques exceptions près, le système reste utilisé aujourd'hui. Depuis 1961, cette activité se poursuit au Centre américain d'interprétation photographique pour l'ensemble de la communauté de renseignements des États-Unis.

Le stockage et la manipulation des images numériques ont bouleversé la photo-interprétation, car ces techniques permettent un stockage plus compact des photographies, un accès aux images plus rapide et plus pratique ; de surcroît, des traitements automatiques des images détectent des caractéristiques spécifiques. Elles permettent également de retrouver, à des fins de comparaison, d'anciennes images du même site ou d'un site similaire. La photogrammétrie détermine enfin les dimensions de tout objet ou site figurant sur l'image à l'aide des prises de vues stéréoscopiques, sous réserve d'introduire dans l'ordinateur un certain nombre de données (altitude, distance focale de l'objectif, etc.).

La psychologie est également utile en photo-interprétation : les populations en général, les militaires en par-



LE 8 SEPTEMBRE 1967, SUR LE SITE DE MISSILES INTERCONTINENTAUX D'IMENI GASTELLO, EN URSS

Les routes étant rares en URSS, les militaires devaient installer leurs sites de missiles intercontinentaux à proximité de voies ferrées. Aussi la construction de sites de missiles imposait-elle quelques étapes supplémentaires, très utiles aux analystes américains. Des routes de «classe I», plus larges que les routes ordinaires, avec des virages moins serrés que sur les routes normales, permettaient la circulation des convois qui transportaient les missiles vers leurs silos. Sur la photographie ci-dessus, le silo se présente sous la forme d'un point sombre qui se détache sur la surface claire d'une étendue triangulaire de béton située au bout d'une voie d'accès. Le silo est entouré de trois clôtures de sécurité, ce qui confirme l'importance du site.



LA MER D'ARAL, LE 29 AOÛT 1962 ET DU 1^{ER} AU 10 AOÛT 1994

La mer d'Aral s'est réduite de façon alarmante au cours des 32 dernières années, parce que les rivières qui l'alimentaient ont été tarées par les barrages et par les prélèvements d'eau pour l'irrigation. L'image satellite de droite est un assemblage de plusieurs photographies prises durant un intervalle d'une semaine et demie.

ticulier, vivent conformément à des règles et des coutumes qui déterminent les structures observables sur les images. Pour savoir quels sont les bâtiments les plus importants d'un site militaire, il suffit d'attendre une chute de neige : les voies menant au quartier général et aux latrines sont toujours déneigées les premières. En outre, les bâtiments occupés sont ceux qui sont chauffés et, par conséquent, sur les toits desquels la neige a fondu.

Pratiquement partout dans le monde, le dimanche est jour de repos. Le dimanche matin (et les jours de congé) est donc le meilleur moment pour faire l'inventaire des équipements d'un adversaire, alors qu'ils sont garés ou rangés dans leur garnison. Les forces

des armées de terre sont faciles à évaluer pendant les exercices d'entraînement, qui se déroulent généralement au printemps et en été, lorsque la terre est ferme et que la capacité de mouvement des troupes n'est pas entravée par un habillement lourd ou par le mauvais temps.

Parmi les centaines d'événements observés de 1960 à 1972 figurent : le premier accident nucléaire, qui s'est produit en 1957 à Kystym, en URSS ; la guerre de 1962 entre l'Inde et la Chine ; les attaques aériennes d'Israël contre l'Égypte, la Jordanie et la Syrie durant la guerre des Six-Jours ; la guerre du Viêt Nam ; les affrontements entre l'Inde et le Pakistan en 1965 et 1971 ; l'invasion soviétique de la Tchécoslovaquie

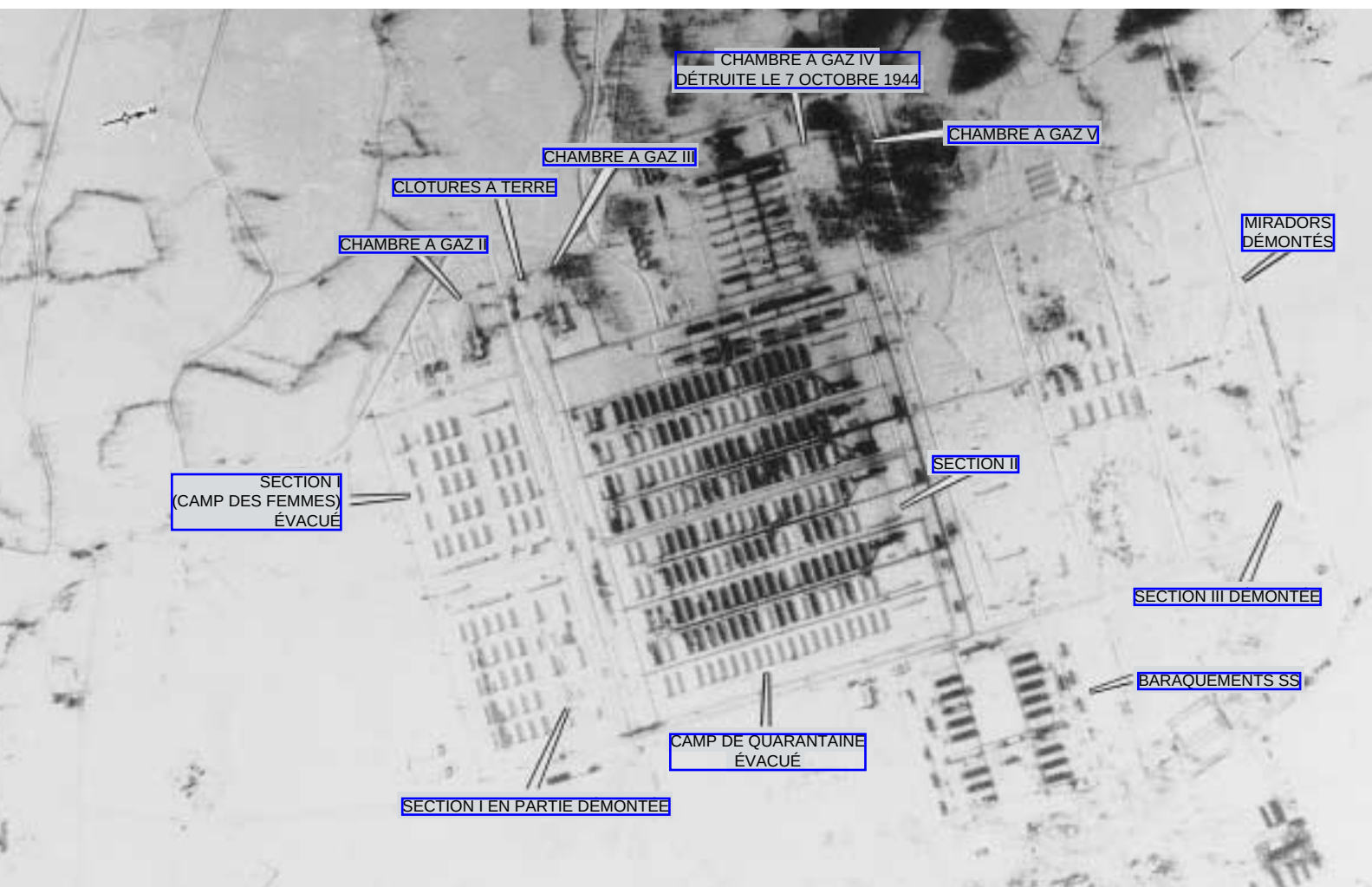
et le déploiement de forces militaires le long de la frontière sino-soviétique dans les années 1970. Le programme Corona a également fourni une large couverture de régions du monde reculées et rarement observées, comme la Nouvelle-Zemble, où les Soviétiques procédaient à des essais d'armes nucléaires, le Tibet, annexé par la Chine en 1950, ou le désert du Kalahari.

Grâce aux images satellites, mes collègues et moi-même avons appréhendé l'extrême fragilité de notre planète. À maintes reprises, nous avons vu disparaître la totalité des arbres de régions à la végétation clairsemée pour servir de bois de chauffage, nous avons vu abattre ou brûler d'immenses étendues de forêts équatoriales, nous avons

LE 14 JANVIER 1945, AU CAMP DE LA MORT D'AUSCHWITZ-BIRKENAU, EN POLOGNE

La reconnaissance des Alliés effectuée en appui des missions de bombardement contre l'usine *I.G. Farben* de caoutchouc synthétique et de carburant, en 1944 et 1945, a fourni des images du camp d'Auschwitz-Birkenau, situé à proximité. Ces photographies n'ont été analysées qu'en 1978, lors de leur découverte dans les archives du ministère américain de la Défense. La photographie reproduite ici, prise au moment de l'approche des troupes soviétiques, le 14 janvier 1945, montre la neige dont parle Elie Wiesel, alors prisonnier dans le camp, dans son ouvrage *La nuit*. Les chambres à gaz ont été démantelées ou sont en train de l'être, et l'évacuation du camp a commencé.

Une épaisse couche de neige sur les toits des baraquements des femmes indique qu'ils ont été évacués. La plupart des femmes, parmi lesquelles Anne Frank, avaient été envoyées à Belsen ; les hommes furent ensuite transférés à Buchenwald et dans d'autres camps. Au moment où cette photographie a été prise, le camp des hommes et les baraquements des SS étaient encore en grande partie occupés, comme l'indique la fonte de la neige sur les toits des bâtiments chauffés. Chaque baraque du camp des hommes abritait environ 1 000 détenus ; à cette date, il restait donc près de 80 000 prisonniers sur les 250 000 que le camp contenait habituellement. Après l'évacuation des plus robustes, 8 000 prisonniers malades ou exténués ont été abandonnés, puis libérés par les troupes russes, le 27 janvier.





EMPLACEMENT DE L'EXPLOSION

LE 20 OCTOBRE 1964, A LOB NOR, EN CHINE

Lorsque les différentes nations se sont mises à construire des armes de destruction massive, les déserts et les régions reculées sont devenus des sites d'essais. Les analystes ont toujours scruté avec attention les photographies de telles régions. En décembre 1961, des photographies de la région de Lob Nor, dans le désert du Taklimakan, dans l'Ouest de la Chine, ont révélé l'existence d'une route circulaire de quatre kilomètres de diamètre. La situation et les dimensions de la route suggéraient une appartenance à un futur site d'essais nucléaires : la zone délimitée par la route était suffisamment vaste pour être le siège d'un essai nucléaire de surface laissant la route intacte. Par la suite furent construits un terrain d'aviation, une caserne et des installations logistiques, puis vint s'ajouter une tour de 100 mètres de

hauteur. Lorsque les lignes de communication et d'instrumentation enterrées furent reliées à des camions et à des bunkers équipés d'électronique, l'essai nucléaire était imminent.

Afin de prendre la vedette au gouvernement chinois, le président Lyndon Johnson demanda au ministre des Affaires étrangères d'annoncer publiquement qu'il savait que «la Chine communiste était sur le point de faire exploser son premier dispositif nucléaire». L'analyse de la photographie du 8 octobre montra que tout était prêt pour l'essai et que le personnel et les équipements avaient été évacués de la zone de tir. La surprise fut faible lorsque les Chinois firent exploser une bombe atomique de 28 kilotonnes, le 16 octobre 1964. Les images prises quatre jours plus tard par des satellites KH-4 montrent les effets d'un essai atmosphérique à l'endroit où s'élevait précédemment la tour.

observé les conséquences de catastrophes industrielles ou naturelles et la pollution de l'atmosphère, des ruisseaux et des rivières. Hiver après hiver, nous avons assisté au noircissement de la neige par la pollution dans un rayon de 150 kilomètres autour de Magnitogorsk, un centre russe de production d'acier. Nos observations donneraient matière à réflexion à quiconque nourrit l'illusion que notre Terre peut absorber sans dommages tous les ravages que lui fait subir l'homme.

La publication des centaines de milliers d'images Corona offre une occasion rare de mieux comprendre notre merveilleuse planète bleue, perpétuellement changeante, et ses habitants. J'ai par exemple suivi l'extension permanente du Sahara vers le Nord, grâce à des images prises périodiquement

durant la fin des années 1960. Les mêmes images montrent les sites des anciens camps romains et m'ont permis de comparer leurs positions avec ceux de la Légion étrangère française.

Nous n'avons fait que jeter un coup d'œil furtif sur la plupart de ces images. La navigation sur cet océan de données encore inexploré sera certainement captivante.

Dino BRUGIONI est l'un des fondateurs du Centre américain d'interprétation photographique.

Dino A. BRUGIONI et Robert G. POIRIER, *The Holocaust Revisited : A Retrospective Analysis of the Auschwitz-Birkenau Extermination Complex*, Central Intelligence Agency (ST-79-10001), 1979.

William E. BURROWS, *Deep Black : Space Espionage and National Security*, Random House, 1986.

Chris POCOCK, *Dragon Lady : The History of the U-2 Spyplane*, Airlife Publishing / Motorbooks International, 1989.

Jay MILLER, *Lockheed's Skunk Works : The First Fifty Years*, Midland Publishing, Leicester, 1993.

Corona : America's First Satellite Program, sous la direction de Kevin C. Ruffner, Central Intelligence Agency History Staff and the Center for the Study of Intelligence, 1995.

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

Les électrons dans un monde à deux dimensions

STEVEN KIVELSON • DUNG-HAI LEE • SHOU-CHENG ZHANG

Confinés dans un plan, les électrons peuvent manifester l'effet Hall quantique, un phénomène surprenant dont on comprend le lien avec la supraconduction.

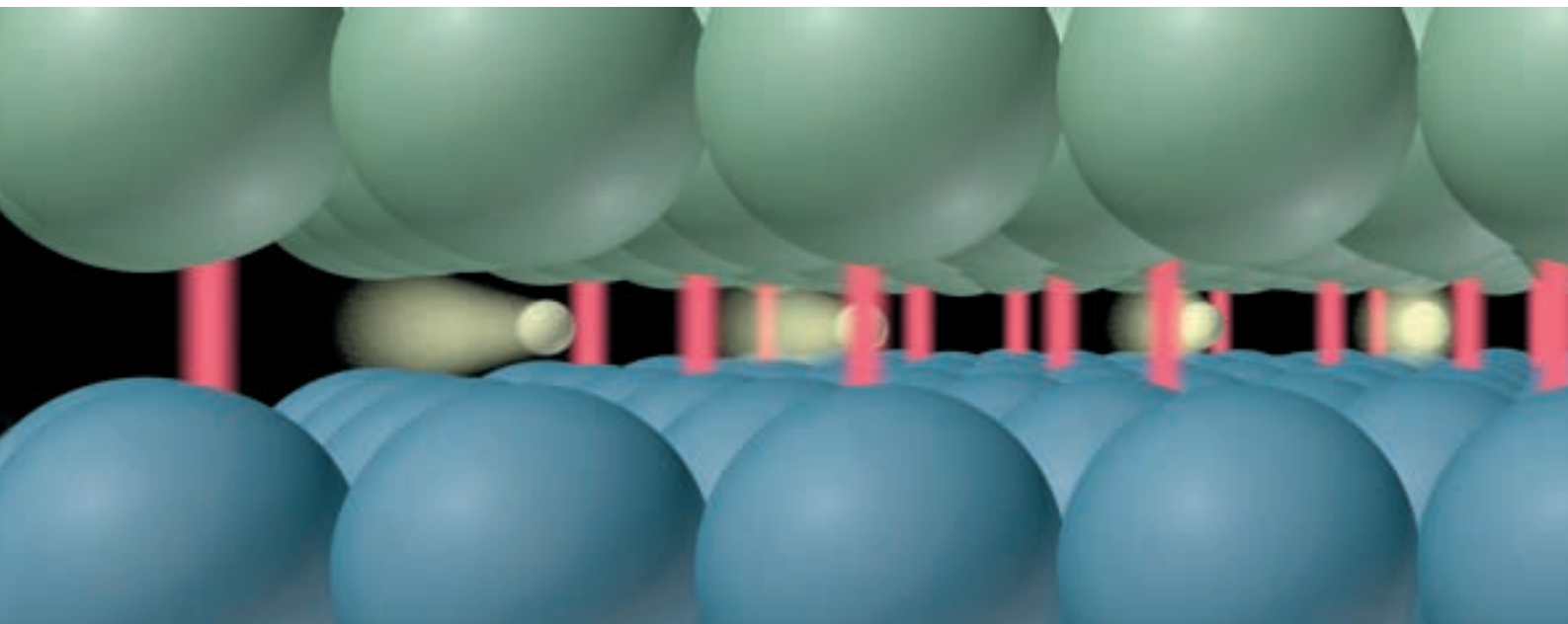
Depuis l'antiquité grecque, toutes les disciplines scientifiques ont pour objet principal de trouver un ensemble minimal de principes fondamentaux qui expliquent des phénomènes naturels variés. Cette philosophie réductionniste a bien réussi dans certains domaines, telle la physique des particules : les théoriciens de cette discipline ont regroupé toutes les particules en quelques familles et ils ont exprimé les lois fondamentales de la physique en fonction des interactions entre particules.

Les physiciens de la matière condensée ont eu moins de succès : les recherches faites au cours de ce siècle sur le comportement des électrons dans les solides ont révélé des états différents de

la matière, caractérisés par une myriade d'organisations des électrons. Habituellement, les solides sont soit des isolants, qui résistent fortement au passage du courant électrique, soit des métaux, qui conduisent bien le courant, avec une faible résistance. Dans certaines circonstances, des solides peuvent passer dans un état supraconducteur, où le courant électrique circule sans aucune perte. Les différentes interprétations théoriques de ces états ont été aussi variées que les états eux-mêmes.

Une unification pourrait toutefois apparaître, car les physiciens ont découvert un lien entre la supraconduction et un autre phénomène, très étudié en physique de la matière condensée : l'effet Hall quantique. Cet effet se pro-

duit lorsque les électrons sont soumis simultanément à trois conditions : ils sont piégés dans une couche mince, entre deux cristaux semi-conducteurs, de sorte qu'ils ne se déplacent que dans un plan ; ils sont refroidis à des températures proches du zéro absolu ; et ils sont dans un champ magnétique intense, perpendiculaire au plan de propagation. Le champ magnétique exerce sur les électrons une force qui les pousse perpendiculairement à leur direction de propagation, ce qui crée une différence de potentiel, nommée tension de Hall. Quand on intensifie le champ magnétique, cette tension croît par paliers. Ce phénomène, nommé effet Hall quantique, est la signature d'un nouvel état de la matière.



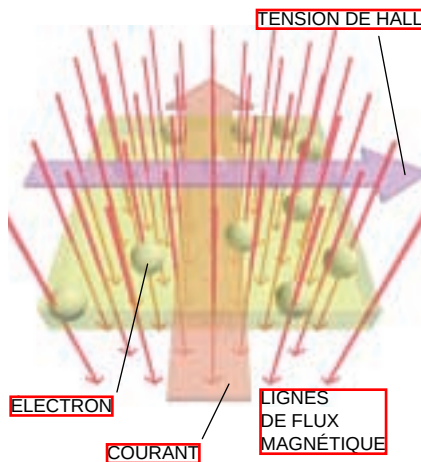
Lors de la découverte de l'effet Hall quantique, en 1980, les physiciens ont trouvé que les propriétés des électrons, dans ce nouvel état, étaient très différentes de celles de tous les autres états connus de la matière. Les dernières recherches dans ce domaine ont néanmoins révélé une relation entre l'effet Hall quantique et la supraconduction. Des études de cette relation ont même mené à la prédiction, confirmée par des expériences récentes, d'autres états de la matière jamais observés. Même si l'effet Hall quantique n'a pas d'application immédiate, son étude a stimulé la mise au point de concepts et d'outils théoriques nouveaux. Ces outils pourraient avoir de grandes répercussions en physique, de la même façon que la théorie de la supraconduction a fait progresser la physique des particules ou que l'étude des transitions de phase a permis de mieux comprendre l'Univers primordial. Enfin, les nouveaux principes pourraient être utiles en microélectronique, parce qu'ils permettraient de décrire les phénomènes dans des composants si petits, que les interactions entre les électrons devront être prises en compte.

La découverte de l'effet Hall quantique

L'effet Hall quantique est une manifestation inhabituelle d'un phénomène qui fut découvert par le physicien américain Edwin Hall au XIX^e siècle : lorsqu'une tension est appliquée entre les extrémités d'un fil conducteur, un cou-

rant y circule ; si le fil est dans un champ magnétique, les électrons en mouvement sont déviés latéralement, de sorte qu'ils s'accumulent d'un côté du fil.

Cette asymétrie produit une tension entre les deux bords du fil, perpendiculaire à la direction du courant. Pour la détecter, on relie les bords du fil à un voltmètre. L'intensité du courant étant fixée, la tension de Hall aug-

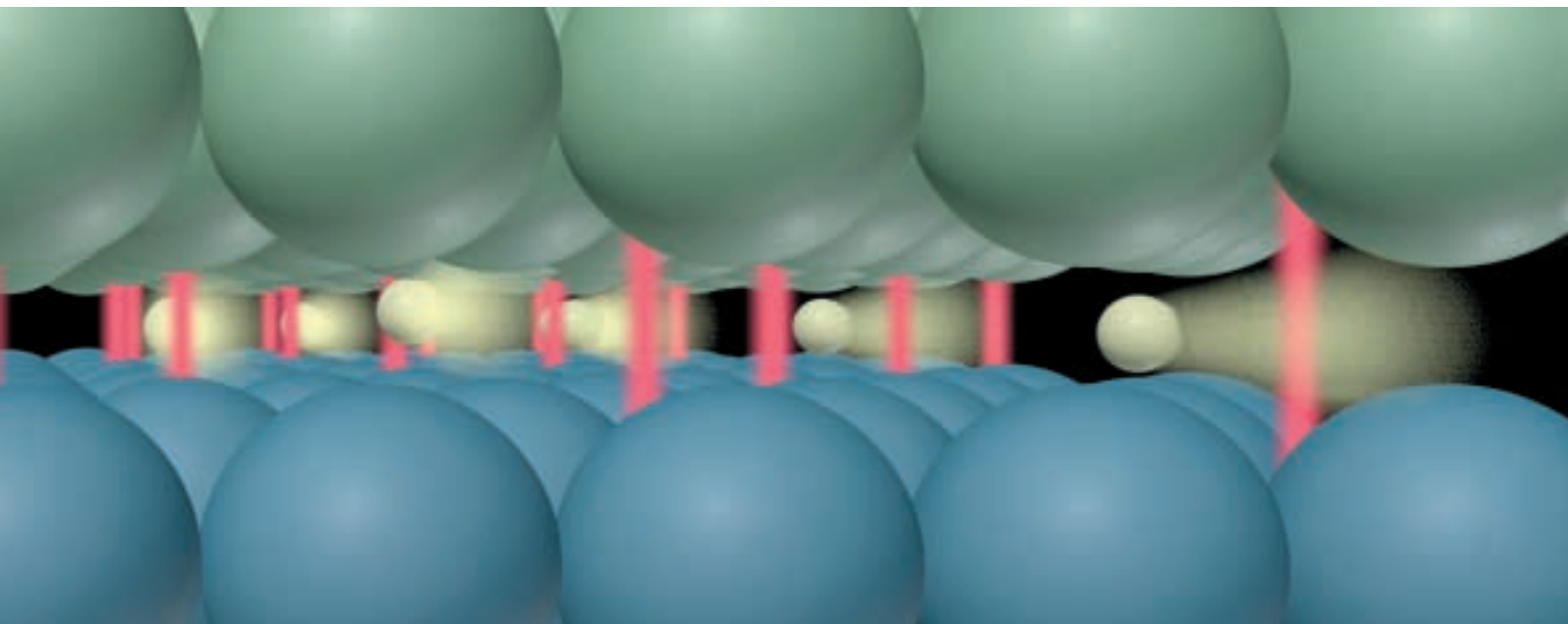


1. L'EFFET HALL QUANTIQUE se manifeste dans un plan entre deux semi-conducteurs refroidis à une température de quelques kelvins (ci-dessous) ; les atomes à la surface des semi-conducteurs sont représentés par des sphères vertes et bleues. Quand on applique un champ magnétique (lignes rouges), les électrons mobiles (petites sphères jaunes) se répartissent de façon à être plus nombreux d'un côté (à droite) que de l'autre. Cette redistribution des charges électriques engendre une différence de potentiel (la tension de Hall), perpendiculaire au courant (ci-dessus). L'effet Hall quantique correspond à une augmentation par paliers de la tension de Hall lorsque le champ magnétique croît.

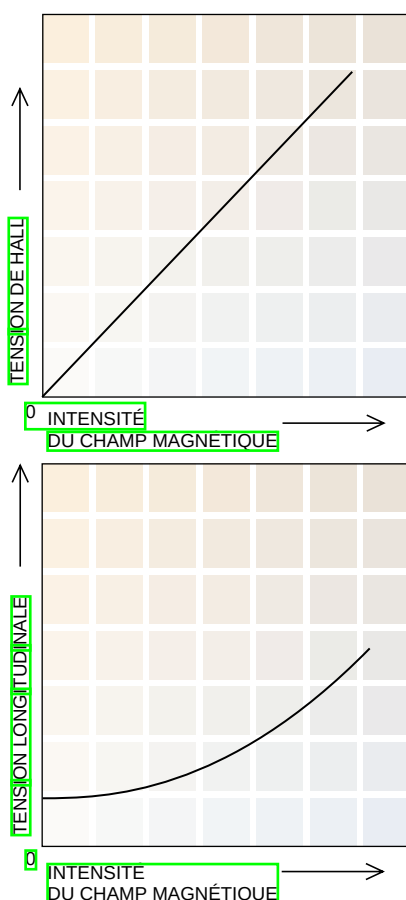
mente régulièrement avec l'intensité du champ magnétique. Ce phénomène est l'effet Hall classique.

En 1980, Klaus von Klitzing et ses collègues du Laboratoire des champs magnétiques intenses de Grenoble découvrirent que, dans des circonstances particulières, l'effet Hall n'obéit plus aux règles classiques. Les progrès de la physique du solide avaient permis de confiner un ensemble d'électrons entre deux semi-conducteurs cristallins ; lorsque K. von Klitzing et ses collègues ont refroidi ces électrons à une température de un ou deux kelvins, ils ont observé que la tension de Hall n'augmentait pas régulièrement avec l'intensité du champ magnétique : elle augmentait par paliers, sa valeur ne variant pas dans de petits intervalles d'intensité du champ magnétique (voir la figure 2). De plus, la tension longitudinale – c'est-à-dire la tension dans le sens du courant – s'annulait presque lorsque la tension de Hall atteignait ces paliers. Autrement dit, les électrons sur le plan étaient devenus « parfaitement conducteurs » (ils ne sont pas supraconducteurs, car des électrons supraconducteurs expulsent un champ magnétique, ce que ne font pas ces électrons parfaitement conducteurs).

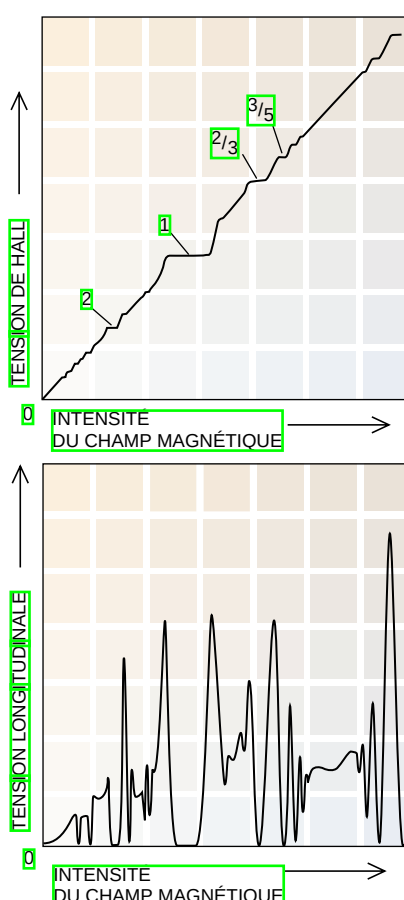
Plus étonnant encore, on a observé que la grandeur nommée conductance de Hall prenait une valeur particulière à chaque plateau. La conductance de Hall est le quotient de l'intensité du courant longitudinal par la tension de Hall (la conductance est l'inverse de la résistance). K. von Klitzing et



EFFET HALL CLASSIQUE



EFFET HALL QUANTIQUE



2. ON OBSERVE des manifestations de l'effet Hall quantique lorsque l'on compare certaines mesures avec celles qui se rapportent à l'effet Hall classique (non quantifié). Dans l'effet Hall classique, la tension transverse (tension de Hall) est proportionnelle au champ magnétique ; dans le cas quantique, la tension présente des plateaux pour des conductances égales à certains multiples entiers et fractionnaires d'une constante fondamentale (seuls quelques multiples ont été indiqués). Dans l'effet Hall classique, la tension longitudinale (parallèle au courant) varie régulièrement avec le champ magnétique, alors que, dans le cas quantique, elle s'annule lorsque apparaissent les plateaux de la tension de Hall.

ses collègues ont trouvé qu'à chaque plateau la conductance de Hall était un multiple entier du quantum de conductance e^2/h , où e est la charge de l'électron et h , la constante de Planck, qui relie la fréquence d'un rayon lumineux à la quantité d'énergie minimale qu'il peut transporter. Pour la découverte de cet «effet Hall quantique entier», K. von Klitzing obtint le prix Nobel de physique en 1985.

En 1982, aux Laboratoires Bell, Daniel Tsui, Horst Störmer et Arthur Gossard ont découvert que les plateaux de la tension de Hall étaient plus nombreux qu'on ne le pensait initialement : ils apparaissent non seulement pour des multiples entiers du quantum de conductance, mais aussi pour certains de ses multiples fractionnaires tels que $1/3$, $2/5$ et $3/7$, d'où le nom d'effet Hall quantique fractionnaire donné à ce phénomène.

Jusqu'à aujourd'hui, aucune expérience n'a montré de différences entre les conductances de Hall mesurées et les valeurs quantifiées. Elles sont égales entre elles avec une précision d'au moins un pour dix millions, et l'on a des indications indirectes qu'elles sont égales à un pour cent milliards. En raison de cette précision, l'Institut américain de normalisation a redéfini l'étalon de résistance comme le klitzing, qui est égal à h/e^2 , soit 25 012,8 ohms, et a choisi l'effet Hall quantique comme référence pour l'étalonnage des appareils de mesure de résistance.

Des remplissages magiques

Pourquoi la conductance de Hall prend-elle ces valeurs «magiques»? Les physiciens ont mis des années à comprendre que ces valeurs dépendent

de l'intensité du champ magnétique qui s'exerce sur chaque électron.

En mécanique quantique, la quantité de champ magnétique qui agit sur un échantillon est quantifiée : c'est un multiple d'un quantum de flux magnétique. On peut se représenter le quantum de flux comme une petite flèche. Pour mesurer l'intensité du champ magnétique, on compte le nombre de quanta de flux – le nombre de flèches – qui traverse la surface d'un échantillon.

Une autre grandeur liée à l'intensité du champ magnétique est le facteur de remplissage, que l'on définit comme le quotient du nombre d'électrons dans l'échantillon par le nombre de quanta de flux magnétique qui y pénètre. Lorsque le facteur de remplissage est égal à un, il y a un quantum de flux par électron ; lorsque le facteur de remplissage est égal à $1/3$, il y a trois quanta de flux pour chaque électron.

Il existe une correspondance entre les valeurs quantifiées de la conductance de Hall et les facteurs de remplissage, nommés facteurs de remplissage magiques : la conductance de Hall est égale au quantum de conductance (e^2/h) multiplié par le facteur de remplissage. Ainsi, lorsque le facteur de remplissage est égal à un, la conductance de Hall est égale à e^2/h ; lorsque le facteur de remplissage est égal à $1/3$, la conductance de Hall est égale à $(1/3) \times (e^2/h)$, et ainsi de suite.

Robert Laughlin, de l'Université de Stanford, est le premier à avoir expliqué l'existence des paliers de la conductance de Hall, en se fondant sur une description séparée des effets entier et fractionnaire. Conformément à la théorie quantique, il décrivait les électrons par des fonctions d'onde, c'est-à-dire des fonctions mathématiques qui indiquent l'état des particules.

Malgré son succès, l'approche de R. Laughlin envisageait des matériaux idéaux, bien différents des matériaux réels, toujours imparfaits. En outre, les fonctions d'onde, abstraites, ne donnaient pas d'explications intuitives des phénomènes. Son approche ne permettait pas de savoir s'il existait une relation entre l'effet Hall quantique et d'autres sortes d'activité électronique dans les solides. Enfin, il traitait différemment l'effet Hall quantique entier et l'effet Hall quantique fractionnaire, alors que ces effets se ressemblent.

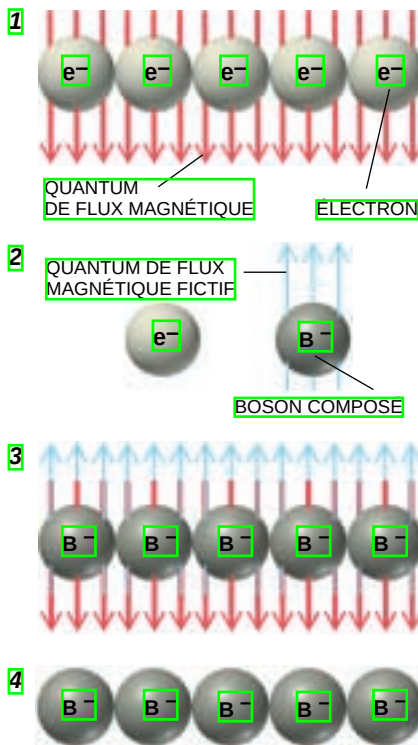
En exploitant une analogie mathématique entre l'effet Hall quantique et

la supraconduction, nous avons obtenu une nouvelle description de l'effet Hall quantique. Tout en unifiant deux phénomènes apparemment différents, cette analogie permet d'appliquer les connaissances de la supraconduction à l'effet Hall quantique. Cette approche, complémentaire de celle de R. Laughlin, reprend beaucoup de ses idées, mais elle s'en distingue parce qu'elle étudie des phénomènes macroscopiques réels du système physique plutôt que par les propriétés microscopiques d'un système idéal.

Bosons et fermions

Nous avons été mis sur la piste de cette analogie par Steven Girvin et Allan MacDonald, de l'Université d'Indiana, qui ont proposé une nouvelle interprétation des fonctions d'onde utilisées pour expliquer l'effet Hall quantique : ils ont imaginé que ces fonctions d'onde pouvaient représenter l'état supraconducteur d'un type de particule imaginaire, nommée boson composé.

Les physiciens classent les particules, d'après leur comportement statistique, en deux familles : les bosons et les fermions. La fonction d'onde décrivant un ensemble de bosons reste inchangée lorsque deux des particules sont échangées ; en revanche, la fonction d'onde des fermions change de signe lorsqu'on permute deux particules.



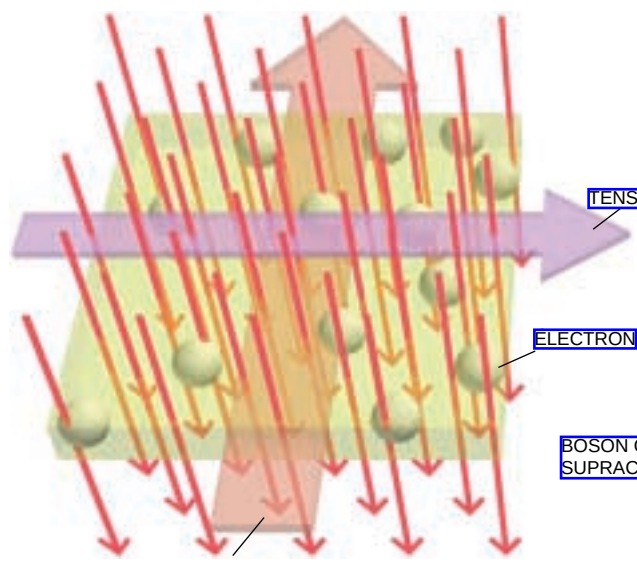
3. POUR EXPLIQUER L'EFFET HALL QUANTIQUE, on peut remplacer les électrons par des bosons composés. Par exemple, lorsque les conditions physiques correspondent à un facteur de remplissage égal à $1/3$, il y a trois quanta de flux (une mesure de l'intensité du champ magnétique) par électron (1). Les auteurs ont proposé de remplacer ces électrons par des bosons composés, des particules fictives ayant trois quanta de flux magnétique fictif (2) en sens inverse du flux magnétique réel (3). On annule ainsi le champ magnétique que chaque boson perçoit (4), ce qui facilite la modélisation de l'effet Hall quantique.

Les électrons, les protons et les neutrons sont des fermions. Un atome, qui contient ces trois types de particules, peut aussi être traité comme une seule particule composée. Cette particule se comporte comme un boson ou comme un fermion selon le nombre total de ses constituants : si ce nombre est impair, l'atome se comporte comme un fermion ; s'il est pair, comme un boson. Par exemple, l'isotope de l'hélium nommé hélium 4, composé de deux électrons, de deux protons et de deux neutrons, est un boson. En revanche, l'hélium 3, composé de deux électrons, de deux protons et de seulement un neutron, est un fermion.

Bosons et fermions diffèrent de plusieurs façons, mais la différence que nous avons surtout utilisée est leur façon d'occuper les états quantiques. Les fermions obéissent au principe d'exclusion de Pauli : deux fermions ne peuvent occuper le même état et, notamment, ils ne peuvent pas se trouver simultanément au même endroit. Cette loi ne s'applique pas aux bosons : plusieurs bosons peuvent cohabiter dans le même état.

Ce comportement différent des fermions et des bosons explique beaucoup d'observations, telle la différence entre un supraconducteur et un métal ordinaire : la conduction électrique dans les métaux ordinaires découle des propriétés des fermions (plus particulièrement, des électrons), tandis que

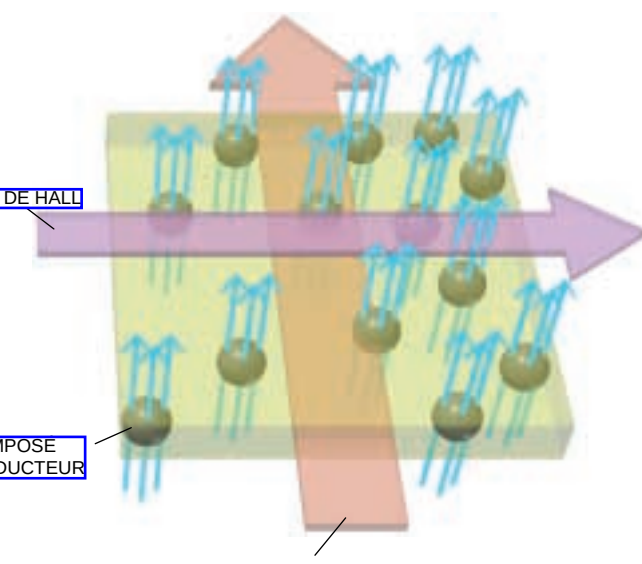
EFFET HALL QUANTIQUE AVEC DES ELECTRONS



CONDUCTION SANS RESISTANCE LIGNES DE FLUX MAGNÉTIQUE

4. L'EFFET HALL QUANTIQUE (à gauche) résulte de l'annulation du champ magnétique externe par les bosons composés (à droite, où, pour plus de clarté, le champ annulé a été omis). En l'absence de champ magnétique, les bosons chargés deviennent

EFFET HALL QUANTIQUE AVEC DES BOSONS COMPOSES



supraconducteurs : la conduction est alors parfaite dans la direction longitudinale. La tension de Hall apparaît en raison de l'induction : les flux magnétiques fictifs en mouvement produisent une tension transverse.

Comparaison entre la supraconduction et l'effet Hall quantique

SUPRACONDUCTION

Les paires d'électrons (paires de Cooper) sont les porteurs de charge fondamentaux

Conduction parfaite

Persistance de l'effet dans un champ magnétique et dans des matériaux contenant des impuretés

Les électrons repoussent un champ magnétique

Quantification du flux (une propriété des anneaux supraconducteurs, qui doivent contenir un nombre entier de quanta de flux magnétique)

EFFET HALL QUANTIQUE

Les bosons composés sont les porteurs de charge fondamentaux

Conduction parfaite dans le sens longitudinal

Plateaux de Hall quantifiés, dont la valeur persiste dans un petit intervalle d'intensités du champ magnétique

Dans un champ magnétique faible, les électrons s'opposent aux changements de densité (incompressibilité)

Charge fractionnaire (la quantification de la charge électrique en unités qui sont des fractions de la charge de l'électron)

la supraconduction résulte des propriétés des bosons.

Pourquoi cette différence, alors que les porteurs de charge, qui assurent le passage du courant électrique dans tous les solides, sont des électrons, c'est-à-dire des fermions? Parce que, dans l'état supraconducteur, les électrons s'apparient, formant des «paires de Cooper» qui se comportent comme des bosons ; toutes ces paires peuvent se condenser dans le même état quantique, ce qui produit la supraconduction. En revanche, dans l'état métallique ordinaire, les électrons gardent leur identité de fermion ; ils sont nécessairement dans des états différents, comme l'exige le principe d'exclusion de Pauli, et ils n'assurent pas la supraconduction.

La théorie qui explique l'effet Hall quantique à l'aide de bosons composés a été introduite en 1989 par deux d'entre nous (S.-C. Zhang et S. Kivelson), en collaboration avec Hans Hansson, de l'Université de Stockholm. Nous avons proposé que les électrons qui se déplacent en deux dimensions dans un champ magnétique intense sont mathématiquement équivalents à un ensemble de bosons composés dans un champ magnétique beaucoup plus faible. Lorsque le facteur de remplissage d'électrons atteint une valeur magique (1, 1/3 ou 1/5), le champ magnétique auquel les bosons sont soumis devient nul. Dans ce cas, les bosons composés deviendraient supracon-

ducteurs, ce qui donnerait lieu aux conductances de Hall quantifiées.

En collaboration avec Matthew Fischer, de l'Université de Santa Barbara, l'un d'entre nous (D.-H. Lee) a étendu cette théorie pour expliquer les autres plateaux de conductance, associés à des facteurs de remplissage comme 2/5 et 3/7. Ces travaux sont à la base des recherches que nous avons menées à trois pour étudier l'effet Hall quantique dans des conditions variées.

Les électrons, des bosons composés

La théorie des bosons composés est fondée sur l'équivalence mathématique qui existe entre des électrons qui se déplacent dans deux dimensions de l'espace et un ensemble de bosons porteurs d'un paquet de flux magnétique fictif. Pour que les bosons composés aient le même comportement statistique que les électrons, chaque boson doit être porteur d'un nombre impair de quanta de flux magnétique fictif. Examinons sur un exemple l'effet du flux magnétique fictif.

Considérons l'un des facteurs de remplissage magiques, par exemple 1/3, pour lequel un plateau apparaît dans la tension de Hall : il y a alors trois quanta de flux magnétique réel par électron. Considérons maintenant chaque électron non comme un fermion, mais comme un boson composé lié à trois quanta de flux fictif. Le flux perçu par

les bosons est la somme des flux réel et fictif. Si l'on oriente les trois quanta de flux fictifs dans le sens opposé à celui du champ magnétique externe, les bosons ne perçoivent en moyenne aucun flux magnétique. Comme les bosons sont supraconducteurs à basse température, des bosons composés froids et associés à un facteur de remplissage 1/3 doivent également être supraconducteurs.

Pourquoi la supraconduction des bosons composés correspond-elle à une conduction parfaite dans le sens du courant et à une conductance de Hall quantifiée dans la direction perpendiculaire? La première partie de la réponse est simple. Puisque les bosons composés sont supraconducteurs, il n'est besoin d'aucune tension pour maintenir le courant : la conduction est donc parfaite.

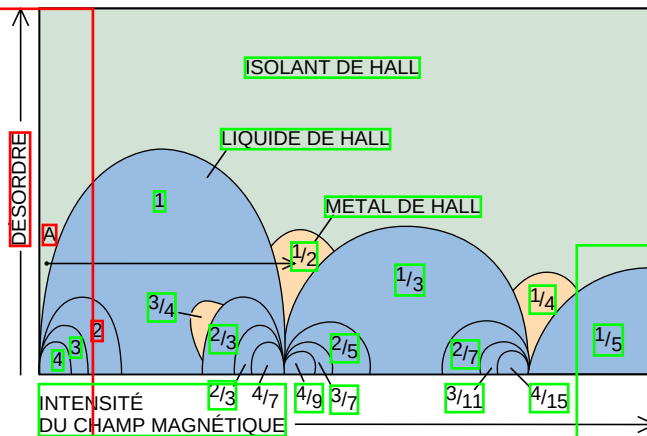
La seconde partie de la réponse est plus subtile. Rappelons-nous que chaque boson composé est porteur d'un nombre impair de quanta de flux magnétique fictif. En se déplaçant, les bosons composés entraînent les quanta de flux magnétique fictif avec eux. Ce déplacement de flux magnétique (même fictif) induit une tension électrique perpendiculaire au déplacement (c'est le physicien britannique Michael Faraday qui découvrit cette induction électromagnétique) proportionnelle à la quantité totale de flux fictif qui traverse l'échantillon en une seconde. Ainsi, pour un facteur de remplissage de 1/3, le courant de flux magnétique est trois fois supérieur au courant électrique, de sorte que la conductance de Hall est égale au tiers du quantum de conductance.

De ce point de vue, la seule différence entre les divers facteurs de remplissage magiques réside dans le nombre de quanta de flux magnétique fictif que porte chaque boson composé. De plus, les conductances de Hall quantifiées (telles que 1, 1/3, 2/5, etc., multiplié par e^2/h) ne dépendent que du quotient de la charge électrique par le flux dans le boson composé, et non du matériau particulier où on les observe.

Le modèle des bosons composés explique aussi pourquoi la conductance de Hall est inchangée lorsque le facteur de remplissage diffère légèrement d'une valeur magique. Considérons un état physique où le facteur de remplissage de l'électron est légèrement supérieur à 1/3. Dans ce cas, le flux fictif ne compense que partiellement le flux réel, et

les bosons composés subissent un faible champ magnétique résultant. Cependant, comme les supraconducteurs réels, les supraconducteurs de bosons composés supportent un faible champ magnétique, et la conductance de Hall est inchangée quand le facteur de remplissage n'est que voisin de $1/3$.

L'analogie entre la supraconduction et l'effet Hall quantique va encore plus loin. Par exemple, de même que les supraconducteurs repoussent un champ magnétique, les électrons présentant l'effet Hall quantique s'opposent à tout changement survenant dans le domaine qu'ils occupent (les électrons de l'effet Hall sont dits «incompressibles»). D'autres aspects de la supraconduction, plus obscurs, ont aussi leur analogie dans l'effet Hall quantique.



5. LES NOUVEAUX ETATS de la matière engendrés par le confinement d'électrons dans un plan (deux dimensions) sont représentés sur un diagramme de phase. Dans un champ magnétique faible et dans un matériau peu désordonné (point A, à gauche), les électrons se comportent comme un «isolant de Hall» (en vert), qui est à la fois isolant et métallique. Dans des champs magnétiques plus intenses, les électrons forment un «liquide de Hall» (en bleu) : ils manifestent l'effet Hall quantique. Dans certaines circonstances, ils provoquent l'apparition d'un «métal de Hall» (en beige). Les nombres indiquent les valeurs entières et fractionnaires de la conductance de Hall quantifiée.

composées sont-elles réelles ou bien, comme les quarks en physique des particules, ne sont-elles que des abstractions utiles qui ne peuvent être étudiées individuellement? La question reste posée.

Plus de 15 ans après sa découverte, l'effet Hall quantique reste l'un des domaines les plus passionnants de la physique de la matière condensée. La multiplicité des phénomènes en jeu a fourni un banc d'essai à de nombreuses idées théoriques. Il en ressort une vision qui unifie la compréhension de ces phénomènes avec celle d'autres phénomènes dans la matière condensée. Toutefois des questions importantes subsistent. Par exemple, on est encore loin d'une compréhension satisfaisante de l'isolant de Hall ou du métal de Hall. On ne sait pas non plus comment intégrer dans cette vision d'autres propriétés des électrons, comme leur spin.

La véritable importance de l'effet Hall quantique ne réside pas dans ses applications éventuelles, mais dans la compréhension nouvelle que les physiciens ont acquise des propriétés particulières des systèmes d'électrons dans les champs magnétiques intenses. La nature peut très bien garder en réserve d'autres états surprenants de la matière auxquels personne ne pense aujourd'hui et qu'il nous reste à découvrir.

Une carte du confinement

À l'aide de la théorie des bosons composés, nous avons étudié l'effet Hall quantique dans de nombreuses conditions physiques et nous avons établi un diagramme de phase qui représente les divers comportements. Quand les physiciens étudient le comportement d'un composé comme l'eau, ils indiquent ses diverses formes – glace, liquide ou vapeur – en fonction, par exemple, de la pression et de la température.

Dans le cas des électrons en deux dimensions, les paramètres du diagramme de phase sont l'intensité du champ magnétique et le désordre des cristaux semi-conducteurs qui piègent les électrons. Nous avons obtenu ce diagramme théorique par analogie avec celui des supraconducteurs désordonnés. La reproduction des informations contenues dans le diagramme de phase pour les supraconducteurs fait apparaître une belle structure emboîtée (voir la figure 5).

La théorie des bosons composés a également conduit à la prédiction d'un état inattendu, où les électrons présentent simultanément les propriétés d'un isolant et d'un métal. Cette prédiction d'un «isolant de Hall» a été récemment confirmée par les expériences de Hong-Wen Jiang et

de ses collègues de l'Université de Los Angeles : en augmentant le désordre dans les semi-conducteurs, ils ont atteint un point au-delà duquel il fallait appliquer une tension très importante pour entretenir le courant. Cette tension appliquée augmentait régulièrement, à mesure que l'on réduisait la température, jusqu'à atteindre presque le zéro absolu – ce qui est caractéristique d'un isolant. Toutefois, simultanément, la tension de Hall était constante, et elle augmentait avec l'intensité du champ magnétique – ce qui est caractéristique d'un métal.

D'autres expériences ont révélé une propriété étonnante des électrons au voisinage du facteur de remplissage $1/2$: les électrons se comportaient comme s'ils étaient dans un métal ordinaire, sans champ magnétique ; la conductance de Hall n'était pas quantifiée, mais proportionnelle au champ magnétique.

On peut expliquer la formation de ce «métal de Hall» en considérant les électrons comme des fermions composés. Un fermion composé ressemble à un boson composé, sauf qu'il est porteur d'un nombre pair de quanta de flux magnétique fictif et qu'il obéit donc à la statistique de Fermi.

Ces notions de bosons ou de fermions composés permettent de relier le comportement apparemment étrange des électrons en deux dimensions au comportement normal des particules composées. Ces particules

Steven KIVELSON et Dung-Hai LEE sont professeurs de physique à l'Université de Los Angeles. Shou-Cheng ZHANG est professeur à l'Université de Stanford.

Bertrand I. HALPERIN, *Quantized Hall Effect*, in *Scientific American*, vol. 254, n° 4, avril 1986.

Frank WILCZEK, *Les anyons*, *Pour la Science*, juillet 1991.

Shou-Cheng ZHANG, *The Chern-Simons-Landau-Ginzburg Theory of the Fractional Quantum Hall Effect*, in *International Journal of Modern Physics B*, vol. 6, n° 1, pp. 25-58, janvier 1992.

S. KIVELSON, D.-H. LEE et S.-C. ZHANG, *Global Phase Diagram in the Quantum Hall Effects*, in *Physical Review B*, vol. 46, n° 4, pp. 2223-2238, 15 juillet 1992.

Les mangroves des Caraïbes

KLAUS RÜTZLER • ILKA FELLER

Des plantes et des animaux se sont adaptés pour vivre à la limite entre la terre et la mer. Ils forment un écosystème diversifié, fragile et surprenant.

Une forêt de palétuviers déchiquetés et noueux qui émergent de la surface de l'eau, des racines qui plongent dans une vase noire et fétide, des frondaisons verdoyantes sous le soleil ardent, un bourdonnement incessant d'insectes : voilà les mangroves des côtes tropicales. Ici, la terre et la mer se mélangent.

Qu'est-ce qu'une mangrove ? S'agit-il d'un type particulier de récif corallien ou d'une forêt amphibie ? Par rapport aux forêts tropicales continentales, qui contiennent jusqu'à 100 espèces différentes d'arbres par hectare, la mangrove est monotone et pauvre : les forêts de mangroves les plus diversifiées, sur les côtes indopacifiques, ne contiennent qu'une quarantaine d'espèces de palétuviers au total. Ailleurs elles ne sont constituées que de huit espèces de palétuviers, dont seulement trois sont vraiment courantes.

«Palétuvier» n'est pas un nom phylogénétique ; il désigne tous les arbres capables de vivre dans l'eau de mer peu profonde. Leurs tissus repoussent

le sel ou l'excrètent. Leurs racines aériennes, qui assurent les échanges gazeux nécessaires à la respiration aérobie, leur permettent de survivre dans la zone intertidale, c'est-à-dire où le sol est régulièrement couvert et découvert par la marée. Un milieu salé n'est pas indispensable à la croissance des palétuviers, mais ils ne poussent qu'en bord de mer, car ils sont incapables d'entrer en compétition avec la flore d'eau douce.

L'extension géographique des zones de mangroves est aussi limitée par les contraintes climatiques. Comme les coraux, elles ont besoin d'une température douce : les palétuviers ne vivent que là où la température moyenne de l'eau est supérieure à 23 °C. Ainsi trouve-t-on des mangroves là où sont aussi présents des récifs coralliens : le long des côtes tropicales. Cette association connaît des exceptions : les côtes continuellement soumises à d'importants apports de sédiments, tels les rivages d'Afrique occidentale, et les zones où des eaux froides remontent vers la surface,

comme au large de l'Est du Venezuela, sont dépourvues de récifs coralliens, alors qu'elles abritent des mangroves importantes. À l'inverse, des îles coralliennes du Pacifique central ne sont pas bordées de forêts de mangroves, apparemment parce que les propagules flottantes, semences des palétuviers, ne les atteignent pas.

On distingue deux types d'écosystèmes de mangroves, selon qu'ils occupent la côte d'un continent ou d'une île. Les littoraux à mangroves des côtes continentales sont inondés à la fois par l'eau salée de l'océan et par l'eau douce des fleuves : elles s'adaptent au fort gradient de salinité qui s'étend de l'intérieur vers la mer. Les mangroves des îles, qui se forment sur des hauts-fonds ou sur des zones lagunaires éloignées du continent, subissent plutôt des variations de la salinité au cours du temps, en raison de l'évaporation intense et des pluies tropicales.

Les écosystèmes de mangroves sont-ils aussi variés et productifs que d'autres écosystèmes tropicaux ?



1. LES VASIÈRES MARITIMES des pays tropicaux (ci-dessus) sont souvent colonisées par une association végétale nommée mangrove, constituée principalement de palétuviers. Ces arbres (à droite), adaptés à de fortes concentrations en sel dans le sol, se développent dans les eaux aux températures moyennes supérieures à 23 °C. Les auteurs ont étu-

dié les écosystèmes à mangroves de la barrière de corail qui longe la côte du Belize (cartouche). Ces marais abritent une faune et une flore variées dans la voûte sombre des arbres et au pied des racines des palétuviers immergées en permanence. Des espèces se sont adaptées pour vivre dans la zone soumise au balancement des marées.



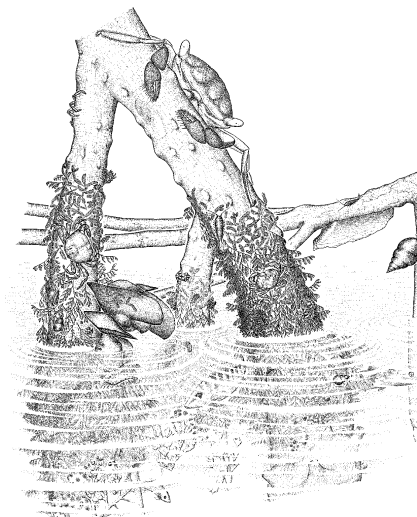
Protègent-ils les jeunes poissons d'espèces d'intérêt commercial autant que certains le prétendent? Protègent-elles le littoral de l'érosion? Pour répondre à ces questions, nous avons entrepris une campagne de recherche interdisciplinaire de longue durée sur une zone de mangrove océanique : nous avons analysé en détail la biodiversité et l'écologie de la barrière corallienne qui s'étend au large des côtes du Belize, en Amérique centrale. Nous avons conduit cette campagne à partir d'une base permanente située sur la petite île corallienne de Carrie Bow, à une quinzaine de kilomètres du continent.

Un long passé

Les études ont commencé en 1972, lorsque nous avons découvert cette île, par hasard. Y vivaient un planteur de citronniers, Henry Bowman, et sa femme Carrie qui, passionnés de sciences naturelles, ont accueilli en un quart de siècle plus de 70 naturalistes de 40 organismes de diverses nationalités. Nous avons centré nos recherches sur Twin Cays, deux îlots jumeaux, proches de Carrie Bow, dont le lagon peu profond est bordé, sur plus d'un kilomètre carré, par des formations à mangrove quasi vierges.



2. LES ÎLES DE CARRIE BOW (à l'arrière-plan) et de Twin Cays (au centre) ont servi aux auteurs de base et de laboratoire naturel. Les pointillés en croix, au fond du lagon, marquent les cicatrices laissées dans le couvert de plantes aquatiques aux endroits où des équipes de recherche pétrolière ont utilisé des explosifs pour effectuer des prospections sismiques dans les années 1960.



3. LES RACINES-ÉCHASSES DES PALÉTUVIERS découvertes à marée basse sont gainées d'algues de l'espèce *Bostrychietum*. De telles surfaces abritent aussi de nombreux invertébrés, tels l'huître de mangrove (*Isognomon*) et le crabe des palétuviers (*Aratus*).

Ces formations sont dispersées par plaques sur le récif corallien. Les bouquets de palétuviers couvrent tout le récif corallien : les premiers arbres avaient-ils poussé sur des blocs de corail isolés? L'examen de carottes du sédiment déposé sur le fond a révélé que la mangrove n'avait pas commencé à pousser sur le corail, mais, il y a 7 000 ans, sur ce qui était à l'époque un sol émergé. Depuis cette époque, sept mètres de sol tourbeux se sont accumulés, à mesure que le niveau des eaux montait.

Elaborée en plusieurs milliers d'années, la topographie de Twin Cays porte les traces des innombrables tempêtes et ouragans tropicaux qui sont venus frapper cette île bordée de mangroves. Le bras de mer peu profond qui coupe l'île et se divise en deux chenaux, dont l'un est sans issue, est la trace d'un événement violent. Dans les méandres du chenal en cul-de-sac, des entailles profondes, pas encore comblées par de la tourbe ou par des sédiments, indiquent que de violents courants traversaient ce passage avant qu'une tempête exceptionnelle ne dépose assez de sédiments et n'en obstrue une issue.

Les rives de Twin Cays et de ses chenaux sont bordées de grands palétuviers rouges (*Rhizophora mangle*) qui enfoncent leurs racines-échasses dans l'eau plus profonde, au-delà de la vasière qui porte les arbres. Plus à l'intérieur, des palétuviers noirs (*Avicennia germinans*), puis des palétuviers blancs (*Laguncularia racemosa*) délimitent les zones inondables peu profondes et les bancs de boue qui résultent des mouvements de la marée. Comme l'évaporation, sous le soleil intense des tropiques, fait disparaître rapidement l'eau stagnante, la saumure qui reste dans les bas-fonds est souvent concentrée en sel. La limite supérieure atteinte par les marées, là où la salinité est maximale, est colonisée par des palétuviers noirs, l'espèce qui supporte le mieux le sel. Les jeunes palétuviers blancs ne survivent pas à la salinité élevée ni à la submersion périodique de cette zone par l'eau de mer : ces arbres sont cantonnés à des zones plus hautes. Enfin, les palétuviers rouges dominent dans les parties basses de la zone intertidale : perchés sur leurs racines-échasses, ils survivent notamment à la pauvreté en nutriments et aux nombreux prédateurs.

L'intérieur de Twin Cays est parsemé de nombreuses dépressions et étendues vaseuses. Sur certaines, aucun arbre ne pousse ; sur d'autres ne subsistent que les souches érodées de grands arbres. D'autres étendues encore sont couvertes d'une forme naine de palétuvier rouge, des arbres qui ne dépassent guère un mètre de haut, quoiqu'ils soient parfois âgés de plusieurs dizaines d'années. La croissance de ces palétuviers à l'allure de bonsaïs n'est pas ralentie par le stress physiologique associé à la forte salinité et aux températures élevées, mais par l'absence d'un nutriment, le phosphore.

Trois milieux dans la mangrove

La végétation de Twin Cays est stratifiée verticalement, en trois zones : la voûte des arbres, la zone intertidale et une zone de type récif qui s'étend même sous les eaux les plus calmes.

Nous avons étudié la flore et la faune de ces trois environnements.

La canopée des formations arborées grouille d'insectes, de lézards, de serpents et d'oiseaux. Bien que les insectes soient le groupe le plus nombreux, l'ardeur du soleil et l'absence d'eau douce créent un environnement qui leur est peu favorable. Seules quelques espèces sont actives le jour ; la plupart sortent la nuit pour se nourrir ou bien vivent complètement à l'intérieur des plantes. La dissection de plantes nous a permis de récolter de nombreuses larves que nous avons élevées : nous avons ainsi montré que la faune entomologique de la mangrove est beaucoup plus diversifiée et abondante qu'on ne le pensait.

Ainsi les branches vivantes des palétuviers rouges abritent plusieurs espèces de lépidoptères et de coléoptères dont les larves se nourrissent de l'intérieur des rameaux, forant des trous cylindriques dans le bois.

Lorsque ces foreurs primaires émergent, 70 autres espèces de fourmis, d'araignées, de scorpions, d'acariens, de papillons, de cafards, de termites et de scorpions colonisent ces rameaux creux où ils se nourrissent, chassent et font leur nid, à l'abri du soleil.

Si la faune qui vit au-dessus du niveau des eaux les plus hautes ressemble beaucoup à celle des autres formations arborées des tropiques, l'enchevêtrement inextricable des racines-échasses des palétuviers rouges, des pneumatophores des palétuviers noirs (les racines aériennes qui leur permettent de respirer) et des bancs de tourbe et de vase abrite des habitants spécifiques des mangroves. Les racines-échasses sont fréquemment recouvertes d'une association d'algues rouges spécialement adaptée pour retenir l'eau lorsque la mer se retire. Les racines servent de support aux huîtres et de niche écolo-



4. LA BARRIÈRE CORALLIENNE DU BELIZE est séparée de la côte par un lagon large et peu profond. Les littoraux à mangroves du continent (à gauche) vivent dans un fort gradient horizontal de salinité, entre

l'eau douce (en bleu) qui irrigue le continent et l'eau de mer salée (en rouge). Les mangroves insulaires, situées au large (à droite), doivent plutôt s'adapter à des fluctuations temporelles de la salinité.



5. DE NOMBREUSES ESPÈCES de plantes, d'arthropodes, d'insectes et d'escargots peuplent la partie émergée de la man-



grove. La bécassine marbrée (l'oiseau dessiné à gauche) y trouve une nourriture abondante.

gique aux crabes et aux oies sauvages. L'un des hôtes les plus étonnants de la zone intertidale est un petit poisson nommé rivulus des mangroves (*Rivulus marmoratus*) : cette espèce hermaphrodite est l'un des rares exemples de vertébré capable de s'autoféconder.

Le milieu le plus riche et le plus densément peuplé de la mangrove est la partie immergée des racines-échasses des palétuviers rouges. Plusieurs espèces d'algues, d'éponges et d'anémones de mer y prospèrent : elles

recouvrent les racines d'une gaine biologique qui fournit nourriture et abri pour divers animaux, tels les huîtres de palétuvier et des crabes. La constitution particulière des racines n'est pas la cause de leur colonisation : après une semaine d'immersion dans ce milieu, tout matériau non toxique (bois, plastique ou verre) est d'abord recouvert par une couche de mucus microbien, puis par des algues et par divers invertébrés. Ce revêtement protège en partie les racines des palétuviers contre les animaux foreurs.

Le brassage des sédiments

La vasière maritime immergée en permanence est occupée par des prairies aquatiques denses, particulièrement fournies dans les chenaux bien ensoleillés. Les algues et les méduses prolifèrent sur certains fonds sableux et vaseux. Les sédiments, un mélange de sable, de boue et de détritus, sont constamment remis en suspension par les courants et par divers organismes. Les grands animaux qui broutent les prairies aquatiques, tels les lamantins,

Les mangroves des Rivières du Sud

Les mangroves, encore mal connues, sont perçues diversement : sont-elles des marais à la boue fétide, à la végétation impénétrable, infestés de moustiques et de bêtes sauvages, ou des bouquets de palétuviers roses sous lesquels il fait bon batifoler ? Des discours contradictoires sont tenus à leur propos : milieu sain ou malsain, riche ou pauvre, fragile ou robuste, vierge ou densément peuplé. Les politiques de gestion sont incohérentes, de la transformation radicale à la conservation totale.

À l'échelle mondiale, les zones de mangroves ne cessent de se réduire en raison des aménagements portuaires, industriels et urbains et du développement des activités agricoles, aquacoles et récréatives. Des scientifiques dénoncent plus particulièrement les vastes aménagements visant à une utilisation unique et intensive des mangroves, dont les impacts sur le milieu sont difficilement réversibles, tel le défrichement des forêts de palétuviers dans les Caraïbes, cité dans l'article de Klaus Rützler et Ilka Feller, ou encore la crevette-culture, qui constitue sans nul doute un des principaux impacts « anthropiques ». Hormis ces pressions, les mangroves sont le plus souvent des espaces inhabités, sauf par de petits campements saisonniers de pêcheurs.

La gestion des littoraux à mangrove de la région nommée Rivières du Sud, qui s'étend du Sénégal à la Sierra Leone, en Afrique de l'Ouest, est originale : les communautés littorales ont élaboré des systèmes d'usages multiples des ressources de la mangrove et ont maintenu leur maîtrise technique, économique et sociale de cet écosystème amphibie. Cette zone littorale, densément peuplée, est l'un des deux plus anciens foyers de riziculture d'Afrique, avec le Delta central du Niger. Les sociétés égalitaires de riziculteurs ont mis en œuvre des techniques ingénieuses et intensives d'exploitation de la mangrove et ont élaboré une véritable civilisation du riz. La pêche, le sel et le bois, la récolte du vin de palme et autres fruits de la « brousse », le commerce et le transport constituent autant d'activités complémentaires à la riziculture. La mangrove des Rivières du Sud est ainsi un espace de production et de vie, dont des communautés entières dépendent pour leur existence. Les acteurs locaux sont de remarquables aménageurs ou constructeurs de pay-

sages rizicoles, qui n'ont rien à envier à ceux façonnés dans les deltas du Sud-Est asiatique.

L'exemple des Rivières du Sud conduit à repenser la question de la fragilité des mangroves et des relations réciproques hommes-milieu. Selon des paléoclimatologues, ces écosystèmes sont robustes et stables, à l'échelle de millénaires. Depuis 25 ans, les forêts de palétuviers ont reculé, et les étendues sursalées se sont considérablement étendues. Cette dégradation n'est pas due à la pression anthropique, mais, au contraire, à l'exode rural et au non-entretien des aménagements hydro-agricoles traditionnels, exigeants en travail manuel. L'assèchement du climat, à partir de la fin des années 1960, a accéléré et rendu à bien des égards irréversibles les processus de salinisation des sols et des eaux.

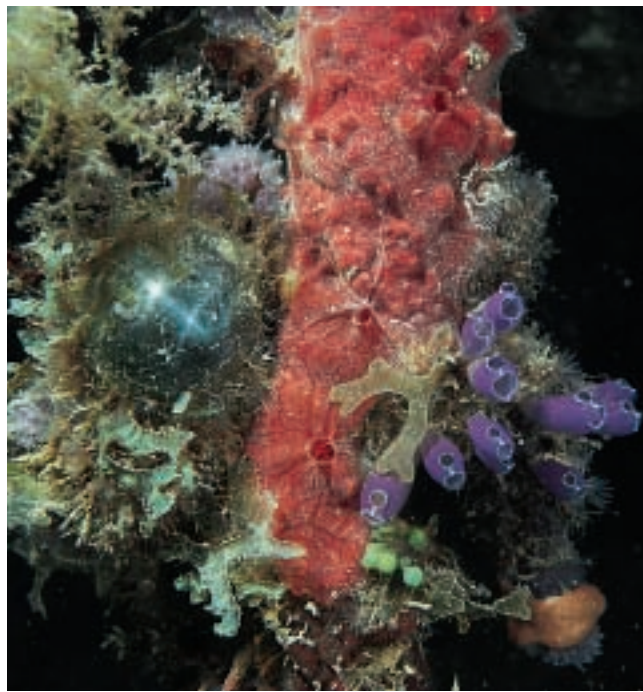
La définition des mangroves, ainsi que les rôles et les valeurs de ces milieux ont été abordés dans le programme de recherches pluridisciplinaires sur les littoraux à mangroves des Rivières du Sud. La définition des mangroves comme « une association végétale caractéristique des milieux intertidaux tropicaux » est trop restrictive. Pour appréhender le fonctionnement, la dynamique et les usages de la mangrove, différentes échelles spatiales (de la racine du palétuvier jusqu'aux écosystèmes adjacents, océaniques et continentaux) et différentes échelles de temps (du cycle de marée aux grandes périodes hydroclimatiques) doivent être pris en compte, selon les questions posées.

La définition des mangroves est un enjeu scientifique, mais aussi politique, économique et social. De cette définition dépend en effet le statut légal de ces espaces de transition : sont-ils des réserves naturelles de biosphère à protéger, des front pionniers à exploiter à des fins alimentaires et commerciales, ou des composantes des terroirs villageois ? Une démarche pluridisciplinaire et comparative entre les divers littoraux à mangroves permettra de mieux saisir les mangroves dans toute leur complexité et conduira à la mise en œuvre de politiques de gestion respectueuses de l'environnement et du bien-être des communautés locales.

Marie-Christine CORMIER-SALEM
ORSTOM, Montpellier



6. DANS LES ZONES IMMERGÉES, au milieu des déchets foliaires, prospèrent des vers sabellides (à gauche) ainsi que l'éponge de feu



des Caraïbes (*Tedania ignis*), une belle mais dangereuse espèce (à droite) dont le contact peut déclencher de violentes éruptions cutanées.

labourent souvent ces chenaux, et les bateaux à moteur qui passent à vive allure brassent les eaux ; enfin les sédiments sont constamment retournés par des animaux fouisseurs, tels les vers polychètes et les crustacés, qui ont une action similaire à celle des vers de terre et des taupes sur la terre ferme. Certains crustacés creusent et entretiennent des terriers formés de tunnels ramifiés qui atteignent plus de deux mètres de long dans le fond vaseux.

L'examen des algues, des invertébrés aquatiques et des insectes de Twin Cays a révélé un nombre étonnant d'espèces non encore répertoriées. Même pour un groupe relativement bien étudié comme celui des crustacés, près de 10 pour cent des espèces que nous avons trouvées étaient nouvelles. Entre 20 et 30 pour cent des micro-organismes, algues, éponges et vers qui peuplent la mangrove de Twin Cays appartiendraient eux aussi à des espèces encore non décrites.

Toutefois la richesse biologique des écosystèmes de mangroves de Twin Cays est menacée par l'intervention de l'homme. Les forêts de palétuviers coupées se reconstituent difficilement : la destruction des arbres bouleverse l'écosystème de manière irréversible. Sur la côte Ouest de Twin Cays, une zone de mangrove à palétuviers noirs avait été coupée

à blanc par des pêcheurs. La zone intertidale a été rapidement colonisée par l'atriplex, un buisson adapté à de fortes concentrations de sel : l'espace disponible pour de nouveaux palétuviers noirs, dont la reproduction est plus lente, a été réduit. Là où les palétuviers rouges avaient été perturbés, les courants, poussés par le vent et par les marées, ont rapidement érodé le sol riche en tourbe, laissant une surface où les propagules se fixent difficilement. En outre, les semis de palétuviers se développent mieux à l'ombre qu'en plein soleil : la reconstitution naturelle de la mangrove endommagée est trop lente pour empêcher l'érosion des terres dénudées.

Bien que le gouvernement du Belize ait promulgué des lois afin de protéger les forêts de palétuviers, ces formations arborées sont menacées

par des aménagements à visées commerciales : sur la plupart des côtes, l'homme coupe les arbres et remblaye les zones humides littorales pour y construire des habitations et des zones industrielles. Les écosystèmes de mangroves sont le refuge d'innombrables variétés d'animaux, y compris les stades juvéniles de poissons d'eau profonde : leur destruction menace la diversité naturelle de l'océan tout entier. La préoccupation croissante pour l'environnement qui se manifeste dans les pays en développement a entraîné un regain d'intérêt pour les mangroves. Les recherches menées à Twin Cays ont rassemblé des observations qui faciliteront la prévision de l'évolution des fragiles rivages tropicaux et qui favoriseront une législation capable de protéger le monde fascinant des mangroves.

Klaus RÜTZLER dirige le programme de recherche sur les écosystèmes des récifs coralliens des Caraïbes du Muséum national d'histoire naturelle des États-Unis. Ilka FELLER travaille au Muséum national d'histoire naturelle à Edgewater.

A.E. LUGO et S.C. SNEDAKER, *The Ecology of Mangroves*, in *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 5, pp. 39-64, 1974.

K. RÜTZLER et I. FELLER, *Mangrove Swamp Communities*, in *Oceanus* (Woods Hole Oceanographic Institution), vol. 30, n° 4, pp. 16-24, hiver 1987/1988.

M.C. CORMIER-SALEM, *Dynamique et usages de la mangrove dans les Pays des Rivières du Sud*, Orstom, Collection Colloques et Séminaires, Actes de l'atelier de travail de Dakar, 8-15 mai 1994.

P.B. TOMLINSON, *The Botany of Mangroves*, Cambridge University Press, 1995.

L'épidémie de SIDA en Afrique

JOHN CALDWELL • PAT CALDWELL

Dans certaines régions de l'Afrique subsaharienne, près d'une personne sur quatre est séropositive. L'absence de circoncision serait-elle responsable de la gravité de l'épidémie dans ces régions ?

Le SIDA est un nouveau fléau pour l'Afrique subsaharienne : 11 des 16 millions de personnes infectées par le virus du SIDA sont des Africains, et près de huit millions d'entre eux vivent dans la zone d'hyperendémie, un groupe de pays de l'Est et du Sud de l'Afrique qui n'abrite que deux pour cent de la population mondiale.

En Afrique subsaharienne, le VIH (le virus qui provoque le SIDA) se propage essentiellement par voie hétérosexuelle. Aussi ne parviendra-t-on à enrayer l'épidémie que si l'on comprend pourquoi les hétérosexuels y sont si exposés. On éviterait alors que le même phénomène ne se reproduise en Asie ou dans les pays occidentaux.

On prétend souvent que la zone d'hyperendémie est la région d'origine du virus, et que ce dernier continue à se propager à partir de cet épiceutre. Toutefois, les premiers cas de SIDA sont apparus en Ouganda et au Rwanda en même temps que dans les pays occidentaux, et aucun prélèvement de tissu conservé depuis les années 1970 n'est contaminé par le VIH. De plus, cette région n'est pas circulaire, et sa forme ne correspond pas du tout à une expansion à partir d'un épiceutre (dans cet article, nous ne prendrons pas en compte le virus VIH-2 apparenté au VIH-1, probablement originaire d'Afrique, mais qui est moins infectieux et moins agressif).

Pour découvrir les facteurs qui favorisent l'expansion du VIH en Afrique subsaharienne, nous avons décidé de réexaminer toutes les données concernant l'épidémie et de remettre en question tous les dogmes. Le virus est-il principalement transmis par les rapports hétérosexuels ? La gravité de l'épidémie résulte-t-elle d'un comportement particulier des habitants de la zone d'hyperendémie ? La sensibilité au SIDA résulte-t-elle d'autres

maladies fréquentes dans les régions particulièrement touchées ?

Nous avons de nombreux atouts pour étudier ces questions, car, depuis plus de 30 ans, nous étudions la dynamique familiale, la fécondité et le contrôle des naissances en Afrique subsaharienne. À la fin des années 1970, nous avons également étudié la sexualité et les maladies sexuellement transmissibles dans cette région. Depuis 1989, nous nous sommes intéressés aux aspects épidémiologiques, sociaux et comportementaux de l'épidémie de SIDA en Afrique, avec l'aide de nos collègues africains I. Orubuloye, James Ntozi, Jackson Mukiza-Gapere, John Anarfi et Kofi Awusabo-Asare.

La transmission hétérosexuelle

Nous avons d'abord voulu vérifier si, en Afrique subsaharienne, le SIDA se propage surtout par voie hétérosexuelle. Nous en doutions, car, ailleurs, le risque de contamination au cours d'un rapport hétérosexuel est bien inférieur à ceux que présentent un rapport anal non protégé, le partage d'une seringue souillée entre toxicomanes ou une transfusion de sang contaminé. Ces risques suffisent à entretenir une épidémie dans certains groupes de la population – les homosexuels et les consommateurs de drogues par voie intraveineuse –, mais n'entretiennent pas une épidémie à l'échelle de la société, comme le ferait une transmission hétérosexuelle.

Malgré notre scepticisme, nos premières études nous ont conduits à admettre que l'épidémie se transmet effectivement par voie hétérosexuelle en Afrique. D'après les estimations les plus prudentes, les femmes sont plus souvent contaminées que les hommes

(120 femmes pour 100 hommes), et la plupart des femmes séropositives ont été infectées par leur conjoint. Dans les pays industrialisés, le nombre d'hommes infectés (par une seringue souillée ou par des rapports homosexuels) est cinq à dix fois supérieur à celui des femmes.

Les autres modes de transmission ont été exclus. Ainsi les rapports anaux, considérés comme répugnants et du domaine de la sorcellerie, n'existent pas en Afrique subsaharienne. De surcroît, la contamination par des seringues souillées semble peu répandue : beaucoup d'Africains se droguent au haschisch, mais peu utilisent des opiacés injectables, car ces drogues sont trop onéreuses.

Divers épidémiologistes occidentaux avaient avancé que l'épidémie hétérosexuelle de SIDA en Afrique subsaharienne refléterait des pratiques sexuelles inhabituelles, qui faciliteraient la transmission. Toutefois, même parmi les prostituées, aucune pratique particulière, ni aucune violence ne semble provoquer de saignements. Certaines traditions rendraient-elles alors dangereuses des relations sexuelles ordinaires ? Ainsi, dans certaines régions de l'Afrique, les femmes s'assèchent le vagin à l'aide d'astringents comme l'alun (utilisé en Occident pour faire coaguler le sang des coupures, lors du rasage), de morceaux de tissu ou de feuilles, afin de satisfaire la demande traditionnelle des hommes. Elles utilisent ces mêmes produits pour assécher les pertes dues aux infections, fréquentes dans les régions tropicales où l'hygiène est médiocre et où les médicaments sont rares. Ces pratiques risquent d'égratigner ou de léser la paroi du vagin, de favoriser les saignements pendant les relations sexuelles : toutefois, nous n'avons pu

établir que ces pratiques augmentent le risque de contamination par le VIH.

Le rôle de la circoncision

Nous étions dans une impasse quand une observation relança nos études, en 1989 : une équipe de médecins de

Nairobi, en plein cœur de la zone d'hyperendémie, signala que les cas de SIDA étaient plus fréquents chez les Luo de l'Ouest du Kenya que chez les Kikuyu, originaires du centre. On avait d'abord admis que les Luo étaient particulièrement exposés parce qu'ils venaient d'une région proche de l'Ouganda,

l'épicentre potentiel de l'épidémie, mais l'hypothèse s'affaiblit à mesure que cette notion d'épicentre s'étiolait. Les médecins supposèrent alors que les Luo sont plus exposés parce qu'ils ne sont pas circoncis, contrairement aux Kikuyu. Les hommes Luo ont plus souvent une syphilis ou des chancres mous



1. DES FAMILLES ENTIÈRES sont contaminées par le VIH en Afrique subsaharienne. Ici, à Nairobi, au Kenya, la mère a probablement été contaminée par son mari. Les trois enfants sont séropositifs ; une

fillette est déjà morte du SIDA. Au Kenya, au cœur de la zone d'hyperendémie, l'épidémie hétérosexuelle est particulièrement meurtrière, peut-être parce que les hommes ne sont pas circoncis.

Le SIDA en Afrique subsaharienne

Le SIDA ne frappe pas tous les pays africains de la même façon. Dans la zone d'hyperendémie, près de 25 pour cent de la population est infectée par le VIH, le virus responsable de la maladie. Dans d'autres régions, la proportion ne dépasse pas un pour cent (*la grande carte ci-contre*), comme dans certains pays occidentaux. Pour expliquer la gravité de l'épidémie dans la zone d'hyperendémie (*carte A*), nous avons analysé divers comportements fréquents dans cette région et spécifiques.

LA ZONE D'HYPERENDEMIC



PROPORTION DE LA POPULATION INFECTÉE PAR LE VIH

A



PROPORTION LA PLUS ÉLEVÉE DE SÉROPOSITIFS POUR LE VIH (REPRÉSENTÉE SUR TOUTES LES CARTES)



ZONE D'HYPERENDEMIC :
RÉPUBLIQUE CENTRAFRICAINE, SUD SOUDAN, OUGANDA, KENYA, RWANDA, BURUNDI, TANZANIE, ZAMBIE, MALAWI, ZIMBABWE, BOTSWANA



ABIDJAN EN CÔTE D'IVOIRE



MALI, BURKINA FASO, RÉGIONS DE CÔTE D'IVOIRE



TCHAD, CAMEROUN, GUINÉE ÉQUATORIALE, GABON, CONGO, ZAÏRE, ANGOLA, NAMIBIE, AFRIQUE DU SUD, SWAZILAND, LESOTHO, MOZAMBIQUE



SENEGAL, GAMBIE, GUINÉE BISSAU, GUINÉE, SIERRA LEONE, LIBERIA, NIGER, TOGO, BÉNIN, NIGERIA

HYPOTHESES SUR LES CAUSES DE L'ÉPIDÉMIE

B



C

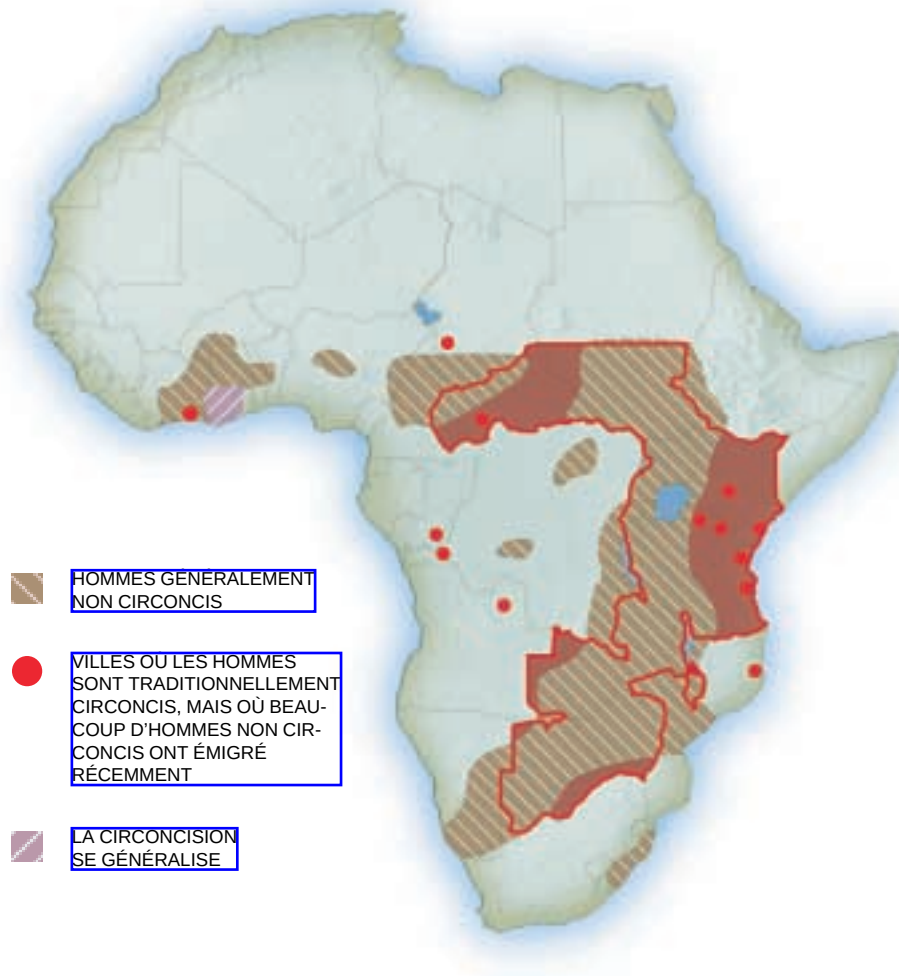


PROPORTION ÉLEVÉE DE STÉRILITÉ DUE AUX NOMBREUSES MALADIES SEXUELLEMENT TRANSMISSIBLES



MARIAGE TARDIF

REGIONS OU LA PLUPART DES HOMMES NE SONT PAS CIRCONCIS



Dans les régions où le comportement sexuel est risqué (chacun a de multiples partenaires et les hommes fréquentent les prostituées), la proportion des maladies vénériennes (*carte B*) est élevée. Les relations pré-nuptiales ou extraconjugales, qui favorisent la propagation de ces maladies, sont plus fréquentes dans les pays où le mariage est tardif (*carte C*) et où la polygamie est de règle (*carte D*), ce qui contraint certains hommes à rester seuls pendant longtemps. Les relations extraconjugales sont moins fréquentes lorsque la période d'abstinence qui suit une naissance est courte (*carte E*). Dans les sociétés matrilineaires et dans les communautés où les femmes sont libres, l'indépendance de ces dernières pourrait favoriser les relations sexuelles pré-nuptiales ou extraconjugales (*carte F*).

Toutefois, aucune de ces hypothèses n'a permis d'expliquer la proportion élevée des personnes séropositives dans la zone d'hyperendémie. En revanche, l'absence de circoncision des hommes (*la grande carte ci-contre*) correspond bien à cette région. Dans les zones où les hommes ne sont pas circoncis, la proportion de séropositifs pour le VIH est supérieure. De plus, l'émigration massive d'hommes non circoncis, de la zone d'hyperendémie vers les villes situées hors de la région particulièrement contaminée, a notablement augmenté le nombre de cas de SIDA dans plusieurs zones urbaines.

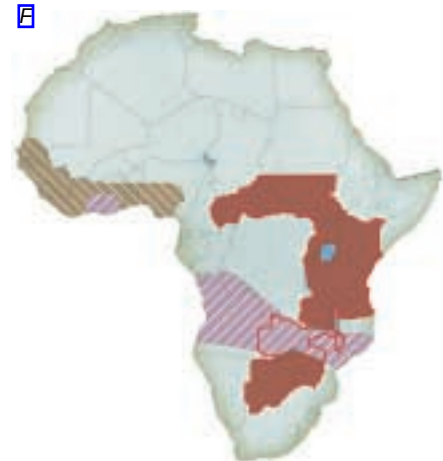
D



E



F



(ulcérations des organes génitaux d'origine vénérienne) et ils sont également plus facilement contaminés par le VIH : à Nairobi, un Luo ayant un chancre mou à un risque de 50 pour cent de contracter le virus du SIDA s'il a une relation sexuelle avec une prostituée séropositive.

Une équipe américaine poursuivait l'étude et, en 1989, publia un article montrant que les régions de l'Afrique subsaharienne où la proportion de séropositifs est élevée correspondent à celles où les hommes ne sont pas circoncis. L'année suivante, l'équipe de Nairobi acheva son étude et confirma ses premiers résultats.

Ces travaux eurent peu d'écho. L'Organisation mondiale de la santé reprocha à leurs auteurs de n'avoir pas proposé de mécanisme physiologique expliquant pourquoi le risque d'infection par le VIH augmente en l'absence de circoncision ; ils avaient seulement trouvé un lien statistique entre l'absence de circoncision, le chancre mou ou la syphilis, et l'infection par le VIH.

Les spécialistes du SIDA continuèrent à penser que les comportements des Africains et leur environnement étaient si « mauvais » (sans préciser ce terme) que la maladie se propagerait inévitablement à travers tout le continent. Comme nous avions l'intuition que cette explication était fautive, nous

avons recommencé à étudier la culture subsaharienne, recherchant toute tradition qui expliquerait cette transmission hétérosexuelle du SIDA.

Recherches préliminaires au Nigeria

Nous avons commencé par le Nigeria, hors de la zone d'hyperendémie, où nous avons travaillé pendant une trentaine d'années. Nous y avons étudié les traditions et les comportements sexuels, car, selon les théories admises en vénérologie, une épidémie hétérosexuelle de SIDA aurait dû s'y propager : la plupart des hommes et beaucoup de femmes ont de multiples partenaires. Pourtant, la proportion de personnes infectées par le VIH (0,5 pour cent de la population) y est à peine supérieure à celle des pays industrialisés. Notre travail au Nigeria pourrait-il nous aider à découvrir les facteurs qui favorisent l'épidémie dans les pays de la zone d'hyperendémie ?

En raison de leurs traditions culturelles et religieuses, de leurs pratiques agricoles, du mode d'acquisition et de transmission de la propriété terrienne, les sociétés subsahariennes ont toujours encouragé la fécondité sans condamner les relations sexuelles pré-nuptiales ou extraconjugales des femmes. L'infidélité occasionne parfois des disputes, des punitions, rare-

ment la dissolution d'un mariage ; elle n'est jamais considérée comme un péché, ni condamnée comme elle l'est dans les sociétés occidentales ou asiatiques. Cette attitude permissive a permis aux filles d'avoir une espérance de survie aussi élevée que celle de leurs frères, mais elle a rendu ces sociétés sensibles aux maladies sexuellement transmissibles.

Nous avons montré que, dans la zone méridionale du Nigeria, la plupart des hommes mariés à une seule femme et plus de 25 pour cent des hommes mariés à plusieurs femmes avaient eu des relations sexuelles extraconjugales au cours de l'année précédente ; simultanément, 75 pour cent des hommes célibataires avaient eu des relations avec au moins deux femmes. De plus, environ 30 pour cent des femmes mariées et 50 pour cent des femmes célibataires avaient eu des relations sexuelles avec au moins deux hommes pendant cette année-là. En termes de nombre de partenaires, ces résultats sont comparables à ceux fournis par diverses enquêtes réalisées en France, en Grande-Bretagne, et aux États-Unis, bien qu'une proportion supérieure des liaisons y aient lieu avant le mariage. Bien que la sexualité se libéralise dans les pays occidentaux, les traditions continuent à décourager les relations extraconjugales. Dans ces pays, la transmission

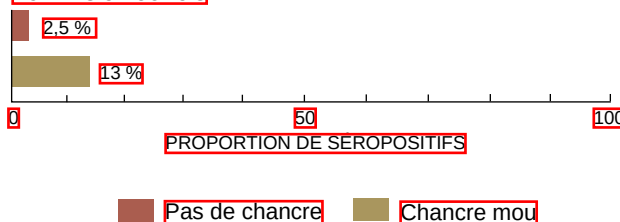
Circoncision, chancre mou et SIDA

A ce jour, personne n'a expliqué pourquoi la circoncision aurait une action protectrice, mais on pense que la muqueuse du prépuce est modifiée chez les hommes circoncis. Certaines maladies sexuellement transmissibles, tel le chancre mou, qui provoque des ulcérations des organes génitaux, sont plus fréquentes chez les hommes non circoncis des zones pauvres où l'hygiène corporelle est médiocre. Le chancre mou a disparu des pays occidentaux au début du xx^e siècle, apparemment avec l'amélioration de l'hygiène.

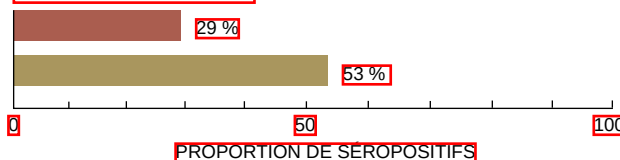
D'après des études faites sur des soldats américains et australiens pendant les guerres du Vietnam et de Corée, absence de circoncision, hygiène insuffisante et chancres mous étaient liés. Une toilette efficace des organes génitaux est plus difficile chez les hommes qui ne sont pas circoncis. Parmi les soldats américains engagés dans la guerre de Corée, 96 pour cent de ceux qui furent infectés par un chancre mou n'étaient pas circoncis.

Au Kenya, les hommes circoncis ont moins de risques de contracter un chancre mou ou le SIDA (voir ci-contre). Toutefois, on ignore encore si l'absence de circoncision favorise la contamination par le VIH ou si elle stimule les chancres, qui eux-mêmes augmenteraient la sensibilité au VIH. Nous pensons que les deux mécanismes se conjuguent dans la zone d'hyperendémie.

HOMMES CIRCONCIS



HOMMES NON CIRCONCIS



Une fois que les hommes ont un chancre, le risque de contracter le VIH augmente, car les lésions génitales favorisent les saignements au cours des rapports sexuels. Contrairement à un prépuce sain, un prépuce infecté serait plus perméable au VIH, même en l'absence de saignements.

hétérosexuelle du VIH reste faible, grâce aux programmes de prévention.

Les maladies sexuellement transmissibles et le SIDA se propagent rapidement parmi les personnes qui ont de nombreux partenaires sexuels, qui n'ont pas de médicaments pour combattre les infections génitales et qui n'utilisent pas de préservatifs. Les maladies vénériennes, telles les blennorragies et, même, la syphilis, sont fréquentes au Nigeria ; en revanche, le chancre mou y est rare. Pour une raison mystérieuse, l'épidémie de SIDA n'y a pas l'ampleur qu'elle atteint ailleurs ; dans les régions de l'Afrique subsaharienne situées hors de la zone d'hyperendémie, les hommes et les femmes ont de multiples partenaires sexuels, les maladies sexuellement transmissibles non traitées sont très répandues, et beaucoup d'hommes fréquentent les prostituées, souvent séropositives : la conjonction de ces différents facteurs serait suffisante pour déclencher une épidémie. Or, la maladie n'atteint pas la même gravité que dans les pays de la zone d'hyperendémie.

Le rejet des autres hypothèses

Pour trouver ce qui différencie le Nigeria et les pays de la zone d'hyperendémie, nous avons émis d'autres hypothèses. Le SIDA se propage-t-il très vite dans les groupes où sont fréquentes les pratiques sexuelles à risques, tels la fréquentation des prostituées ou les partenaires multiples ? Nous pouvions le vérifier : à l'Ouest de l'Ouganda et du Rwanda, mais à l'extérieur de la zone d'hyperendémie, se trouve une région où le taux de fécondité est l'un des plus faibles du monde ; la majorité de la population est stérile, en raison d'une épidémie dévastatrice de maladies sexuellement transmissibles qui dure depuis plus de 100 ans. Pourtant, malgré la proportion élevée de personnes atteintes de maladies sexuellement transmissibles (hormis le chancre mou, qui est rare), la propagation du SIDA y est modérée.

Nous avons étudié les conséquences possibles des coutumes de scarification : des incisions pratiquées sur les membres ou sur le visage sont censées prévenir les maladies ou les guérir. Dans certaines régions, tous les membres d'une famille où une maladie a frappé subissent des scarifications



2. LES PROGRAMMES D'EDUCATION, en Afrique et dans le monde entier, freinent la progression mortelle du SIDA. À Hlabisa, en Afrique du Sud, une volontaire informe des étudiants des risques que présentent les relations sexuelles sans préservatif.

les uns après les autres avec les mêmes instruments ; le risque de contaminer une personne avec le sang d'une autre est élevé. Pourtant, cette pratique n'est guère répandue dans les pays de la zone d'hyperendémie, et elle est pratiquée en diverses régions hors de la ceinture : les coutumes de scarification ne peuvent expliquer l'épidémie.

Les relations extraconjugales, notamment avec les prostituées, étaient-elles en cause ? Dans les sociétés où les hommes épousent plusieurs femmes, de nombreux célibataires ne trouvent pas de femme libre à épouser et fréquentent les prostituées. Cependant, la polygamie est plus fréquente à l'extérieur de la zone d'hyperendémie qu'à l'intérieur. L'âge moyen des hommes au moment du mariage joue-t-il un rôle ? Nous pensions que, s'ils se marient tardivement, les hommes fréquentent davantage les prostituées, mais cette hypothèse a également été réfutée.

Ensuite, nous avons étudié la durée de l'abstinence des femmes après un accouchement : dans certaines régions, les hommes n'ont de relations sexuelles avec leur femme que pendant 60 pour cent seulement de leur vie conjugale, en raison des traditions liées à la naissance et aux relations sexuelles. Dans certaines régions de la zone d'hyperendémie, l'abstinence post-partum est

relativement brève, ce qui diminue le risque des relations sexuelles extraconjugales des maris.

Nous avons examiné encore d'autres hypothèses : les sociétés guerrières condamnant les grossesses prénuptiales, les hommes jeunes fréquentent-ils les prostituées, sachant qu'alors, ils n'auraient pas à assumer la responsabilité d'une grossesse éventuelle de l'une d'entre elles ? Les dots accordées aux jeunes filles étant importantes, les parents sont vigilants : une promesse de mariage ne doit pas être remise en cause par une grossesse survenant avant le mariage. Cette attitude pourrait inciter les hommes à fréquenter des prostituées avant leur mariage. Dans les sociétés matrilineaires, les femmes sont autonomes et participent aux échanges commerciaux, ce qui pourrait encourager leur indépendance sexuelle vis-à-vis de leur époux et multiplier les relations extraconjugales risquées. Les groupes où les hommes sont plus nombreux que les femmes (dans les zones urbaines, en raison de l'immigration) pourraient aussi encourager la prostitution. Aucune de ces situations n'est répandue dans la zone d'hyperendémie et n'y est spécifique. Nous ignorions toujours le facteur responsable de la transmission hétérosexuelle rapide du VIH dans la zone d'hyperendémie.

Retour à la circoncision

Faute d'autre hypothèse, nous avons à nouveau étudié le rôle possible de la circoncision. En analysant les données les plus récentes, nous avons constaté que les régions d'Afrique les plus touchées par l'épidémie de SIDA correspondaient à celles où les hommes ne sont généralement pas circoncis. Selon certains chercheurs, les données sur la circoncision étaient périmées et notre analyse erronée ; pour d'autres, la relation que nous mettions en évidence était pure coïncidence. De surcroît, les médecins occidentaux estimaient que la circoncision était une mutilation inutile, ce qui compliquait encore les débats. Enfin, certains responsables de la santé craignaient qu'en démontrant que circoncision, vulnérabilité au SIDA et appartenance ethnique étaient liées, on n'augmente les tensions interethniques, et que les stratégies de prévention du SIDA n'en pâtissent.

Pourtant, depuis 1993, nous avons réexaminé toutes les données et confirmé que la proportion de personnes contaminées par le VIH est plus élevée là où les hommes ne sont pas circoncis. Dans certaines régions de la zone d'hyperendémie (et contrairement au reste de l'Afrique), presque aucun homme n'est circoncis. À Abidjan, la capitale de la Côte d'Ivoire (située hors de la zone d'hyperendémie), la proportion des personnes contaminées est aussi élevée que dans certaines villes de la zone d'hyperendémie : l'épidémie d'Abidjan est vraisemblablement entretenue par des immigrants venus des régions avoisinantes où les hommes ne sont pas circoncis.

Ainsi, nous pensons que, dans la zone d'hyperendémie, l'absence de circoncision des hommes, combinée à des comportements sexuels à risques (des partenaires sexuels multiples, les relations avec des prostituées, l'absence de traitement des chancres mous), a favorisé la propagation du VIH. Les comportements sexuels à risques ont certainement contribué à la propagation du SIDA en Afrique et dans le monde entier, mais ne peuvent entretenir à eux seuls l'épidémie de la zone d'hyperendémie.

Toutefois, on doit être prudent face à ces conclusions : l'absence de circoncision semble rendre encore plus dangereuses les pratiques sexuelles à risques, mais on doit insister sur le fait

que la circoncision n'est absolument pas une protection contre le SIDA ; les hommes circoncis courent aussi des risques. Partout dans l'Afrique subsaharienne, y compris là où les hommes sont circoncis, la proportion des séropositifs est élevée, tant chez les prostituées que chez leurs clients ; l'épidémie pourrait se propager vers d'autres communautés.

La lutte contre le SIDA

Comme le virus progresse dans la population à différentes vitesses, on doit focaliser les programmes d'éducation et de prévention vers les groupes à risques, les homosexuels, les prostituées et leurs clients, les toxicomanes utilisateurs de seringues, ainsi que les hommes et les femmes ayant de nombreux partenaires. En Afrique subsaharienne, la circoncision pourrait être une mesure préventive supplémentaire.

La circoncision de tous les hommes, vraisemblablement inacceptable, ramènerait la proportion des séropositifs dans la zone d'hyperendémie à celle du reste de l'Afrique subsaharienne. L'éradication de la maladie nécessitera une diminution du nombre de partenaires, l'abandon des pratiques sexuelles à risques, l'amélioration du traitement des maladies sexuellement transmissibles, notamment du chancre mou.

Des changements semblent s'amorcer en Afrique de l'Est : le nombre moyen de partenaires sexuels diminue, et les femmes ougandaises refusent les rapports non protégés. L'usage du préservatif se répand. Grâce à ces mesures, la propagation de la maladie semble ralentir en Ouganda.

Dans les zones rurales de la Tanzanie du Sud-Ouest, et sans doute ailleurs dans la zone d'hyperendémie, les hommes non circoncis n'ont pas attendu que les chercheurs s'accordent sur le lien entre circoncision et SIDA, et ont conclu qu'ils sont plus vulnérables que les hommes circoncis. Le nombre des hommes qui demandent à être circoncis, et que leurs fils le soient, a notablement augmenté. Des cliniques font même de la publicité pour la circoncision dans les journaux tanzaniens.

Heureusement, le problème de la circoncision ne semble pas avoir aggravé les rivalités ethniques. Si les autorités sanitaires affirmaient que l'absence de circoncision favorise une infec-

tion par le VIH, certains hommes demanderaient sans doute à être circoncis. Toutefois, les médecins devront bien faire comprendre à chacun que la circoncision n'est pas une protection contre le SIDA. Bien que la propagation de l'épidémie subsaharienne puisse ralentir un peu, en raison de l'usage plus répandu des préservatifs et probablement d'une augmentation du nombre des hommes circoncis, les Africains de la zone d'hyperendémie restent particulièrement exposés.

L'épidémie subsaharienne fournit des informations importantes sur la propagation du VIH dans le monde. Comme de nombreuses conditions doivent être réunies pour entretenir une épidémie hétérosexuelle, la maladie ne se propagera sans doute pas beaucoup, en Occident, au-delà des groupes à haut risque, tels les homosexuels ou les consommateurs de drogue par voie intraveineuse. Par conséquent, les programmes de prévention, destinés notamment aux pays de l'Asie, où l'épidémie couve, devraient s'adresser surtout aux personnes qui ont le plus de risques d'être contaminées par le virus. Les mêmes efforts devraient ralentir l'épidémie qui frappe aujourd'hui l'Afrique.

John CALDWELL est démographe et Pat CALDWELL est anthropologue. Ils travaillent au Centre national d'épidémiologie et de santé de l'Université de Canberra, en Australie.

John BONGAARTS, Priscilla REINING, Peter WAY et Francis CONANT, *The Relationship between Male Circumcision and HIV Infection in African Populations*, in *AIDS*, vol. 3, n° 6, pp. 373-377, 1989.

Stephen MOSES, Janet E. BRADLEY, Nico J.D. NAGELKERKE, Allan R. RONALD, J.O. NDINYA-ACHOLA et Francis A. PLUMMER, *Geographical Patterns of Male Circumcision Practices in Africa : Association with HIV Seroprevalence*, in *International Journal of Epidemiology*, vol. 19, n° 3, pp. 693-697, septembre 1990.

Sexual Networking and AIDS in Sub-Saharan Africa : Behavioural Research and the Social Context, sous la direction de I.O. Orubuloye, John C. Caldwell, Pat Caldwell et Gigi Santow, Australian National University, 1994.

Forum : The East African AIDS Epidemic and the Absence of Male Circumcision : What is the Link?, in *Health Transition Review*, vol. 5, n° 1, pp. 97-117, avril 1995.

L'urbanisme de Curitiba

JONAS RABINOVITCH • JOSEF LEITMAN

Une cité brésilienne en expansion a préservé la qualité de la vie de ses habitants grâce à des solutions peu coûteuses.

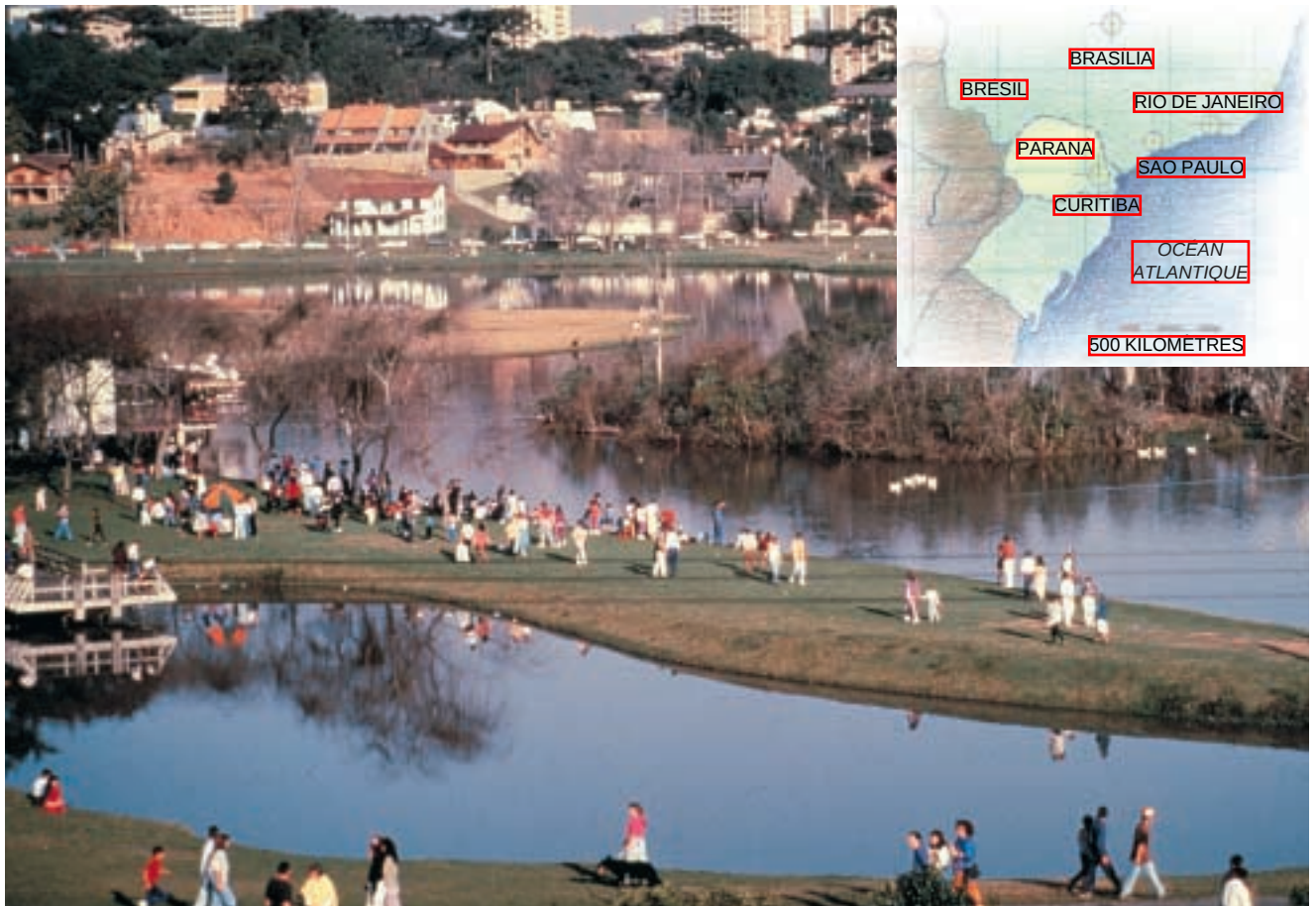
À la fin du XIX^e siècle, qui aurait imaginé que des villes abriteraient un jour plus d'un million d'habitants? Jules Verne lui-même, qui décrit Paris au XX^e siècle, aurait eu du mal à croire qu'il y en aurait plus de 500 en 2010, dont 26 de plus de 10 millions d'habitants. Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, la population urbaine sera bientôt supérieure à la population rurale.

La plupart des villes modernes sont aménagées pour satisfaire au mieux les exigences de la circulation auto-

mobile. Les urbanistes prévoient en priorité les parkings, les autoroutes et les plans de circulation des heures de pointe. À l'intérieur des limites urbaines, ils organisent la nature, souvent au mépris de l'environnement, et ont exclusivement recours à des techniques élaborées pour la réduction de la pollution ou l'écoulement des eaux.

Curitiba, la capitale de l'État du Paraná, au Sud-Est du Brésil, a choisi de se développer autrement. La croissance de cette ville est explosive : sa population est passée de 300 000 à

2 100 000 personnes entre 1950 et 1990. Simultanément son activité économique a changé : ce centre de transformation de produits agricoles est devenu un centre industriel et commercial. Dans les pays en développement, de tels bouleversements s'accompagnent généralement d'un accroissement du chômage, de l'implantation de bidonvilles, de la congestion de la circulation et de la dégradation de l'environnement. Curitiba a échappé à ce destin : malgré un revenu moyen comparable à ceux de la région, la ville est moins polluée, la



1. LES PARCS AMÉNAGÉS autour des lacs de Curitiba, la capitale de l'État du Paraná, dans le Sud-Est du Brésil, ont plusieurs fonctions : construits initialement pour retenir les eaux qui inondaient

autrefois la ville, ils servent d'espaces verts où les habitants viennent se détendre. Ils sont en outre traversés par des pistes cyclables du réseau qui parcourt l'agglomération.



2. LA RUE QUI NE DORT JAMAIS, une succession de magasins et de restaurants ouverts en permanence, maintient en vie le centre ville de Curitiba. L'implantation des banques, des compa-

gnies d'assurances et des autres activités de bureau est réglementée pour éviter que le quartier ne se transforme en ville fantôme après 17 heures.

criminalité y est moindre et le niveau d'éducation moyen de la population y est supérieur.

Pourquoi Curitiba réussit-elle là où tant d'autres ont échoué? Parce que les municipalités successives ont transformé la ville en un laboratoire du développement urbain, privilégiant les transports collectifs par rapport aux automobiles individuelles, intégrant l'environnement naturel au lieu de le rejeter, retenant des solutions choisies par les citoyens plutôt que d'imposer des techniques de pointe. Cette approche a été mise en place progressivement, à la fin des années 1960, puis officiellement instaurée en 1971.

Les inondations endiguées

Les urbanistes ont remporté un premier succès dans les années 1960: ils ont définitivement contenu les inondations qui menaçaient le centre-ville. La construction de maisons et d'autres bâtiments sur les berges des rivières avait aggravé ce problème. Plusieurs cours d'eau avaient été canalisés et enterrés: pour drainer les eaux de pluie, il fallait creuser d'autres canaux, à des coûts exorbitants. Des entrepreneurs construisaient en outre de nouveaux centres industriels et urbains dans la périphérie, sans se préoccuper du drainage.

À partir de 1966, la municipalité a réservé des terrains au drainage et a interdit la construction sur les zones les plus basses. Depuis 1975, une régle-

mentation stricte protège ce qui reste du réseau hydrographique naturel. Les berges des rivières ont été transformées en parcs naturels, plantés d'arbres, et des lacs ont été creusés pour retenir l'eau. Sur les berges, les usines et les bâtiments abandonnés ont été transformés en installations sportives et de loisirs. Des lignes d'autobus et des pistes cyclables relient ces parcs à la ville.

Cette intégration de la nature dans la ville a résolu d'un coup plusieurs problèmes. Les inondations ont été supprimées, et le drainage est assuré à moindre coût. En outre, la surface d'espace vert par habitant est passée de 0,5 mètre carré en 1970 à 50 aujourd'hui, alors que, simultanément, la population augmentait.

Le centre de Curitiba, n'est pas, comme celui de la plupart des autres villes, un goulot d'étranglement où convergent des autoroutes surchargées. Dans les villes qui croissent de façon radiale, en annexant de nouveaux secteurs périphériques à mesure que les commerces et les bureaux deviennent plus denses dans les quartiers du centre, la saturation est inévitable, surtout lorsque la majorité des banlieusards utilisent leur véhicule personnel pour se déplacer entre la périphérie et le centre. Au cours des années 1970, les autorités de Curitiba ont encouragé l'extension de la ville selon des axes, tout en développant des transports en commun qui assuraient des liaisons efficaces entre les commerces, les

bureaux et les habitations. Le réseau routier et les transports publics ont déterminé la forme actuelle de la ville.

Chacun des cinq principaux axes de croissance est composé de trois artères parallèles. Au centre, deux couloirs d'autobus, réservés à des lignes rapides, sont longés par des routes de desserte locale. De chaque côté, à un pâté de maisons, deux larges avenues en sens unique desservent le centre-ville. Le plan d'occupation des sols a favorisé une forte densité de constructions, avec des services et des commerces, le long de ces axes.

Des liaisons transversales et des lignes de quartier complètent le réseau rapide des axes principaux. Des gares routières, aux extrémités des cinq lignes rapides, et des stations intermédiaires, tous les deux kilomètres environ le long de ces lignes, assurent les correspondances. Un seul billet donne accès à tout le réseau.

Les moindres détails du réseau d'autobus concourent à accroître la rapidité du transport. Les passagers montent rapidement dans les autobus: le paiement s'effectue dans les arrêts, et les autobus ont de larges portes. Des autobus articulés de longueur double et triple accroissent la capacité de transport des lignes rapides.

Un tel réseau d'autobus est aussi économique qu'efficace: la construction d'une ligne de métro aurait coûté entre 300 et 350 millions de francs par kilomètre; l'aménagement des lignes

d'autobus n'a coûté qu'un million de francs par kilomètre. En outre, des entreprises capables d'exploiter des lignes d'autobus existaient déjà. Ces entreprises sont responsables des trans-

ports en commun de Curitiba, sous le contrôle de l'administration. Leur rétribution dépend des distances parcourues et non du nombre de personnes transportées : le service est ainsi équi-

libré sur toutes les lignes et il n'y a pas de concurrence néfaste. L'ensemble du système est autofinancé.

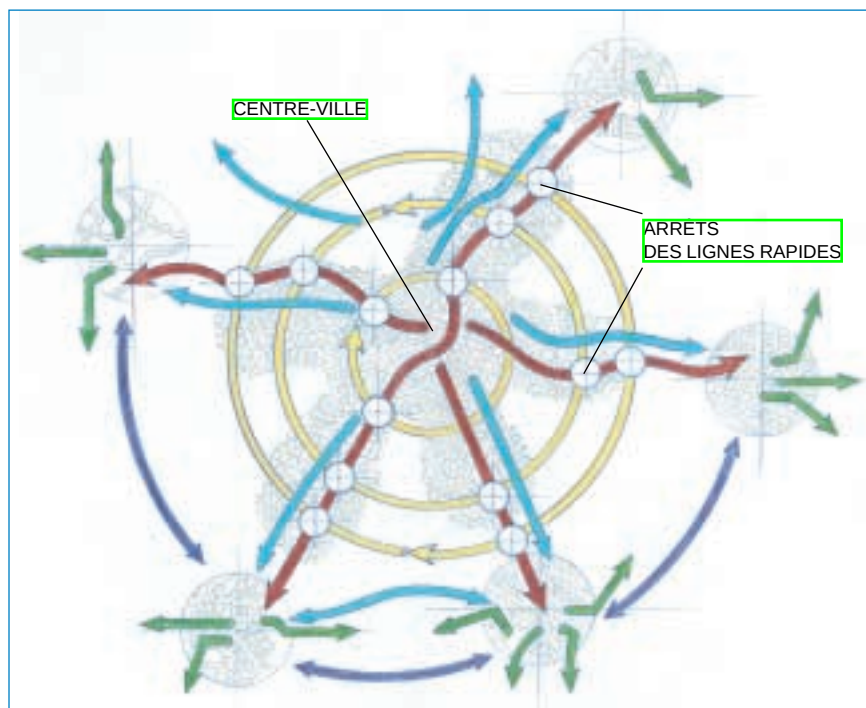
Transports moins chers et moins polluants



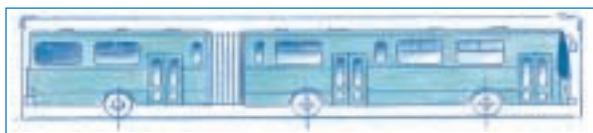
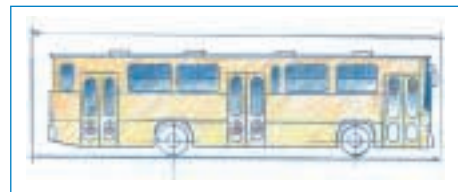
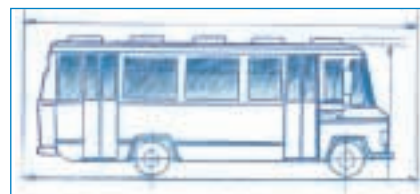
3. LE BOULEVARD PRINCIPAL de Curitiba, maintenant piétonnier, est le lieu d'une célébration hebdomadaire pour les enfants. Cette coutume a commencé en 1972, quand les automobilistes ont menacé d'emprunter la rue comme d'habitude : les employés municipaux les ont bloqués en déroulant de grandes feuilles de papier et en invitant les enfants à s'installer pour dessiner.

Les habitants les moins riches de Curitiba ne dépensent ainsi qu'environ dix pour cent de leurs revenus pour le transport, ce qui est peu au Brésil. Bien que cette ville contienne plus de 500 000 voitures (c'est la seconde ville la plus équipée par habitant de tout le Brésil après Brasilia, la capitale), les trois quarts des banlieusards empruntent les autobus, qui transportent environ 1,3 million de passagers par jour. La consommation de carburant par habitant y est de 25 pour cent plus faible que dans les villes brésiliennes de même taille, et la pollution atmosphérique y est aussi plus faible : les autobus roulent au gazole, mais leurs émissions polluantes sont largement compensées par celles que ne produisent pas les voitures qu'ils remplacent.

La mise en service des transports en commun a été accompagnée d'un



- LIGNES RAPIDES
- LIAISONS ENTRE LES QUARTIERS
- LIGNES DIRECTES
- DESSERTES LOCALES
- RAMASSAGES D'ENTREPRISES



4. LES LIGNES D'AUTOBUS se sont développées en même temps que la ville. Curitiba a cinq axes principaux, tracés par la construction de couloirs d'autobus que les automobiles ne peuvent emprunter et qui sont réservés à des lignes rapides ; des lignes locales et

des liaisons entre les quartiers desservent le reste de la ville. La taille des véhicules est adaptée à chaque ligne, des minibus de 40 places pour les trajets locaux aux véhicules articulés de 270 places pour les lignes les plus rapides.

programme de construction de 40 000 logements sociaux. Avant l'aménagement des lignes d'autobus, la ville a acheté des terrains près d'une zone industrielle créée en 1972 à environ huit kilomètres du centre ville, dont les entreprises font aujourd'hui travailler, directement ou indirectement, cinq pour cent de la population. Comme la valeur des terrains dépend beaucoup de leur desserte par les transports, ces terrains municipaux ont permis aux personnes les plus pauvres de se loger à proximité de leur lieu de travail, dans des quartiers où les loyers auraient été trop chers.

La méthode employée pour gérer la croissance de Curitiba est aussi importante que le plan de développement lui-même. D'abord les habi-

tants ont accès aux informations concernant l'urbanisme : les services municipaux répondent immédiatement à toute question sur la constructibilité des terrains. Inversement quiconque souhaite obtenir ou renouveler une autorisation d'activité commerciale doit préciser les conséquences de son projet sur la circulation, les besoins en infrastructures urbaines, le nombre de places de parking nécessaires et toutes les conséquences sur la vie municipale. Ces informations empêchent la spéculation immobilière. Elle sont aussi essentielles aux prévisions budgétaires : les taxes foncières sont les principaux revenus de la ville.

Le plan de développement est aussi mis en œuvre grâce à des incitations.

Les propriétaires de terrains ou de bâtiments dans le quartier historique du centre peuvent transférer dans un autre secteur de la ville le potentiel de construction de leur terrain : cette règle protège les bâtiments historiques du centre sans léser leurs propriétaires. Dans certains quartiers, les entreprises peuvent acheter le droit de construire deux étages de plus que la limite légale : elles paient en argent ou en terrains que la municipalité utilise pour la construction de logements sociaux.

Les citoyens sont sensibilisés au respect de l'environnement par des cours gratuits que propose l'Université libre pour l'environnement. Ces cours pratiques apprennent aux travailleurs du bâtiment, aux gérants d'immeubles



5. LE SYSTÈME D'AUTOBUS rapides de Curitiba a les mêmes performances qu'un métro, mais il a coûté quelques milliards de dollars de moins. Comme les passagers paient leur transport à l'entrée de

sas qui équipent les arrêts, les autobus s'arrêtent moins longtemps aux stations et la desserte est plus rapide. Ces sas sont aussi équipés d'ascenseurs pour fauteuils roulants.



6. LES BIDONVILLES EXISTERONT probablement toujours dans les agglomérations à croissance rapide des pays en développement. À Curitiba, un programme d'échange des déchets rétribue près de 40 000 familles en billets d'autobus ou en nourriture pour



le nettoyage des zones où elles vivent et que les services municipaux ne peuvent atteindre. Il a au moins amélioré les conditions sanitaires (la photographie de gauche a été prise avant le début du programme).

ou aux commerçants les conséquences de leurs activités quotidiennes sur l'environnement. Ils sont obligatoires pour obtenir l'autorisation d'exercer certaines professions, telle celle de chauffeur de taxi, mais beaucoup de gens les suivent de leur propre initiative.

La ville de Curitiba se préoccupe aussi de la santé et de l'éducation de ses plus jeunes habitants. Des emplois à temps partiel sont proposés aux écoliers les plus pauvres, et quatre repas sont servis quotidiennement à plus de 12 000 enfants par les restaurants municipaux. En outre, un numéro de téléphone permet de signaler tout enfant en difficulté ou maltraité.

Trier et évacuer les déchets

De nombreux urbanistes pensent qu'une ville qui engendre plus de 1 000 tonnes de déchets par jour doit posséder une usine de retraitement. Curitiba n'en a pas : la production de déchets a été réduite et leur ramassage a été amélioré. Un programme de recyclage incite près de 70 pour cent des foyers à trier leurs déchets : chaque jour, une quantité de papier correspondant à environ 1 200 arbres est recyclée. Un programme de rachat des déchets a été mis en place dans les quartiers pauvres, où les services de voirie se rendent difficilement : les familles échangent des sacs de déchets contre des billets d'autobus, de la nourriture ou des fournitures scolaires. Plus de 34 000 familles de 62 quartiers ont ainsi échangé 11 000 tonnes de déchets contre près d'un million de billets d'autobus et 1 200 tonnes de denrées alimentaires. Depuis trois ans, des élèves de plus de 100 écoles ont échangé près de 200 tonnes de déchets contre presque 1,9 million de cahiers. Des retraités et des chômeurs sont employés temporairement au nettoyage des décharges sauvages.

Ces initiatives, qui reposent sur l'emploi intensif de main-d'œuvre plutôt que sur la mécanisation et des investissements, ont réduit le coût et augmenté l'efficacité du traitement des déchets. Elles ont permis des économies, embelli la cité et créé des emplois.

Curitiba a des caractéristiques géographiques, économiques et politiques uniques. C'est toutefois un exemple pour les urbanistes : alors que la construction et l'aménagement de routes aboutit paradoxalement à une saturation croissante du trafic automobile, la réduction des besoins des

déplacements en voiture individuelle à Curitiba a réduit la pollution. La priorité des transports collectifs sur les véhicules individuels et des piétons sur les engins motorisés est primordiale.

D'autres villes commencent à suivre cet exemple. Les rues piétonnes se multiplient, au Brésil et dans d'autres pays d'Amérique du Sud. La ville du Cap, en Afrique du Sud, a récemment adopté un plan d'aménagement urbain explicitement fondé sur celui de Curitiba. Les élus et les urbanistes de grandes villes aussi diverses que New York, Toronto, Montréal, Paris, Lyon, Moscou, Prague, Santiago, Buenos Aires et Lagos ont visité et apprécié l'organisation de Curitiba.

Deux autres principes mis en œuvre à Curitiba pourraient être appliqués ailleurs. D'abord, lier tous les problèmes d'urbanisation : chaque programme peut créer des partenariats entre les entreprises privées, les organisations non gouvernementales, les services municipaux, les associations de quartier, les communautés, les groupes et les individus. Ensuite, agir dès que les problèmes se posent. Plutôt que de tenter de ressusciter des centres-villes désertés par leurs habitants, les urbanistes des grandes villes ou de celles qui commencent à croître devraient aborder les problèmes sans attendre un plan d'urbanisme complet ou des difficultés financières.

Jonas RABINOVITCH est urbaniste à l'Organisation des Nations unies. Josef LEITMAN est urbaniste à la Banque mondiale.

Jonas RABINOVITCH, *Curitiba : Towards Sustainable Urban Development*, in *Environment and Urbanization*, vol. 4, n° 2, pp. 62-73, octobre 1992.

Jonas RABINOVITCH et Josef LEITMAN, *Environmental Innovation and Management in Curitiba, Brazil*, United Nations Development Program, Habitat and World Bank, Urban Management Program, Working Paper Series n° 1, juin 1993.

Anisio BRASILEIRO, *Curitiba et Recife, dans l'expérience brésilienne d'organisation des transports*, CODATU-INRETS, juillet 1994.

J. RABINOVITCH et J. HOEHN, *A Sustainable Urban Transportation System : The «Surface Metro» in Curitiba, Brazil*, Environmental and Natural Resources Policy and Training Project, Working Paper n° 19, mai 1995.

Malnutrition, pauvreté et développement intellectuel

LARRY BROWN • ERNESTO POLLITT

La malnutrition infantile perturbe à la fois le comportement des enfants et leur santé physique. Elle amoindrit en outre durablement les capacités intellectuelles.

Aujourd'hui, sur la Terre, 195 millions d'enfants de moins de cinq ans sont sous-alimentés. La malnutrition a des formes évidentes dans les pays pauvres : les journaux et les télévisions montrent des corps émaciés, dans des régions frappées par la famine ou déchirées par la guerre. Elle est moins prononcée et plus com-

mune dans les pays riches : en 1992, 12 millions d'enfants américains avaient une consommation alimentaire inférieure aux apports journaliers recommandés par l'Académie nationale des sciences.

La malnutrition des enfants provoque des problèmes de santé qui peuvent devenir chroniques et

conduire à la mort : perte de poids extrême, arrêt de la croissance, affaiblissement des résistances immunitaires. Dans les cinq premières années de la vie, les conséquences sont particulièrement dramatiques : le corps est en période de croissance rapide et il a davantage besoin d'énergie et de nutriments.



1. UN PETIT DEJEUNER équilibré donné aux enfants des écoles combat la malnutrition et les problèmes de développement intellectuel qui lui sont associés.

La malnutrition perturbe aussi le développement intellectuel. On a longtemps pensé qu'elle agissait uniquement en créant des lésions cérébrales irréversibles. Toutefois des travaux récents montrent que des lésions dues à la malnutrition sont réversibles et que le développement intellectuel est aussi handicapé suivant d'autres mécanismes. Des programmes d'aide à l'enfance ont été redéfinis en tenant compte de ces résultats.

Les liens entre la malnutrition et les performances intellectuelles ont été étudiés dès le début du siècle, mais c'est seulement dans les années 1960 que l'accumulation de données sur la sous-nutrition dans les pays industrialisés et sur la malnutrition sévère dans les pays en développement a permis l'examen des conséquences à long terme des carences nutritives. En Amérique latine, en Afrique et aux États-Unis, des enfants qui avaient souffert de malnutrition avaient de moins bons résultats aux tests de QI que les enfants, convenablement nourris, de statut social et économique comparable. Puis plusieurs études ont confirmé que la malnutrition infantile limite durablement le développement intellectuel.

Le lien entre la nutrition et le développement intellectuel semblait simple. Entre la conception et l'âge de deux ans, le cerveau grossit jusqu'à 80 pour cent de sa taille adulte. Selon la «théorie de l'effet principal», la malnutrition pendant cette période critique interrompt le développement normal du cerveau et crée des lésions graves et définitives.

Toutefois cette théorie surévalue l'importance des deux premières années de la vie. La croissance du cerveau des enfants sous-alimentés n'est pas toujours terminée après deux ans : si l'alimentation s'améliore vers trois ans, elle peut reprendre à une vitesse quasi normale. À l'inverse, la malnutrition peut créer des lésions cérébrales, même après l'âge de deux ans. Une alimentation

suffisante tout au long de l'enfance est donc nécessaire au développement intellectuel.

Un modèle simpliste

En outre, la théorie de l'effet principal n'explique pas les handicaps créés par une malnutrition légère. Cette insuffisance est apparue au cours des années 1960, quand on a observé que des enfants légèrement sous-alimentés, issus de familles aux revenus moyens ou supérieurs (dont les déficits nutritionnels étaient dus à la maladie), ne souffraient pas des mêmes troubles intellectuels que les enfants légèrement sous-alimentés issus de familles pauvres. Si une alimentation insuffisante n'avait provoqué que des lésions cérébrales, il n'y aurait pas eu de différence entre les deux groupes. Des éléments de l'environnement des

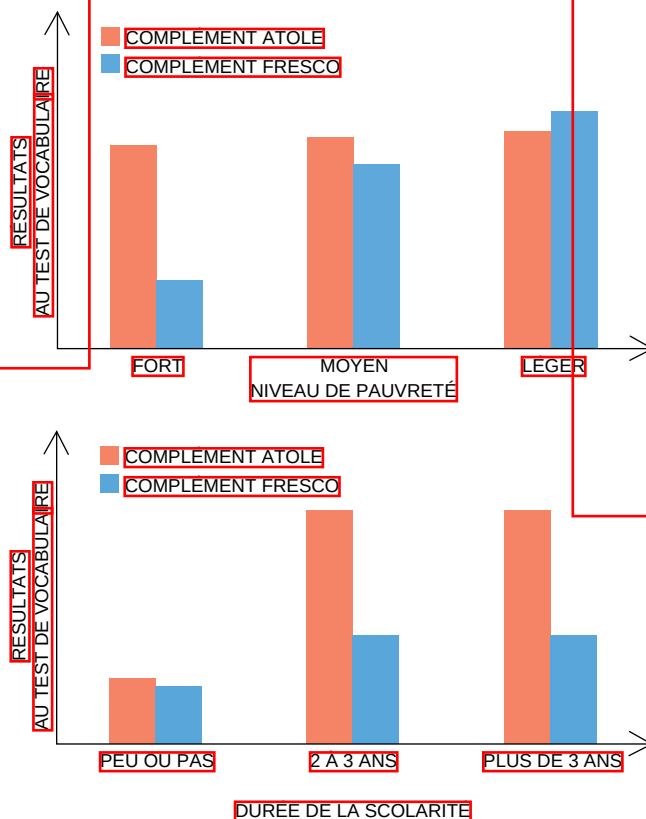
enfants, tels les revenus des parents ou le niveau d'éducation, limitaient ou renforçaient les effets dévastateurs de la sous-alimentation.

Au cours des années 1970, David Levitsky et Richard Barnes, de l'Université Cornell, ont expliqué comment, chez des rongeurs, la malnutrition ralentit le développement intellectuel sans créer de lésion cérébrale. Des animaux souffrant de malnutrition mémorisent moins bien leur parcours dans un labyrinthe parce qu'ils manquent d'énergie et qu'ils évitent les contacts avec les autres animaux et avec les objets ; les mères s'occupent aussi moins des petits les plus passifs, ce qui ralentit leur croissance et leur prise d'indépendance.

Pouvait-on extrapoler ces résultats aux humains ? Les faibles résultats aux tests de QI des enfants sous-alimentés résultaient-ils, en partie, d'un manque d'interactions avec d'autres personnes et avec leur environnement ? Ce changement fondamental d'interprétation ouvrait des perspectives : on pourrait soigner les enfants en favorisant leurs interactions sociales.

Une étude, dirigée par l'un d'entre nous (E. Pollitt), au Guatemala, a partiellement confirmé ces idées séduisantes, mais elle a aussi montré que la pauvreté et la malnutrition se combinent pour pénaliser le développement intellectuel à long terme.

Cette étude prenait la suite d'un autre travail où, de 1969 à 1977, on avait analysé l'intérêt des compléments nutritifs dans la prévention des problèmes de santé liés à la malnutrition. En 1969, les nutritionnistes, qui pensaient que les enfants des pays en développement souffraient surtout de carences en protéines, ont donné aux femmes enceintes et aux enfants de deux villages un complément à forte teneur en protéines, nommé Atole, d'après le nom d'une bouillie chaude à base de maïs traditionnellement préparée au Guatemala. Les habitants de deux autres villages, le groupe témoin,



2. LES CAPACITÉS INTELLECTUELLES d'adolescents et de jeunes adultes qui avaient reçu des compléments nutritionnels pendant leur petite enfance ont été évaluées, par des tests, pour déterminer l'impact du régime alimentaire et de la pauvreté. Ceux qui avaient consommé régulièrement, jusqu'à l'âge de deux ans, un complément riche en protéines (Atole), ont tous obtenu les mêmes résultats à la plupart des tests quel que soit leur niveau de pauvreté (en haut). En revanche, les performances des enfants qui avaient reçu un complément sans protéines (Fresco) étaient d'autant meilleures qu'ils étaient moins pauvres. Parmi les jeunes qui avaient suivi plus de trois années de scolarité, ceux qui avaient consommé Atole ont obtenu des résultats meilleurs que ceux qui avaient consommé Fresco (en bas) ; une alimentation insuffisante pendant la petite enfance réduit les bénéfices de la scolarisation.

reçoivent une boisson sucrée à base de fruits, nommée Fresco, qui ne contenait pas de protéines. Les deux compléments contenaient des vitamines, des sels minéraux et des calories ; Fresco

n'apportait que le tiers des calories fournies par Atole.

Toutes les femmes enceintes et tous les enfants de moins de sept ans ont été invités à participer à l'étude :

plus de 2 000 ont accepté. Le suivi médical des enfants a révélé que les deux compléments alimentaires amélioraient leur santé, mais le produit Atole était bien supérieur au produit

Un traitement intégral de la dénutrition

Selon l'Organisation mondiale de la santé, la malnutrition par carence, ou dénutrition, entraîne la détérioration du développement intellectuel et psychologique de l'enfant ; le traitement de ces handicaps est aussi important que celui des conséquences physiques. Depuis plus de 25 ans, de nombreuses équipes ont montré les conséquences de la malnutrition au cours des deux premières années de la vie sur le développement mental ultérieur.

Malgré les preuves qu'un programme de stimulation durant le traitement de la dénutrition grave améliore le développement mental d'un groupe d'enfants par rapport à un groupe non stimulé, peu de centres de renutrition ont mis en place un tel programme. Le manque de personnel et de temps est peut-être en cause. À notre connaissance, seule l'équipe de Fernando Monckeberg, au Chili, a systématiquement intégré, dans le traitement de la dénutrition grave, une stimulation affective et psychosensorielle. Un groupe de femmes volontaires, nouvelle catégorie de soignants, est uniquement chargé de stimuler les enfants, par des caresses et des massages, et en jouant avec eux. Chez ces enfants, le gain en poids et en taille, et le développement psychomoteur sont améliorés, par rapport à un groupe d'enfants dénutris, hospitalisés, non stimulés, et le nombre des infections est fortement réduit.

Nous avons repris avec succès cette approche dès l'ouverture, début 1989, d'un Centre de réhabilitation immuno-nutritionnel à Cochabamba, en Bolivie. Nous avons constitué une équipe pluridisciplinaire, comprenant des pédiatres, des biochimistes, des psychologues, des sociologues et des nutritionnistes. La confrontation des biologistes, qui parlent de calories ou de protéines par kilogramme de poids corporel, de thymus et de globules blancs, et les psychologues, qui considèrent qu'un enfant est sauvé si sa pulsion de vie prédomine sur sa pulsion de mort, a été parfois difficile mais toujours enrichissante.

Grâce à un apport diététique approprié et à une stimulation psychosensorielle et affective, nous avons sauvé la quasi totalité des enfants gravement dénutris. Le retour de l'enfant à des conditions de vie défavorables, dans un environnement hostile, à l'origine de sa dénutrition, est un facteur important de rechute. Nous avons donc considéré qu'un enfant était sauvé lorsqu'il était sain au plan clinique et que sa taille et son poids étaient en voie de normalisation, mais aussi si nous pouvions le considérer guéri au niveau immunologique et psychologique.

Au cours de la récupération des enfants, nous avons observé une amélioration parallèle des paramètres cliniques, anthropométriques et immunologiques, et du

développement psychomoteur. Ces interactions entre immunité et nutrition, mais aussi entre psychisme et immunité, nous incitent à considérer le traitement de l'enfant dénutri comme un traitement intégral. Pour les mêmes raisons, la prévention d'une maladie à causes multiples comme la malnutrition doit être pluridisciplinaire.

Outre Ernesto Pollitt et l'équipe du Guatemala, d'autres chercheurs, notamment à l'Institut mexicain de nutrition, ont étudié les problèmes de nutrition et de développement infantile et ont tenté d'expliquer comment une diminution des interactions de l'enfant avec son milieu peut conduire à une diminution des capacités mentales. Plusieurs équipes défendent cette approche plus large où il est souvent difficile de déterminer l'importance relative de la dénutrition et de l'environnement défavorable.

Larry Brown et E. Pollitt décrivent brièvement les conditions de l'étude initiale menée au Guatemala de 1969 à 1977 : les femmes enceintes et les enfants de deux villages ont reçu un aliment de complément à forte teneur en protéines (Atole) et ceux de deux autres villages une boisson sans protéines (Fresco). Plus de 25 ans après, on peut s'étonner des divergences entre un tel protocole et les recommandations éthiques de 1993 du Conseil des organisations internationales des sciences médicales. Compte tenu de la supériorité de l'Atole en termes de réduction de la mortalité infantile, il est fort probable qu'une évaluation en cours d'expérience aurait permis aux enfants qui recevaient Fresco de bénéficier aussi des avantages procurés par Atole.

L'intérêt de l'article de L. Brown et E. Pollitt réside dans la projection qu'ils font, à partir d'observations en milieu rural dans un pays en développement, sur les rôles respectifs de l'éducation et de la nutrition parmi les couches socio-économiques les plus défavorisées, y compris dans les pays industrialisés. Ainsi que le précisent Michael Golden et A. Jackson, de l'Unité de recherche sur le métabolisme tropical de Kingston, « l'agression nutritionnelle n'est qu'une partie du syndrome de pauvreté où il existe souvent une privation émotionnelle, intellectuelle, culturelle, avec des parents mal informés. »

Dans la lutte contre la malnutrition, quelle que soit la gravité de cette dernière, toute intervention, pour être efficace, doit considérer le développement intégral de l'enfant, tant au plan physique que mental ou affectif. En septembre 1990, lors du sommet mondial pour les enfants, 159 pays s'étaient engagés à promouvoir tous ces aspects.

Philippe CHEVALIER
Laboratoire de nutrition tropicale, ORSTOM, Montpellier

Fresco. Le taux de mortalité infantile a diminué de 69 pour cent dans les villages qui recevaient Atole et de 24 pour cent seulement dans les villages qui recevaient Fresco. De même, seul Atole a amélioré la vitesse de croissance des enfants de moins de trois ans.

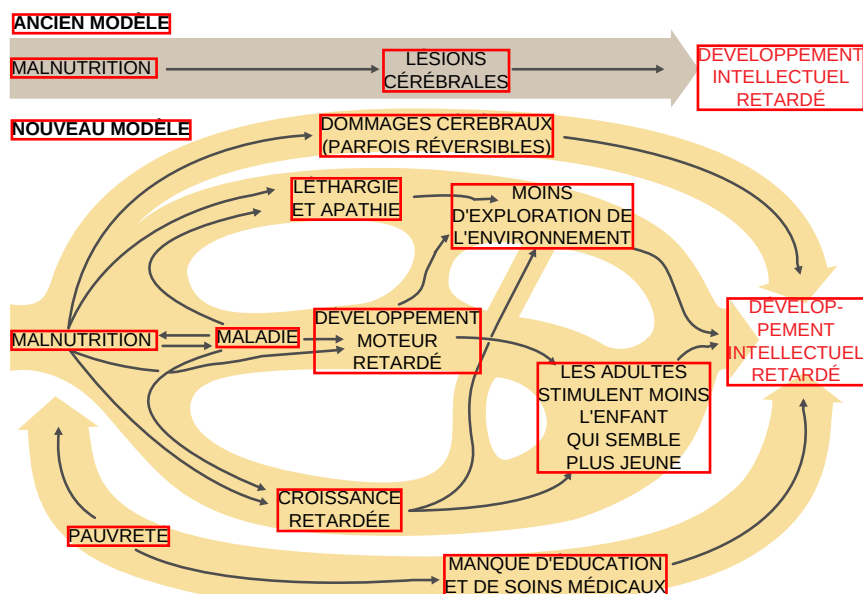
Une évaluation à long terme

En 1988 et en 1989, E. Pollitt et ses collègues ont évalué les conséquences à long terme de ces compléments nutritifs sur le développement intellectuel. Ils se sont notamment intéressés à un groupe de 600 adolescents et jeunes adultes, alors âgés de 11 à 27 ans, dont la mère avait consommé Atole ou Fresco pendant sa grossesse et qui en avaient poursuivi la consommation jusqu'à l'âge de deux ans au moins. Ces personnes ont passé des tests de vocabulaire et de compréhension écrite, un examen de culture générale, un test d'arithmétique et un test standard d'intelligence non verbale. Leurs résultats ont été corrélés à leur niveau d'éducation et au statut économique de leur famille (évalués selon la qualité de l'habitation, le métier du père et le niveau d'éducation de la mère).

Les enfants qui avaient reçu Atole au début de leur vie avaient de meilleurs résultats aux tests que ceux qui avaient reçu Fresco ; en outre, tous les enfants qui avaient consommé Atole avaient quasiment les mêmes résultats (*voir la figure 2*). Tous ces enfants étaient toutefois très pauvres, et leurs résultats étaient inférieurs à ceux des enfants de familles aux revenus moyens d'une région plus prospère du Guatemala : une bonne alimentation ne compense pas complètement les effets négatifs de la pauvreté sur la croissance intellectuelle.

Atole avait aussi accru les bénéfices de l'enseignement. Plus la scolarité avait été longue, plus les résultats des adolescents qui avaient consommé Atole et Fresco étaient différents. Une alimentation insuffisante réduit donc l'apport de l'enseignement. Selon d'autres études, les capacités d'apprentissage dépendent de la proximité du dernier repas : la prise d'un petit déjeuner avant la classe renforce ces capacités, surtout chez les enfants menacés par la malnutrition.

Les enfants qui ont consommé Atole auraient de meilleurs résultats



3. LA MALNUTRITION réduit les capacités intellectuelles selon plusieurs mécanismes. Les déficiences ne proviennent pas que de lésions cérébrales (en haut) : toute la santé est concernée (les apports d'énergie, le développement moteur et la croissance). En outre, la pauvreté économique et sociale renforce ces handicaps.

car leur croissance et leur développement social et émotionnel auraient été meilleurs. Les enfants qui avaient reçu Fresco présentaient une croissance plus lente et un temps de récupération plus long après les maladies. Comme leur développement avait été retardé, en moyenne ces enfants avaient commencé à marcher plus tard que ceux qui recevaient Atole. Ce retard aurait freiné l'acquisition des capacités cognitives qu'acquière les enfants lorsqu'ils explorent leur environnement.

Comme ces enfants sous-alimentés étaient restés petits pour leur âge, les adultes les auraient traités comme s'ils étaient plus jeunes. Ce comportement ralentirait le développement intellectuel : les enfants ne seraient pas stimulés comme d'autres enfants du même âge. À l'inverse, les enfants qui avaient consommé Atole étaient mieux nourris, grandissaient plus vite et auraient été plus stimulés par leur entourage. Les enfants qui avaient reçu Fresco avaient peut-être subi des lésions cérébrales, mais d'autres facteurs, tel l'environnement social de l'enfant, sont aussi importants.

Les résultats obtenus au Guatemala illustrent bien les interactions entre nutrition, pauvreté et éducation. Les compléments nutritifs ne compensent qu'en partie les conséquences de la pauvreté. Un enfant bien nourri explore plus son environnement, mais

une communauté pauvre n'offre pas grand chose à explorer. Bien que l'école stimule suffisamment les enfants, la malnutrition peut en réduire les bénéfices. Le résultat le plus important de cette étude est que la malnutrition infantile a des conséquences sur les capacités intellectuelles à l'âge adulte.

En outre, si les deux compléments nutritifs différaient surtout par leur teneur en protéines, ils apportaient aussi des quantités différentes d'énergie, de vitamines et de sels minéraux. D'autres travaux ont mis en évidence les liens entre les vitamines et les sels minéraux essentiels, et les capacités mentales. À Java, par exemple, E. Pollitt et ses collègues ont montré les liens étroits entre l'anémie par carence en fer (la conséquence la plus fréquente de la malnutrition) et la faiblesse des capacités intellectuelles et motrices chez l'enfant. Ils ont administré des compléments de fer à des bébés âgés de 12 à 18 mois qui souffraient d'anémie. Cet apport a amélioré les performances des enfants à des tests psychomoteurs.

Si l'on ne combat pas facilement la pauvreté sociale et économique, on peut au moins améliorer l'alimentation des enfants pauvres jusqu'à leur adolescence et réduire ainsi les handicaps intellectuels engendrés par la pauvreté. Toutefois, les compléments nutritionnels n'annulent pas, seuls, les conséquences à long terme de la sous-

nutrition infantile. L'idéal serait d'apporter un soutien supplémentaire au développement des capacités sociales, avec l'aide d'un parent ou d'un autre adulte. Des programmes éducatifs spécifiques pour les enfants des communautés pauvres peuvent remédier à des problèmes associés à la malnutrition infantile.

Pour être vraiment efficaces, ces interventions doivent être générales et soutenues. La plupart des enfants sous-alimentés vivent dans des conditions qui renforcent les conséquences de la malnutrition : ils n'ont que peu ou pas accès aux soins médicaux, et leurs écoles sont sous-équipées. Ces enfants sont aussi exposés à des maladies infectieuses qui réduisent considérablement leur énergie disponible pour apprendre.

La prévention de la malnutrition infantile est indispensable, pour des raisons morales mais aussi économiques. Des milliards de francs investis dans l'éducation sont gaspillés lorsque les écoliers sont intellectuellement handicapés par la malnutrition. Celle-ci réduit les capacités à apprendre et, plus tard, la productivité dans le travail. La lutte contre la malnutrition et ses conséquences améliorerait la qualité de vie et la productivité d'une couche importante de la population et, par conséquent, dans la société toute entière.

Larry BROWN dirige le Centre sur la faim, la pauvreté et la politique de nutrition de l'Université Tufts. Ernesto POLLITT est professeur de développement humain à l'Université de Davis, en Californie.

Nutrition and Behavior, sous la direction de Janina R. Galler, Plenum Press, 1984.

C. RICOUR, J. GHISOLFI, G. PUTET et O. GOULT, *Traité de nutrition pédiatrique*, éditions Maloine, 1993.

The Effects of Improved Nutrition in Early Childhood : The Institute of Nutrition of Central America and Panama (INCAP) Follow-up Study, sous la direction de Reynaldo Martorell et Nevin S. Scrimshaw, supplément de *Journal of Nutrition*, vol. 125, n° 4S, avril 1995.

The Relationship between Undernutrition and Behavioral Development in Children, sous la direction d'Ernesto Pollitt, supplément de *Journal of Nutrition*, vol. 125, n° 8S, août 1995.

Flottements

Un motif d'Op-Art dû à Hajime Ouchi, d'abord publié au Japon, puis repris dans une collection populaire américaine pour graphistes (*Japanese Optical and Geometrical Art*, Dover, 1977) intrigue les spécialistes de la perception visuelle. Une région circulaire, remplie d'une texture en damier étiré selon l'horizontale, y est entourée d'une couronne circulaire également texturée en damier, mais étiré selon la verticale. Quand on déplace le motif, par un mouvement de va et vient à l'horizontale, la région du centre semble se désolidariser de la page, et glisser sur la texture qui l'entoure. On sait que les textures très contrastées et fortement périodiques induisent parfois des instabilités visuelles, ou des couleurs illusoire, que l'on classe avec les effets de moirage. Repérée par Lothar Spillman, spécialiste des effets cinétiques dans la vision, et choisie pour figurer en couverture d'un de ses livres (L. Spillman et J.S. Werner, *Visual Perception : The Neurophysiological Foundations*, Academic Press, 1977), la figure d'Ouchi (*ci-contre*) entame une carrière scientifique.

Deux chercheurs italiens, Nicola Bruno et Paola Bressan ont étudié l'illusion et construit des variantes intéressantes. Ils ont montré que si une texture A est

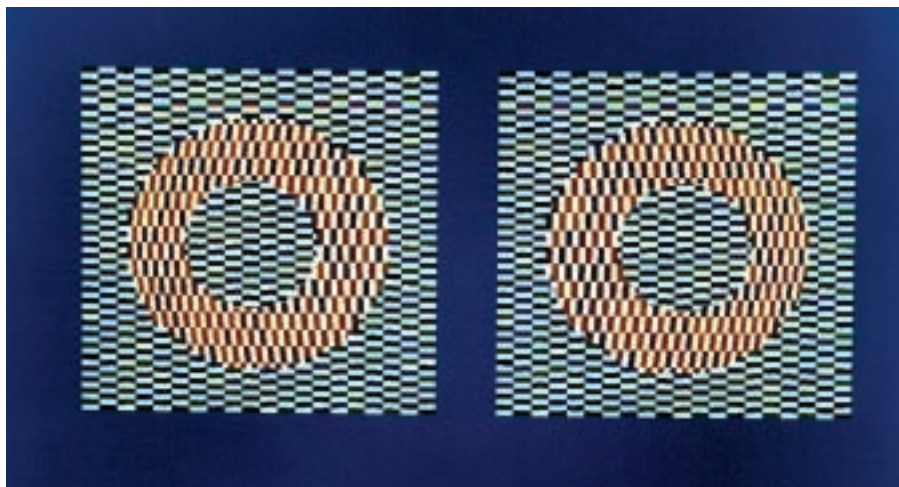
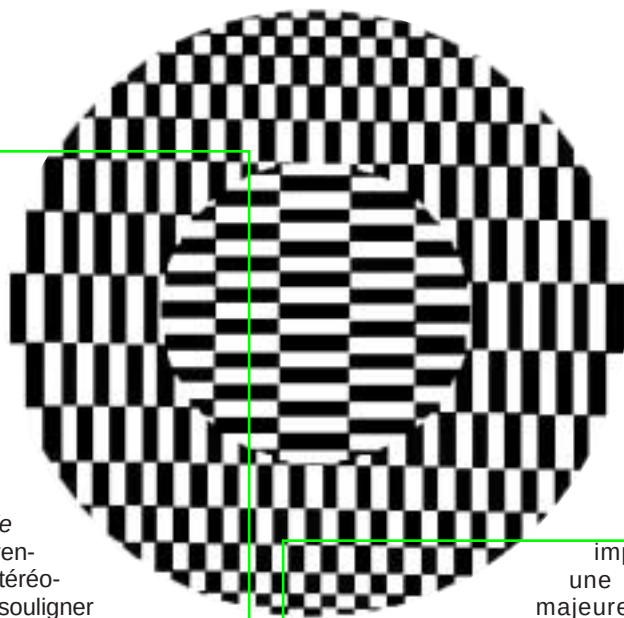
entourée d'une texture B entourée à son tour par A, c'est B qui semble se déplacer. Ils ont également montré que l'effet de glissement est maintenu (voir la figure en bas de la page), sinon renforcé en vision stéréoscopique. Il faut souligner que l'Italie produit, depuis des décennies, des travaux très imaginatifs dans le domaine de la perception visuelle auxquelles les revues scientifiques établies ne donnent pas toujours leur vraie place.

Selon les chercheurs australiens Hine, Cook et Rogers, l'illusion est maximale pour des textures orientées à 60 degrés l'une de l'autre (*Vision Research*, n° 35, 1995).

De pures rayures sont peu efficaces. L'aspect damier – ou plus exactement, l'existence d'éléments à frontières nettes – semble important. Le mouvement peut

impliquer une partie majeure de l'image. Deux portions d'image, qui comportent des orientations différentes, peuvent se mouvoir simultanément, selon des directions contraires. Le plus souvent, le mouvement illusoire est fédérateur : les zones contenant des éléments dont les orientations sont corrélées se déplacent de manière cohérente (voir la figure page ci-contre). Peut-être l'illusion est-elle la signature d'un processus qui tend à subdiviser l'environnement en ensembles significatifs.

Jacques NINIO,
CNRS et École normale supérieure, Paris





Jeux avec des cartes bifaces

JEAN-PAUL DELAHAYE

Jeux, patiences et magie mathématique avec les cartes Janus.

Pourquoi perdre une surface utile et ne pas imprimer les cartes à jouer des deux côtés? Pourquoi ne pas utiliser ces jeux à double face? Aucune raison à cela sinon la tradition, dont on sait qu'elle peut être bousculée. Nous allons explorer les possibilités du jeu *Janus*, inventé en 1988 par Roland Yéléhada, qui permet des combinaisons amusantes et pose plusieurs énigmes mathématiques.

LA STRUCTURE DU JEU

Le jeu *Janus* comporte 32 cartes de deux types : 16 cartes *parallèles* et 16 cartes *complémentaires*. Les 16 cartes *parallèles* sont (on indique à chaque fois les deux faces, séparées par le symbole /) :

7♥/7♠, 8♥/8♠, 9♥/9♠, 10♥/10♠
 V♥/V♠, D♥/D♠, R♥/R♠, A♥/A♠
 7♦/7♣, 8♦/8♣, 9♦/9♣, 10♦/10♣
 V♦/V♣, D♦/D♣, R♦/R♣, A♦/A♣

Le cœur et le pique qui se ressemblent – un pique n'est jamais qu'un cœur noir renversé avec une queue – sont associés et ce sont des couleurs *parallèles*. De même, le carreau et le trèfle sont aussi des couleurs *parallèles*.

Les 16 cartes *complémentaires* sont :
 7♥/A♣, 8♥/R♣, 9♥/D♣, 10♥/V♣
 V♥/10♣, D♥/9♣, R♥/8♣, A♥/7♣
 7♦/A♠, 8♦/R♠, 9♦/D♠, 10♦/V♠
 V♦/10♠, D♦/9♠, R♦/8♠, A♦/7♠

Derrière une face donnée, se trouve la face de hauteur complémentaire (le complément du 7 est l'as, celui du 8 est le roi, du 9 la dame, du 10 le valet) et de couleur complémentaire (le complément du cœur est le trèfle, et le complément du carreau est le pique).

Observons la structure de ce jeu, ce qui sera utile pour apprécier la suite :

- il y a 32 cartes, et donc 64 faces ;
- il y a deux 7♥, deux 8♥, etc. Chaque carte d'un jeu «habituel» de 32 cartes apparaît deux fois ;

- chaque carte a une face rouge et une face noire ;

- une carte sur deux comporte une face cœur (de même pour pique, carreau et trèfle) ;

- connaissant une seule face d'une carte, on ne peut pas savoir ce qu'il y a derrière, mais il n'y a que deux possibilités, selon que la carte est *parallèle* ou *complémentaire*. Si l'on voit un 10♥, l'autre face est soit un 10♠ (même hauteur et couleur *parallèle*) si la carte est *parallèle*, soit un V♠ (hauteur *complémentaire* et couleur *complémentaire*) si la carte est *complémentaire*.

Cette structure régulière permet de nombreuses combinaisons intéressantes et amène à faire des raisonnements de parités et de probabilités parfois simples et parfois... moins simples.

Pour disposer d'un jeu *Janus*, vous pouvez le fabriquer en quelques minutes à partir de deux jeux de 32 cartes et d'un peu colle ou de papier adhésif.

LE JEU DES MARIAGES PARFAITS

Commençons par un jeu auquel on peut jouer avec des enfants (à partir de 6 ou 7 ans) et qui renouvelle le fameux *jeu des mariages* (ou *poux chinois*, ou *memory*) et demande des capacités de raisonnement plutôt que de mémorisation pour gagner.

Après avoir choisi qui commence (chacun prend une carte au hasard, et la plus forte désigne qui a la main), on mélange le jeu et l'on étale les 32 cartes sur la table. Parmi les 32 faces visibles (32 autres sont cachées), certaines associations parfaites sont possibles : par exemple, deux valets de cœur peuvent être visibles. Tant qu'il reste de telles paires, les joueurs prennent, chacun à son tour, une telle *paire parfaite*. Ils ne retournent pas les cartes qu'ils enlèvent, et donc les faces cachées restent inconnues (cela en fait est sans importance, car, quand une *paire parfaite* est enlevée, elle comporte une carte *parallèle* et une carte *complémentaire*, et donc on sait ce qu'on retire).

Cette première phase achevée, chaque joueur retourne une carte de son choix à tour de rôle, carte qu'il laisse retournée même s'il n'obtient rien (dans le jeu classique, on retourne deux cartes). Si la carte retournée fait apparaître une *paire parfaite*, il la prend et c'est à l'autre joueur de jouer, sinon il passe son tour. Dans cette phase, il est intéressant de raisonner, et c'est l'intérêt du jeu : si par exemple le 7♥, le 7♠ et l'A♣ sont visibles vous pouvez retourner tranquillement le 7♥ et être certain de gagner une *paire* (car derrière un 7♥, il y a soit le 7♠, soit l'A♣). D'autres raisonnements plus subtils sont possibles si l'on tient compte des cartes enlevées dans la première phase du jeu, lesquelles doivent rester visibles. Le jeu se termine lorsque plus aucune carte ne reste sur la table. Chacun compte alors ses paires, et celui qui en a le plus a gagné.

Vous vous interrogez déjà : est-on toujours certain de ne laisser aucune carte sur la table? Ne se peut-il pas en effet que deux cartes, ou plus, restent sans qu'aucune association parfaite nouvelle ne puisse se faire? La réponse est que cela ne se produit jamais, et ce sera la première énigme.

Énigme 1

Pourquoi une partie de mariages parfaits ne laisse-t-elle jamais de cartes sur la table?

Solution 1

Pour établir qu'aucune carte ne reste jamais bloquée sur la table quand on joue aux mariages parfaits, analysons la structure des cartes *Janus* (ce qui nous aidera aussi à mieux jouer).

Distinguons deux catégories de faces : la catégorie α , incluant toutes les faces fortes (valet, dame, roi et as) de cœur ou de pique, et toutes les faces faibles (7, 8, 9 et 10) de carreau ou de trèfle ; la catégorie β , qui comporte toutes les faces fortes de carreau ou de trèfle, et toutes les faces faibles de cœur ou de pique.

Par construction du jeu *Janus*, derrière une face de catégorie α , il y a une face de catégorie β , et derrière une face de catégorie β , il y a une face de catégorie α , ce qui fait que l'on peut parler de cartes (et non plus de faces) de catégorie α , et de cartes de catégorie β .

Les hauteurs des faces sont associées par deux : 7 avec as, 8 avec roi, 9 avec dame et 10 avec valet. Distinguons donc quatre niveaux, le niveau 7/A, le niveau 8/R, le niveau 9/D, le niveau 10/V. Chaque carte appartient à un niveau et un seul. Chaque niveau comporte huit cartes.

Nous pouvons maintenant prouver que le jeu des mariages parfaits ne se bloque jamais. Lorsqu'on fait un mariage parfait, on associe deux cartes de même

catégorie (puisqu'elles ont une face identique) et de même niveau (pour la même raison). Il n'y a que quatre cartes appartenant à une catégorie fixée et à un niveau fixé (appelons l'ensemble de ces cartes une famille). Ainsi les quatre cartes du niveau 8/R de la catégorie β , la famille $\{8/R, b\}$, sont :

$8\heartsuit/8\spadesuit, 8\heartsuit/R\clubsuit, R\diamond/8\spadesuit, R\diamond/R\clubsuit$.

Aucune carte autre que ces quatre ne peut faire un mariage parfait avec l'une de ces quatre cartes : les mariages parfaits se font en famille ! Donc, lorsqu'un mariage a été fait entre deux de ces quatre cartes :

- ou bien les deux dernières cartes peuvent se marier ;

- ou bien les deux dernières cartes ne peuvent pas se marier, et alors aucune des deux cartes qui restent ne pourra se marier avec aucune autre du jeu (blocage).

On vérifie, par énumération des cas possibles, que, quel que soit le mariage fait de deux cartes parmi les quatre de la famille, les deux cartes qui restent peuvent faire un mariage parfait. Donc le blocage ne proviendra jamais de cette famille de quatre cartes. Les autres cartes se regroupent de la même façon, et donc aucun blocage n'est possible.

En poussant un peu plus loin l'analyse, on découvre une façon optimale de jouer : il faut traiter soigneusement le cas de quatre cartes d'une même famille. Si chacun des deux joueurs utilise cette stratégie optimale, alors aucun ne fera moins de quatre mariages parfaits ; la probabilité d'une partie nulle sera de $(3/4)^8$ égal à 6561/65536, soit 10,01 pour cent ; la probabilité de gagner pour celui qui commence sera de 255/512, soit 49,80 pour cent ; la probabilité de gagner pour celui qui joue en second sera de 26335/65536 égal à 40,18 pour cent. Ce jeu, si l'on joue parfaitement, donne donc un avantage de 10 pour cent à celui qui commence. Ce déséquilibre peut être annulé à 0,2 pour cent près, en convenant que les parties nulles sont gagnées par le joueur n'ayant pas commencé.

DEUX RÉUSSITES

Nous allons présenter maintenant deux réussites utilisant le jeu *Janus*, dont l'analyse mathématique complète est possible, ce qui est assez rare.

L'opération de base de la première réussite est le repliage : elle consiste à prendre deux paquets de cartes sur la

table et à retenir celui des deux qu'on a choisi sur l'autre, comme s'il s'agissait d'un livre : les deux faces qui étaient au-dessus des paquets sont mises en contact. Le paquet obtenu et reposé sur la table montre alors ce qui était la face arrière de la dernière carte du paquet replié.

Pour la première réussite, vous étalez les 32 cartes, puis vous repliez les cartes les unes sur les autres (comme indiqué ci-dessous) en vous imposant de ne replier que deux paquets dont la face visible est de même couleur (ne repliez un cœur que sur un cœur, un pique que sur un pique, etc.). Si, à la fin, vous réussissez à n'avoir plus qu'un paquet, vous avez gagné.

Énigme 2

Comment jouer parfaitement, et quelle est alors la probabilité de réussir ?

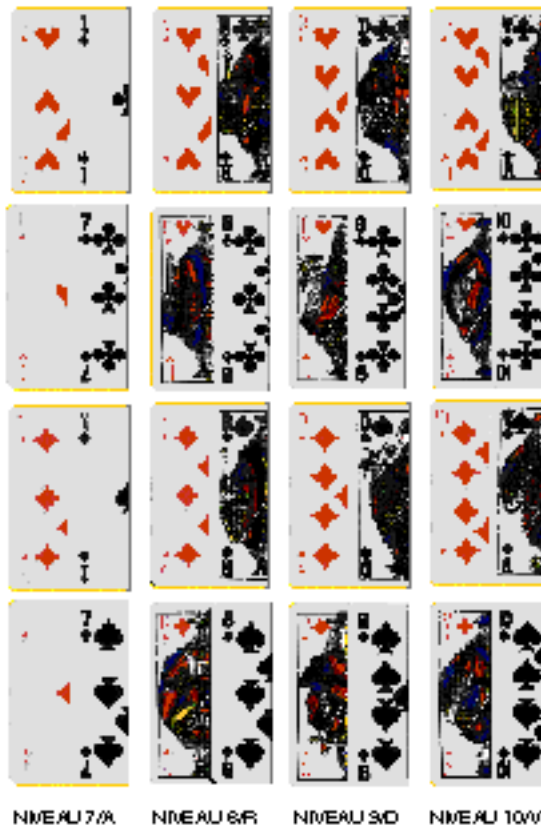
Solution 2

La probabilité de gagner est de 100 pour cent si l'on s'y prend bien, mais nous donnerons une méthode pour gagner avec 96,9 pour cent de chance (la stratégie que je connais pour gagner dans tous les cas est trop longue pour figurer ici). Existe-t-il une démonstration plus courte pour établir les 100 pour cent ? Lecteurs passionnés, à vos plumes !

LES 16 CARTES PARALLÈLES



LES 16 CARTES COMPLÉMENTAIRES



1. Les cartes *Janus* possèdent deux faces, représentées ici en demi-superposition. Les cartes parallèles possèdent deux faces de la même hauteur, et de couleurs opposées (soit cœur-pique, soit

carreau-trèfle). Les cartes complémentaires possèdent deux faces de hauteurs complémentaires et de couleurs opposées (cette fois, soit cœur-trèfle, soit carreau-pique).

Examinons d'abord les huit cartes parallèles portant du cœur et du pique : $7♥/7♠, 8♥/8♠, 9♥/9♠, 10♥/10♠, V♥/V♠, D♥/D♠, R♥/R♠, A♥/A♠$. Si ces huit cartes sont disposées au hasard et qu'elles ne sont pas toutes du même côté (pas toutes avec le cœur au-dessus, pas toutes avec le pique au-dessus), on peut les replier en deux paquets : l'un $♥/♠$ (cœur dessus, pique dessous) ; l'autre $♠/♥$. Je pourrais décrire la méthode établissant ce fait, mais quelques essais vous la feront trouver.

De la même façon, si les huit cartes parallèles portant du carreau et du trèfle ne sont pas toutes du même côté, vous pouvez les ramener par pliage à deux paquets : l'un $♦/♣$ et l'autre $♣/♦$. De la même façon, les cartes complémentaires

conduisent à quatre paquets : $♥/♣, ♣/♥, ♦/♠, ♠/♦$.

Reste à voir que les huit paquets ainsi obtenus peuvent se regrouper en un seul. Pour cela, numérotions ces paquets de 1 à 8 dans l'ordre suivant : $♥/♠, ♠/♥, ♦/♣, ♣/♦, ♥/♣, ♠/♥, ♦/♠, ♠/♦$. La séquence suivante d'opérations donne le résultat : plier le 1 sur le 5, le 8 sur le 5, le 3 sur le 5, le 4 sur le 5, le 5 sur le 7, le 7 sur le 6, le 6 sur le 2.

Cela établit donc que, si aucun des groupes de 8 cartes n'est malchanceux (toutes les cartes montrant la même couleur), alors on peut réussir. La probabilité pour qu'un groupe de 8 cartes soit malchanceux est $(1/2)^7$, soit $1/128$ car il faut que la deuxième carte soit dans le même sens que la première, que la troi-

sième aussi soit du même sens, etc. Pour qu'aucun des groupes ne soit malchanceux, la probabilité est donc de $(127/128)^4$, ou 96,91 pour cent. Pour passer de 96,91 pour cent à 100 pour cent, il faut traiter les cas où un groupe est malchanceux, puis deux, puis trois, puis quatre (c'est un peu pénible, mais on y arrive).

LA RÉUSSITE DU DOUBLE RETOURNEMENT

Présentons la seconde réussite avec le jeu *Janus* dont l'analyse mathématique est possible. Vous disposez toutes les cartes sur la table. En utilisant autant de fois que vous le jugerez bon l'opération de *double retournement* (deux cartes sont retournées simultanément), vous devez réussir à n'avoir plus aucune paire parfaite visible, autrement dit vous devez avoir face au-dessus un jeu normal de 32 cartes (vous en avez alors un au-dessous aussi).

Enigme 3

Comment jouer parfaitement, et quelle est la probabilité de réussir si on joue parfaitement ?

Solution 3

La probabilité de réussir est cette fois de 50 pour cent pour qui joue bien.

Montrons d'abord que, s'il y a un nombre impair de cartes ayant le noir au-dessus, vous ne réussirez jamais. En effet, lors d'une opération de double retournement, le nombre de cartes ayant le noir au-dessus varie soit de 0 (si vous retournez une carte noire et une carte rouge), soit de +2 (si vous retournez deux cartes rouges), soit de -2 (si vous retournez deux cartes noires). La parité du nombre de cartes ayant le noir au-dessus reste donc toujours la même. Donc, en partant d'un nombre impair de cartes noires, vous n'arrivez jamais à avoir un nombre pair de cartes noires, ce qui est nécessaire pour réussir.

Il faut donc que la configuration de départ comporte un nombre pair de cartes noires ; cette condition nécessaire, de probabilité $1/2$, est aussi une condition suffisante pour réussir. Voici pourquoi.

On suppose que le nombre de cartes ayant le noir au-dessus est pair.

Regroupez les cartes par *famille* (voir l'explication de l'énigme 1) sans les retourner. Arrangez-vous maintenant pour que la condition de parité soit satisfaite dans chaque famille. C'est possible, car si elle n'est pas satisfaite dans une famille, il y a une autre famille où elle ne l'est pas, et, en retournant une carte de chaque famille, vous la rendez alors vraie dans les deux familles. De proche en proche, vous pouvez donc la rendre vraie à l'intérieur de chaque famille. Dans chaque famille (vérifiant maintenant qu'un nombre

LE PRINCIPE DE GILBREATH

PRENEZ UNE SUITE REPETEE DE N CARTES

a b c a b c a b c a b c

COUPEZ LA SUITE EN DEUX PAQUETS

a b c a b c a ET b c a b c

INVERSEZ LE SECOND PAQUET

a b c a b c a ET c b a c b

FRACTIONNEZ CHAQUE PAQUET EN MORCEAUX PLUS PETITS

a b c a b c a = c b a c b

INTERCALEZ LES MORCEAUX DU PREMIER PAQUET AVEC CEUX DU SECOND

a b c b c a c a b c a b

REGROUPEZ LES CARTES PAR PAQUETS DE N

a b c b c a c a b c a b

CHAQUE PAQUET CONTIENT UNE CARTE DE CHAQUE SORT

DEMONSTRATION DU PRINCIPE DE GILBREATH

Le dernier paquet de n cartes dans les paquets finaux est obtenu en prenant une carte dans le paquet initial (la carte a sur fond bleu), puis successivement, soit une carte devant cette carte, soit une carte derrière cette carte, jusqu'à avoir n cartes (sans nécessairement alterner régulièrement les choix).

Le dernier paquet est donc constitué de n cartes consécutives de la suite initiale et comporte donc une carte de chaque sorte.

Le principe est donc démontré pour le dernier paquet de la suite finale.

Si on enlève les n cartes sur fond bleu du début jusqu'à la fin de la description des manipulations, les symboles restants décrivent la même manipulation avec une liste initiale plus courte de n cartes. Donc, du raisonnement précédent, on tire que l'avant-dernier paquet des paquets finaux contient aussi une carte de chaque sorte. Etc.

pair de cartes sont face noire au-dessus), appliquez l'algorithme suivant :

- si les quatre faces visibles sont différentes, ne rien faire ;

- s'il y a deux paires parfaites, retourner dans chacune d'elles la carte complémentaire, et maintenant les quatre faces visibles sont différentes ;

- s'il n'y a qu'une seule paire parfaite, la retourner, ce qui vous ramène au cas précédent.

Que cet algorithme donne les résultats que j'affirme se démontre en énumérant les huit cas possibles.

En appliquant cet algorithme à chacune des huit familles, vous atteindrez l'objectif de la réussite, car, dans chaque famille, toutes les faces montrées sont distinctes deux à deux et donc, dans l'ensemble du jeu, les 32 faces visibles sont distinctes. Il faut au plus 4 doubles retournements pour la première phase, et 16 (2 au plus pour chacune des huit familles) pour la seconde phase. Donc 20 doubles retournements suffiront toujours pour arriver au but. Je ne serais pas étonné d'apprendre qu'on peut faire mieux.

LE GÉNIAL PRINCIPE DE GILBREATH

Le principe de Gilbreath, qui est à l'origine de très nombreux tours de cartes, a été présenté en 1958 dans la revue américaine *The Linking Ring* par Norman Gilbreath, alors étudiant en mathématiques à l'Université de Californie, à Los Angeles. Son énoncé et sa démonstration sont donnés page 102.

Des centaines de tours de cartes exploitant ce principe ont été proposés depuis le premier décrit par Gilbreath en 1958. Ils sont tous fondés sur le fait que, lorsqu'on effectue le mélange (avec des cartes, cela correspond à un mélange en queue d'aronde ou en mitrailleuse : les deux parties d'un jeu sont insérées l'une dans l'autre), le spectateur a l'illusion qu'on introduit un désordre complet dans le jeu. Ces tours sont parfois un peu artificiels à cause de la phase correspondant à l'inversion de l'ordre des cartes (le magicien prétend par exemple qu'il doit compter les cartes). Avec les cartes *Janus*, cette étape gênante peut être évitée, puisque les cartes ont deux faces et que, pour inverser l'ordre d'un paquet, il suffit de le retourner. Voici deux exemples de tours.

Tour 1

Le magicien prend les 16 cartes parallèles du jeu *Janus* et les montre. Comme elles possèdent une structure très simple, le spectateur n'aura pas le sentiment d'être roulé par le fait qu'il y a deux faces. Ensuite le magicien confie les 16 cartes à un spec-

SCIENCES D'AVENIR



LA VIE DANS LES ABYSSES

Patrick Geistdoerfer

Les océans sont noirs, profonds et froids. Pourtant, ils sont peuplés, et la vie foisonne près des sources chaudes océaniques, ces oasis de vie au fond des mers. L'ouvrage décrit les conditions de vie dans un monde hostile, dont les habitants constitueront peut-être une nouvelle ressource alimentaire.

Patrick Geistdoerfer, directeur de recherche au CNRS, a observé les profondeurs sous-marines lors de campagnes océanographiques et étudié les poissons des profondeurs en laboratoire.



ONDES ET ONDELETTES

B. 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 exploitées.

Barbara Burke Hubbard est écrivain scientifique : elle retrace avec simplicité et chaleur comment les scientifiques pensent et hésitent avant que n'écluse une idée, et comment ils coopèrent.

Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN



DE L'ORDRE APRES LE DESORDRE

Le magicien prend les 16 cartes parallèles du jeu *Janus*. Elles sont battues :

10♥/10♠, 7♠/7♥, R♠/R♥, V♦/V♣, A♥/A♠, 7♠/7♥, R♦/R♣, 8♥/8♠,
9♦/9♣, 9♥/9♠, 10♣/10♦, D♣/D♦, V♠/V♥, 8♥/8♠, D♥/D♠, A♦/A♣

Le magicien confie les 16 cartes à un spectateur. Il demande à ce spectateur de retourner toutes les cartes du côté rouge et de classer les 16 cartes alternativement ♥, ♦, ♥, ♦, ♥, ♦, etc.

7♥/7♠, D♦/D♣, V♥/V♠, 8♦/8♣, D♥/D♠, A♦/A♣, 10♥/10♠, V♦/V♣,
A♥/A♠, 7♦/7♣, R♥/R♠, R♦/R♣, 8♥/8♠, 9♦/9♣, 9♥/9♠, 10♦/10♣

Le spectateur coupe le paquet en deux en l'ouvrant comme un livre (le paquet du dessus est donc inversé).

7♥/7♠, D♦/D♣, V♥/V♠, 8♦/8♣, D♥/D♠, A♦/A♣,
10♥/10♠, V♦/V♣, A♥/A♠, 7♦/7♣, R♥/R♠, R♦/R♣, 8♥/8♠, 9♦/9♣, 9♥/9♠, 10♦/10♣

A♠/A♦, D♠/D♥, 8♠/8♥, V♠/V♥, D♠/D♥, 7♠/7♥,
10♥/10♠, V♦/V♣, A♥/A♠, 7♦/7♣, R♥/R♠, R♦/R♣, 8♥/8♠, 9♦/9♣, 9♥/9♠, 10♦/10♣

Le spectateur effectue le mélange en mitraille des deux paquets (insertion irrégulière des deux paquets l'un dans l'autre) :

A♠/A♦, 10♥/10♠, V♦/V♣, D♠/D♥, A♥/A♠, 7♦/7♣, 8♠/8♥, V♠/V♥,
D♠/D♥, R♥/R♠, R♦/R♣, 8♥/8♠, 7♠/7♥, 9♦/9♣, 9♥/9♠, 10♦/10♣

Le paquet apparaît totalement en désordre : de chaque côté, il y a des ♥, des ♦, des ♠ et des ♣ qui semblent disposés sans régularité. Le magicien demande au spectateur de faire des paquets de deux cartes en prenant les deux cartes du dessus, puis les deux suivantes, etc.

A♠/A♦	10♥/10♠	V♦/V♣	D♠/D♥
A♥/A♠	7♦/7♣	8♠/8♥	V♠/V♥
D♠/D♥	R♥/R♠	R♦/R♣	8♥/8♠
7♠/7♥	9♦/9♣	9♥/9♠	10♦/10♣

Miracle! Dans chaque paquet de deux cartes, il y a exactement une face ♥, une face ♦, une face ♠ et une face ♣.

tateur et n'y touche plus du tout. Il demande au spectateur de retourner toutes les cartes du côté rouge et de classer les 16 cartes en un paquet alternativement ♥, ♦, ♥, ♦, ♥, ♦, etc. Le spectateur doit ensuite couper le paquet en deux en l'ouvrant comme un livre (le paquet du dessus est alors inversé), puis il doit effectuer le mélange en mitraille avec les deux paquets. Le paquet apparaît totalement en désordre : de chaque côté, il y a des ♥, des ♦, des ♠ et des ♣ qui semblent disposés sans régularité. Le magicien demande au spectateur de faire des paquets de deux cartes en prenant les deux cartes du dessus, puis les deux suivantes, etc. Il lui annonce (et n'hésite pas à faire un peu de mise en scène) qu'il s'est produit un miracle : dans chaque paquet de deux cartes, il y a une face ♥, une face ♦, une face ♠ et une face ♣ exactement. Ce que le spectateur vérifie lui-même sans que le magicien touche aucune carte.

Explication

Le principe de Gilbreath, appliqué ici avec n égal à 2, est l'origine du miracle.

Tour 2

Le magicien demande au spectateur de prendre maintenant les 16 cartes

complémentaires et, pour en expliquer la structure lui demande de les classer (sans tenir compte des couleurs, car elles suivent une règle simple qui n'a pas besoin d'explication) en composant un paquet comportant un 7, puis un 8, puis un 9 etc., jusqu'à l'as, deux fois de suite. En retournant le jeu, on a la même chose. Le spectateur est alors invité à mélanger le paquet de la façon suivante (il faut bien sûr que le spectateur respecte strictement ces consignes). Dans une première phase, le magicien demande de choisir un nombre m entre un et dix et invite le spectateur à retourner individuellement m cartes, qu'il choisit où il veut, en les remettant à leur place après retournement. Dans une seconde phase, comme pour le tour précédent, le spectateur est invité à ouvrir le jeu en deux comme un livre, puis doit insérer les deux paquets obtenus l'un dans l'autre. Le jeu apparaît bien mélangé. Le spectateur doit alors prendre les huit premières cartes du paquet obtenu (ou les huit dernières, s'il préfère), en retirer une qu'il ne montre pas au magicien. Il mélange les sept qui restent en utilisant cette fois la méthode qu'il souhaite et tend au magicien les sept cartes ainsi mises totalement en désordre. Le magicien jette

un œil rapide à ces sept cartes et annonce : « La carte que vous avez choisie est une carte 9/dame (ou 8/roi, etc.) », ce qui, bien sûr, est exact.

Explication

Après le retournement individuel de quelques cartes (leur nombre est sans importance), le jeu a gardé la structure : quatre fois de suite une carte 7/as, une carte 8/roi, une carte 9/dame, une carte 10/valet. Après le second mélange, d'après le principe de Gilbreath appliqué avec n égal à 4, les quatre premières cartes comportent exactement une carte 7/as, une carte 8/roi, une carte 9/dame, une carte 10/valet, ainsi que les quatre suivantes. Les huit premières cartes comportent donc exactement deux cartes 7/as, deux cartes 8/roi, deux cartes 9/dame, deux cartes 10/valet. Voyant les sept cartes que le spectateur lui tend, le magicien n'a donc aucun mal à déduire celle qui manque. Une variante consiste à préparer secrètement le jeu comme il se trouve à la fin du retournement individuel des m cartes, à le montrer aux spectateurs en leur faisant constater que le jeu est déjà battu (ce qui est un mensonge!), à leur demander de le mélanger encore plus, en leur faisant faire un mélange en mitraille après avoir ouvert le paquet comme un livre et à poursuivre comme précédemment.

CE N'ÉTAIENT QUE DES EXEMPLES

De nombreux jeux sont adaptables aux cartes *Janus* et apparaissent alors sous un jour nouveau et intéressant. Des variantes des réussites classiques peuvent être imaginées et se révèlent fréquemment plus amusantes que l'originale. Des tours mathématiques innombrables exploitant les propriétés de régularité et de parité du jeu *Janus* sont possibles. Ce nouveau jeu de cartes ouvre un univers riche et passionnant à ceux qui trouvent bon de passer quelques heures en compagnie de bouts de carton imprimés.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université des sciences et techniques de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

Richard WOLLMER, *Le principe de Gilbreath*, Magix, éditions du Spectacle, 3, rue de la Klebsau, 67100 Strasbourg.

Roland YÉLÉHADA, *Janus : le jeu de cartes à double face*, à paraître.

Martin GARDNER, *Math' Festival*, chap. 6, Bibliothèque Pour La Science, Paris, 1981.

Mots croisés et anagrammes

BERNARD IQUEAUX

Un petit voyage informatique dans le monde des cruciverbistes.

Les mots croisés, pense-t-on, dérivent des mots carrés, dont l'origine se perd dans la nuit des temps : à partir de définitions qui étaient souvent données en vers, on devait trouver des mots qui se disposaient en carré et se lisaient aussi bien verticalement qu'horizontalement. Puis, au début du ^{xx}e siècle, le Britannique Arthur Wynne introduisit des cases noires, afin de simplifier la tâche des carréverbistes. Il publia sa première grille le 21 décembre 1913, dans le supplément dominical *Fun* du journal américain *New York World* : le succès fut immédiat et, comme le jeu n'était pas protégé, il se popularisa rapidement : en 1923, le Britannique Morley Adams fondait une agence spécialisée qui diffusait des grilles dans toute la presse anglo-saxonne.

En France, la première grille de «mots en croix» fut publiée dans le *Dimanche illustré*. Ces mots en croix, devenus mots croisés, furent alors repris dans divers journaux, mais ils acquirent leurs véritables lettres de noblesse en décembre 1925, lorsque les *Nouvelles littéraires* et les éditions Bernard Grasset lancèrent un concours dont le premier prix était de 10 000 francs, puis lorsque Tristan Bernard et Jean Richepin publièrent un recueil de problèmes aux subtiles définitions.

C'est alors que le mot-croisiste, ou faiseur de grille, est surnommé Sphinx et que le cruciverbiste devient un Œdipe. Puis Tristan Bernard et sa collaboratrice Renée David publient des grilles assorties de magnifiques définitions, passées depuis dans le domaine public : ainsi

l'*entracte* «vide les baignoires et remplit les lavabos», le *ciel* «précède le mari». On retiendra également de Robert Lespagnol : le *pantalon* qui est une «éclipse de lune», le *sperme*, qui est une «eau de vie» ou *lo*, qui fut «victime d'une vacherie». Et l'on n'oubliera jamais Robert Scipion, qui publia dans le *Nouvel Observateur* que le *nonagénaire* fait «du vieux avec du neuf» ou que le *do* est un «demi-sommeil». Aujourd'hui Robert Scipion a créé un mouvement de Sphinx qui minimisent le nombre de cases noires (en général 10 ou 11 pour une grille de 12 cases sur 10, soit environ 9 pour cent du nombre de cases) au prix de contorsions et de chevilles, c'est-à-dire de groupe de lettres dont on s'efforce de trouver une définition (par exemple, «quartier de Béziers» pour *ezi*). Les grilles de cette tendance sont d'autant plus plaisantes qu'elles collent souvent à l'actualité.

L'autre tendance, celle de Guy Brouty, dans *Le Monde*, admet des

cases noires plus nombreuses (de 13 à 14 pour cent) mais refuse les chevilles. Le cas de la presse anglo-saxonne est particulier, car on trouve parfois dans *The Times* des grilles où les cases noires sont plus nombreuses que les cases blanches.

MOTS CROISÉS ET ANAGRAMMES

Un grand Sphinx fut Georges Pérec, qui publia notamment *La disparition*, où ne figure aucune lettre *e*. Son ami Raymond Queneau, fondateur du mouvement littéraire nommé Oulipo (*Ouvroir de littérature potentielle*), avait introduit dans son dernier roman *Le vol d'Icare*, une héroïne pour le moins originale :

«LN

Et tu t'appelles comment ?

Icare

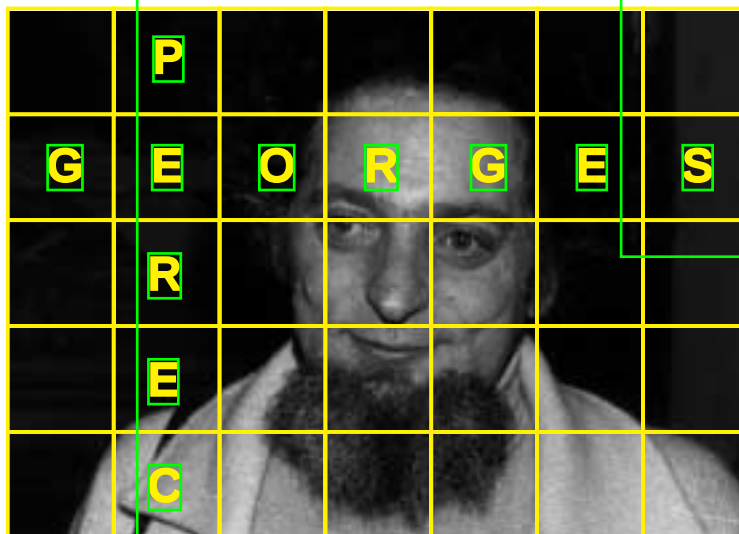
Je ne sais plus très bien... Je ne vole plus, je nage... Et vous, Mademoiselle : Hélène ?

LN

Non, LN en deux lettres. Je suis d'origine cruciverbiste.»

Pérec, revenons-y, a produit la théorie la plus pertinente concernant la construction des grilles de mots croisés. Construire une grille est une tâche difficile si l'on veut minimiser le nombre de cases noires et si l'on veut éviter les chevilles, les mots inversés, les lettres ou parties de mots dans le désordre. Il y a 17 ans, Pérec en révélait les arcanes dans *Les mots croisés*. Précurseur éclairé, il suggérait que les mots croisés soient constitués par deux personnages distincts, celui qui construit les grilles, et celui qui laisse son imagination flotter librement, au gré des associations évoquées par les mots, pour créer les définitions. C'est le rôle du premier personnage que nous avons imparti à l'ordinateur avec, naturellement, une modélisation et une algorithmique appropriées.

Pérec écrit également qu'une grille parfaite ne devrait comporter aucune case noire, et il cherche de telles grilles de 1, de 2, de 3, de 4, de 5 et de 6 cases de côté. Il constate que créer des grilles sans cases noires se fait presque sans effort jusqu'à quatre cases de côté, mais que la recherche d'une grille parfaite de cinq cases de côté devient très



1. Georges Pérec (en fond) fut un théoricien des mots croisés. En son honneur, pouvez-vous créer une grille de mots croisés de sept cases par cinq, sans case noire, avec les mots «Georges» en 11 horizontal et «Pérec» en 2 vertical (voir la solution en fin d'article)?

souvent de pertinence. Il faut trier manuellement le bon grain de l'ivraie.

Les anagrammes produites à partir des noms et prénoms des personnes connues sont parfois amusantes. Deux des seuls qui y résistent, tant en français qu'en anglais, sont Johnny Halliday et Jean-Philippe Smet, le vrai nom du chanteur. En revanche, Boris Vian s'était donné une tâche facile, car notre programme lui trouve les anagrammes suivantes : ABRI OVNIS, BAR VOISIN, BISON RAVI, BOIRA VINS, VOIS RABIN, VISA ROBIN, VIRAI SNOB, VIBRA SOIN.

LES GRILLES AUTOMATIQUES

Revenons maintenant aux mots croisés en considérant une grille carrée de N cases de côté sans case noire, ce qui permet de simplifier la description de la méthode. Nous commençons par construire, à partir du dictionnaire général, un dictionnaire qui ne comporte que des mots de longueur N . Puis la génération s'effectue en deux étapes : on définit la taille de la grille, on place les mots que l'on désire y voir figurer (ce que l'on nomme la «potence» quand seules les premières ligne et colonne sont remplies, et le «canevas de grille» dans les autres cas) ; puis, dans le cas d'une potence, le générateur tente de placer un mot sur la seconde ligne, tout en vérifiant qu'il existe des mots, présents dans le dictionnaire, dans le sens vertical. Quand toutes les vérifications sont positives, le générateur tente de placer un mot sur la troisième ligne en effectuant les mêmes vérifications que précédemment, etc. En fin de travail, on obtient l'ensemble des grilles possibles correspondant à la potence.

Examinons plus précisément comment on place les lettres dans les cases. Considérons le stade où l'on essaie de placer une lettre dans la case (i, j) de la grille (i est le numéro de la ligne, et j celui de la colonne), après avoir correctement rempli toutes les cases précédentes. Nous notons $Placer(nœud, i, j)$ la fonction récursive qui place une lettre dans la case considérée.

Cette fonction consiste d'abord à tenter de placer dans la case (i, j) la lettre correspondant au premier nœud situé derrière le dernier nœud exploré dans l'arbre (son «fils»). On vérifie alors qu'en ajoutant cette lettre horizontalement, il existe bien un début de mot vertical dans l'arbre dictionnaire. Si tel est le cas, on place la lettre trouvée dans la case (i, j) et on place à la case suivante, $(i, j+1)$, ou bien, si j est égal à N , dans la case $(i+1, 1)$. Cela revient à appeler $Placer(fils\text{-}nœud, i, j+1)$ si j est différent de N et $Placer(racine\text{-}du\text{-}dictionnaire, i+1, 1)$ si

APP A I R A
G E O R G E S
A R I A N E S
C E R N E R A
A C E N S A I

APP A I R A
G E O R G E S
A R R H A N T
D E R A M E R
A C I N E S E

APP A I R E
G E O R G E S
A R I S E N T
D E S I S T E
E C E N T E S

A P T O I S E
G E O R G E S
A R I S E N T
C E L A S S E
E C E N T E S

APP A I R A
G E O R G E S
A R I A N E S
C E R N E R A
A C E N S A S

APP A I R A
G E O R G E S
O R G A N E S
R E G N E R A
A C E N S A I

APP A I R E
G E O R G E S
A R I S E N T
V E R I S T E
E C E N T E S

A P T O I S E
G E O R G E S
A R I S E N T
D E L A S S A
E C E N T E S

4. Quelques grilles solutions de celle qui est proposée en début d'article.

j est égal à N . Si i et j sont tous deux simultanément égaux à N , alors on affiche la grille ; sinon, on poursuit l'algorithme.

«Ensuite, quoi qu'il arrive», on tente de placer dans la case (i, j) la lettre correspondant au premier frère du dernier nœud exploré (ce qui revient à appliquer l'algorithme avec ce premier frère comme nœud à explorer sans changer les paramètres i et j , c'est-à-dire à appeler $Placer(\text{premier-frère}, i, j)$). Si le dernier nœud exploré n'a pas de frère, alors on quitte l'algorithme en cours. Comme cet algorithme s'appelle lui-même, quitter l'algorithme en cours signifie qu'on remonte d'un niveau dans la récursion. L'algorithme, conformément à la clause «ensuite quoi qu'il arrive», cherche alors la lettre suivante dans la case précédente, à savoir la case $(i, j-1)$ ou, si j est égal à N , dans la case $(N, j-1)$. Ainsi, en parcourant l'arbre de la racine vers les feuilles et du premier mot vers le dernier de la liste alphabétique, on explore toutes les grilles carrées de N cases de côté sans cases noires qu'il est possible de construire avec le dictionnaire utilisé.

Nous avons ultérieurement modifié cet algorithme afin qu'il accepte des cases noires, puis avec des lettres imposées dans certaines cases, mais le principe reste le même. Cet algorithme construit, nous avons cherché les grilles de sept cases horizontalement et de cinq cases verticalement, avec le canevas de grille GEORGES horizontal et PEREC vertical, le premier E de GEORGES servant de premier E de PEREC. Les grilles trouvées sont indiquées sur la figure 4.

Dans le cas des grilles carrées, avec seulement la première ligne passée en potence, on constate que, pour une même potence, on obtient assez souvent des grilles symétriques, les mêmes mots apparaissant en horizontal et en vertical, à la même position. Les grilles obtenues sont groupées par paquets dont les éléments diffèrent peu : par exemple, une grille de sept cases de côté comportera ACCEDAS en 1 vertical et SASSEES en VII horizontal, et l'autre aura ACCEDAT et TASSEES

aux mêmes positions, le S commun ayant été remplacé par un T. Si l'on ne veut publier que des grilles originales, on devra choisir l'une d'entre elles.

Aidé par l'ordinateur, on oublie le cauchemar péréquien : on obtient facilement des grilles de neuf cases de côté avec trois cases noires, et l'on bat de deux cases le record de Robert Scipion, avec des grilles de 12 par 10 comportant seulement huit cases noires. Quant aux grilles de dix cases de côté avec seulement cinq cases noires, on en obtient une ribambelle. Naturellement, moins il y a de cases noires, plus le temps de calcul augmente.

Nous avons pris comme base la potence utilisée par Pérec dans sa tentative infructueuse de trouver une grille de sept cases de côté sans case noire. Le résultat a été obtenu en 347 secondes sur un ordinateur à base de processeur Pentium 120 MHz. La potence est représentée dans la première case de la figure 3, et les résultats (28 grilles) sont placés dans les cases restantes. On observe une fréquence élevée de S, de nombreux imparfaits du subjonctifs.

Qui trouvera maintenant des grilles parfaites de neuf cases de côté ?

Bernard IQEUAUX est responsable du développement de la Société **Phoenixx Systèmes**, qui commercialise les programmes de génération présentés dans l'article (**Minitel** : 3615 CRUCI et adresse **Internet** : <http://www.biqueaux@adiabasoft.com>).

Guy HACHETTE, *Des mots pour jouer*, éditions Jibena.

Georges PÉREC, *Les mots croisés*, éditions POL et Mazarine.

Josiane et Patrick BURGEL, *Le guide de l'Anagramme prémonitoire*, éditions Guy Tredaniel.

Andrew APPEL et **Guy JACOBSON**, *The World Fastest Scrabble Program*, in *Communications of the ACM*, vol. 31, n°5, mai 1988.

Chimie

De la chimie des hormones à la pilule

Carl Djerassi. Éditions Belin, 1995.

Quels que soient les médias utilisés pour «accrocher» l'ignorant de bonne volonté disposé à acquérir du savoir, le vulgarisateur scientifique dispose de moyens qui ne sont pas illimités. Supposons remplis deux préalables : (1) les connaissances qu'il entend communiquer ne sont pas dépourvues d'intérêt ; (2) il a bien compris ce qu'il veut expliquer. Restent à trouver les voies et les moyens de transmission du message. Parmi ceux-ci, depuis Platon et Galilée, le *dialogue* reste parmi les plus efficaces. Le XIX^e siècle – siècle d'or de la vulgarisation – nous a légué toute une floraison d'*entretiens* et de *conversations* sur les sujets les plus divers, de l'astronomie à la chimie. Aujourd'hui, moins couru et moins facile dans le domaine de l'écrit que dans celui de l'audiovisuel, l'*interview* (l'*entrevue* dont parlent nos collègues canadiens) entre le savant et le journaliste qui veut s'instruire devant témoins perpétue cette longue tradition.

Un autre recours, pour rendre la science digeste et attrayante, est la science romancée, où s'essayèrent, au siècle dernier, des auteurs comme Lucien Biart avec son *Grand-père Maxime. Histoire d'un vieux chimiste et de deux orphelins* (1887) ou, plus près de nous, George Gamow avec les explorations diverses de son héros (*M. Tompkins explore l'atome* (1954), *M. Tompkins s'explore lui-même* (1955), etc.).

Le dernier livre de Carl Djerassi, lui, nous rappelle très opportunément que les biographies de savants ou leurs autobiographies peuvent également constituer un bon moyen de faire connaître au grand public le contenu de la science, en nous révélant du même coup par qui et comment cette dernière se fabrique.

C. Djerassi, une des vedettes de la chimie américaine de l'après-guerre, n'est pas inconnu pour les non-spécialistes de langue française qui savent choisir leurs lectures. Il y a quelques années, il a publié un roman, *Le dilemme de Cantor* (éditions Balland, 1992), qui n'a pas échappé aux curieux des mœurs scientifiques. Cette histoire de fraude et de prix Nobel tourne autour de la quête pathologique de reconnaissance internationale qui obsède d'innombrables chercheurs. À cet égard, ceux qui connaissent l'au-

teur y auront retrouvé des situations et des préoccupations qui respirent l'authenticité du vécu : C. Djerassi n'a pas eu le prix Nobel, alors qu'il n'est pas le seul à croire qu'il l'aurait mérité.

Inventeur d'une hormone artificielle qui devait devenir, entre les mains du biologiste Gregory Pincus, «la» pilule anti-conceptionnelle, artisan de la mutation qui, à partir des années 1950, a transfiguré la chimie organique par la mise en pratique de nouvelles méthodes empruntées à la physique, pionnier dans le domaine de la recherche de nouvelles substances naturelles d'origine marine, scientifique préoccupé des problèmes de société qu'ont soulevés ses propres travaux, collectionneur d'art précolombien et de la meilleure peinture moderne, mécène, créateur d'entreprise, dandy, séducteur, écrivain et poète : ce n'est pas à un chimiste ordinaire que nous devons cet ouvrage hybride, qui relève autant de la littérature que de l'histoire des sciences et de l'histoire tout court.

Son autobiographie, agréablement traduite, ne manquera pas de susciter des réactions diverses. La présence parfois encombrante de l'auteur, sa volonté de vouloir convaincre avec insistance qu'il est aussi homme de lettres et de culture pourront parfois irriter les moins indulgents. C. Djerassi lui-même va au-devant de ces mouvements d'humeur : «Tout ce qui peut être dit sur les récits autobiographiques, complaisance à l'égard de soi-même, vérités détournées, cajoleries délibérées ou inconscientes de sa propre image, tout cela, sans nul doute, a été déjà dit bien des fois.» Certains chapitres de l'ouvrage, à l'évidence, n'étaient pas d'une nécessité absolue, mais comment rester insensible à la lecture de ce chapitre bouleversant et pudique intitulé «Une dispersion des cendres», où C. Djerassi raconte la recherche éperdue du cadavre de sa fille Paméla, qui s'est suicidée au fond d'un bois ?

Reste à faire l'éloge du récit de l'aventure proprement scientifique de ce jeune juif mi-Autrichien, mi-Bulgare, né à Vienne en 1923 et émigré aux États-Unis en 1939 à la suite de l'Anschluss. Dès le troisième chapitre du livre, le lecteur sera plongé, sous la surveillance d'un maître nageur qui connaît son métier, dans le grand bain de la chimie des hormones annoncé par le titre. Il assistera à la naissance de la pilule anti-ovulatoire qui a changé la vie de millions de femmes. Plus tard, il accompagnera C. Djerassi dans ses réflexions sur les conséquences socio-économiques considérables d'une recherche sur les *stéroïdes*, dans le style de ce qui se faisait à l'époque, sans moyens exceptionnels, dans un petit laboratoire mexicain.

Pour celui que la vulgarisation passionne, mais qui se retrouve juge et partie devant l'un des rares ouvrages qui porte sur l'exploration d'un domaine qu'il connaît trop bien, il n'est guère possible de garantir que ce livre soit facile pour tout le monde. Je me risque cependant à dire que je ne connais pas de tentative plus vivante que cette autobiographie pour donner une idée de ce que peut – aussi – être la chimie de ce siècle.

Jean JACQUES

Histoire des sciences

Bain de science

Sven Ortoli et Nicolas Witkowski. Éditions du Seuil, 1996.

Quand Roland Barthes offrit ses mythologies à un public gavé de signifiant et depuis longtemps oublieux du signifié des choses, ce fut pour beaucoup une illumination qui se répandit bien au-delà du cercle restreint des lecteurs. Il est vrai que les idées, comme les prions de la vache folle, ne se propagent pas par contact direct avec l'agent infectieux, mais par une sorte de mimétisme, à son tour, source féconde de mythes scientifiques. Le livre de Sven Ortoli et Nicolas Witkowski se situe dans la lignée de l'œuvre de Barthes ; cela suffit à en indiquer l'importance, que ne parvient pas à masquer le style enjoué et dépourvu de pédantisme.

Plus la science est présente dans la société et moins elle est objet de savoir, fonctionnant comme un mystère porteur d'une vérité révélée qui finit par sédimenter, comme jadis la religion, sous forme de breloques et d'images pieuses. «À défaut de comprendre les tenants et aboutissants d'une nouvelle théorie, [on se contente] – comme les amateurs d'autographes, les rockers qui collectionnent pieusement des bouts de veste de Johnny, ou les enfants qui conservent dans un tiroir un trésor de ressorts carrés, d'engrenages et de bouts de ficelle – d'en saisir le contexte, l'accessoire, pour l'ériger en relique sainte dans son petit musée personnel.»

La science, comme la religion, possède ses héros fondateurs. Archimède, le premier d'entre eux, a bondi nu et trempé hors de son bain en criant *euréka*.



Selon Vitruve, Archimède trouva dans son bain un moyen de confondre l'orfèvre qui avait mêlé un métal peu coûteux à l'or utilisé pour la couronne d'Hiéron de Syracuse. Les choses se sont-elles passées ainsi ?

(«j'ai trouvé!»), livrant au monde un principe dont on se rend bien compte, à la lecture de nos deux démystificateurs, de tout ce qu'il contient en puissance d'ignorance et de superstitions pour les générations à venir. Et puis le grand savant est aussi un inventeur génial d'armes et d'engins de mort de toutes sortes. C'est une tradition qui sera maintenue. Ingénieur talentueux en armement, le grand Léonard, institué savant universel, a gâché son génie de peintre à cause de son goût pour le bricolage. Bernard Palissy a fait feu de tout bois pour retrouver le secret de l'émail et s'assurer un train de vie digne de ces inventeurs qui font aujourd'hui les *success stories*, et qu'il finisse embastillé n'est pas pour surprendre les contemporains de Bernard Tapie.

Les savants eux-mêmes mettent souvent la main à la pâte dans l'édification de leur propre mythe. La pomme de Newton n'est tombée qu'en 1726, à la veille de la mort du grand homme, lors de la rédaction de ses mémoires et, probablement, pour l'édification de sa charmante nièce Catherine, qui n'avait pas manqué de croquer le fruit en compagnie d'un amant influent, le ministre Halifax, protecteur de Newton, auquel Voltaire attribue tout le succès de la gravitation universelle dans les salons mondains.

Dans la galerie, des mythes se succèdent : Frankenstein, le créateur confondu avec sa créature ; Darwin et ses ancêtres singes ; Maxwell et son démon ; Mendeleïev rassemblant dans un tableau les «éléments» épars de l'Univers ; Nobel, ou le

cocu vindicatif ; Einstein, fou et débile mental en proie à l'amour du monde ; Matila Ghyka et son nombre d'or ; le chat de Schrödinger dont le sourire dissimule le secret de la physique quantique ; trous noirs ou papillons dont les battements d'ailes déclenchent les cyclones, etc.

On ne peut raconter ce livre merveilleux. Loin de démystifier, il nous plonge dans le rêve et nous invite à trinquer joyeusement à la santé de nos savants.

Jean-Didier VINCENT

Philosophie des sciences

L'autorité de la science

François Lurçat. Éditions du Cerf, 1995.

Mille personnes pensent-elles plus juste qu'une seule ? Pas forcément. Pour François Lurçat, il n'y a aucune raison de se réjouir de l'accroissement considérable du nombre des chercheurs scientifiques dans les 30 dernières années. Cette «massification» de la recherche a entraîné un suivisme intellectuel qu'il décrit féroce. Les scientifiques ont, en

bonne partie, renoncé à comprendre leurs disciplines pour se contenter d'affirmer leur professionnalisme. Autrefois, ils étaient leurs propres maîtres, comme des artisans ; aujourd'hui, ils dépendent de leurs supérieurs, comme des salariés dépendent de leurs patrons. Les chercheurs préfèrent désormais le consensus à la critique et font passer l'opinion avant la connaissance. Comme la société tout entière, ils se sont laissés prendre par le culte des médias, de la publicité, des sondages.

Un livre élitiste ? Sans doute, mais à condition de donner à ce terme un sens dépourvu de la moindre morgue. Plutôt qu'élitiste, disons que F. Lurçat est déçu par les scientifiques qui, manquant d'exigence vis-à-vis d'eux-mêmes, développent des techniques sans s'interroger sur leur sens. Tout son livre est éclairé par cette belle citation d'Emmanuel Levinas : «Le savoir ne devient savoir d'un fait que si, en même temps, il est critique, s'il se met en question, remonte au-delà de son origine (mouvement contre nature, qui consiste à quérir plus haut que son origine et qui atteste ou décrit une liberté créée).»

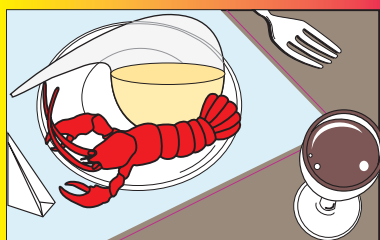
Professeur émérite de physique à l'Université Paris 11 d'Orsay, F. Lurçat est bien placé pour déceler et critiquer le «physicalisme», c'est-à-dire la tendance de certaines sciences à prendre la physique comme idéal de scientificité et à se modeler sur elle. Par exemple, elles s'emploient à réduire le complexe au simple. Double erreur, selon F. Lurçat. D'abord, cette conception de la physique est discutable ; de plus, quand des biologistes procèdent de la sorte, le réductionnisme où ils tombent est dangereux : il transforme l'homme en sujet d'expériences. Mieux vaudrait tirer la leçon des horreurs auxquelles ce genre d'attitude a conduit les scientifiques nazis. F. Lurçat attaque durement les neurosciences, en particulier J.-P. Changeux, dont l'homme neuronal – exemple extrême de réductionnisme – n'a ni corps ni esprit. Il n'est pas moins sévère avec un certain nombre de pseudo-sciences. Ainsi la «psychologie scientifique» ne fait-elle que mimer la scientificité : elle remplace la réflexion critique sur les fondements par un rituel d'imitation. F. Lurçat dénonce le bluff mathématique pratiqué par l'école de Piaget. Face à ceux qui se laissent fasciner par le formalisme et l'abstraction, il rappelle cette évidence trop oubliée : la constatation est plus riche que la déduction. De façon générale, il rejette le scientisme. S'inspirant de Dominique Janicaud, il en donne une caractérisation : le discours scientiste ne retient de la science que ses certitudes, non son sens critique.

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 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 29 mai 1996



Composé de divers articles, le livre de F. Lurçat comprend également des réflexions plus techniques sur certains concepts physiques (espace, temps, chaos) que je ne puis discuter. Encore que je le croie volontiers quand il souligne le caractère hautement spéculatif de cette «théorie communément admise» qu'est le Big Bang.

Bref, ce livre dresse ce qu'il est convenu d'appeler un «réquisitoire accablant» contre l'état actuel de la recherche scientifique. Souhaitons qu'il fasse naître des discussions passionnées et argumentées. Un vif débat d'idées au sein de la communauté scientifique serait le démenti le plus sain que cette dernière pourrait apporter à F. Lurçat.

Didier NORDON

Physique

Turbulence

Uriel Frisch. Cambridge University Press, 1995.

Si le titre, simple et banal, renvoie naturellement aux observations de l'écoulement d'un torrent ou aux mouvements des nuages et des vagues, l'étude de la turbulence reste sans doute le problème le plus redoutable de la physique contemporaine.

Sir Horace Lamb, dont le livre *Hydrodynamics*, écrit dans les dernières années du XIX^e siècle, est un premier ouvrage moderne de référence de mécanique des fluides, disait à la fin de sa vie : «Je suis un vieil homme maintenant et, lorsque j'irai au ciel, il y a deux choses que j'aimerais comprendre : l'une est l'électrodynamique quantique et l'autre est le mouvement turbulent des fluides. Concernant le premier sujet, je suis plutôt optimiste...»

Pourtant, Lucrèce pose déjà, à travers le clinamen, le problème de la sensibilité des écoulements turbulents à de petites influences. Les dessins de Léonard de Vinci, tel celui qui illustre la couverture du livre d'Uriel Frisch, montrent de façon saisissante la structure tourbillonnaire de l'écoulement d'eau derrière un obstacle. U. Frisch a d'ailleurs retrouvé cette description de la turbulence par Léonard de Vinci :

doue la turbolenza della acqua si genera
doue la turbolenza dell acqua si mantiene pluglo
doue la turbolenza dell acqua si posa

(où la turbulence de l'eau se crée
où la turbulence de l'eau se maintient longtemps
où la turbulence retourne au repos).

Le problème est déjà bien posé : de l'énergie est introduite par les grands mouvements de l'écoulement. Elle se transfère dans des mouvements à des échelles



L'étude de la turbulence a progressé grâce à l'exploration du chaos. Ici on a effectué le mélange de traceurs rouge et vert dans de la glycérine. Après avoir déplacé dix fois la paroi supérieure et la paroi inférieure, on obtient un mélange chaotique du traceur rouge et un mélange non chaotique du traceur vert.

de plus en plus petites, jusqu'à se dissiper dans des petits tourbillons. C'est à cette «cascade turbulente» de l'énergie qu'est attaché le nom de deux des plus grands savants de ce siècle, les théoriciens russes Andrei Kolmogorov et Lev Landau.

U. Frisch fait le point sur 50 ans d'une recherche active à partir de K41 (nom de code pour un article fameux de Kolmogorov écrit en 1941!) jusqu'à ses développements actuels, marqués, en particulier, par le travail expérimental d'Yves Couder, au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure, qui bouscule quelque peu l'image traditionnelle de la cascade turbulente.

Le livre de U. Frisch est appelé, sans doute, à être la référence sur le sujet. Écrit à partir de cours de D.E.A. donnés à l'Université de Nice Sophia-Antipolis, l'ouvrage associe une présentation très pédagogique des notions de base sur les théories statistiques nécessaires à la compréhension du sujet à un traitement très détaillé de la turbulence à laquelle U. Frisch a consacré toute sa vie de recherche. Ainsi sont introduites les notions de probabilité et de statistique gaussienne. Celles-ci sont complétées par les notions d'autosimilarité et de multifractalité, nécessaires pour rendre compte du comportement très irrégulier et intermittent de la turbulence.

Mais la prise en compte des effets de géométrie, longtemps ignorée par les théoriciens de la turbulence, permet d'éclairer des notions telles que celles de bouffées turbulentes. Une ligne fine de tourbillons concentrant la vorticité et la dissipation qui fait que «la turbulence retourne au repos» rend compte, au niveau spatial, des anomalies temporelles des fluctuations de la vitesse turbulente. En ce sens aussi, le livre est remarquable par la qualité des illustrations et des photographies qui accompagnent le texte.

U. Frisch accompagne cette visite scientifique savante d'une partie historique qu'annonce le sous-titre : *The legacy of A.N. Kolmogorov*. Ce n'est cependant pas un livre d'histoire de la turbulence, et le rôle, dans cette histoire, d'Osborne Reynolds et de Joseph Bousinesq, à la fin du siècle dernier, la place formidable de l'œuvre de G.I. Taylor et de L.F. Richardson à partir des années 1910 n'est qu'indiquée. Il s'agit bien avant tout de faire un point du sujet, dans ses développements les plus actuels, qui nous fait penser que nous ne sommes plus si loin de pouvoir donner aux m  nes de Lamb quelque éclairage supplémentaire sur le sujet. On ne peut que recommander l'achat de ce livre dans toutes les bibliothèques de physique.

Etienne GUYON

RÉFÉRENCES DES ILLUSTRATIONS

Couverture : Marion Aguttes. P. 9 : James A. Brown, Richard A. Kerber et Howard D. Winters, *Trade and the evolution of exchange relations at the beginning of the Mississippian period*, in *The Mississippian Emergence*, sous la direction de Bruce D. Smith, Smithsonian Institution Press, 1990. P. 12 : Bulloz (Musée du Petit Palais). P. 13 (   gauche) : VLOO (Canstock Images). P. 13 (   droite) : document PLS. P. 14 : H. This. P. 16 : CNRS - Luc Passera. P. 17 (dessin) : Gallet-Tourreilles. P. 17 (photographie) : M. Signoli. P. 20 :    ArSci-Med. P. 21 : Florence Dor - Givaudan Roure. P. 22 : P.-J. Texier, CNRS. P. 23 : Don Snyder et Stephen Tait. P. 24 : PLS, d'après C. Prusiner. P. 25 : NHPA/Sunset. P. 26 : PLS/NASA. Pp. 27 et 28 : documents PLS. P. 29 : B. Saugier. P. 33 (en haut à gauche) : F. Dubois. P. 33 (en haut à droite) : document PLS. P. 33 (en bas) : M. Buess. P. 35 : G.B. Cadi  re. P. 36 : Ph. Mouret. P. 37 : d'après Christian Klaiber. P. 38 (en haut) : document PLS. P. 38 (en bas) : Pier/Götz. P. 41 : Norbert Quien, Rainer Wehrse et Christoph Kindl. P. 42 (en haut) : Holland Ford et Richard Harms. P. 42 (en bas) : Ulf Borgeest et Karl-Jochen Schramm, *Sterne und Weltraum*, janvier 1995. P. 43 (en haut) : *Contemporary Astronomy*, par Jay M. Pasachoff, W.B. Saunders, Philadelphia 1977/Spektrum der Wissenschaft. P. 43 (en bas) : Norbert Quien, Rainer Wehrse et Christoph Kindl/Spektrum der Wissenschaft. Pp. 44    47 : Norbert Quien, Rainer Wehrse et Christoph Kindl. P. 49 : Tomo Narashima. P. 50 (en haut et au milieu) : Lelio Orci. P. 50 (en bas) : avec

l'aimable autorisation du Buckminster Fuller Institute, Los Angeles. P. 51 : Lelio Orci. Pp. 52 et 53 : Tomo Narashima. Pp. 57 à 59 (en haut) : U.S. Air Force. P. 59 (en bas) : U.S. Navy. P. 61 (en haut et en bas à gauche) : National Reconnaissance Office. P. 61 (en bas à droite) : National Oceanic and Atmospheric Administration. P. 62 : U.S. Department of Defense. P. 63 : National Reconnaissance Office. Pp. 64    69 : Michael Goodman. P. 70 : Roberto Osti. P. 71 : Chip Clkark, Smithsonian Institution. P. 72 (en haut) : Jimmy Smith, *Islands from the Sky*. P. 72 (en bas à gauche) : Ilka C. Feller, Smithsonian Institution. P. 72 (en bas à droite) : Chip Clark, Smithsonian Institution. P. 73 (en haut) : Roberto Osti. P. 73 (en bas à gauche) : Molly Kelly Ryan, Smithsonian Institution. P. 73 (en bas à droite) : Sandy Canupp. P. 75 (   gauche) : Molly Kelly Ryan, Smithsonian Institution. P. 75 (   droite) : Klaus Rützler. P. 77 : George Mulala. Pp. 78 et 79 : Laurie Grace et Pete Samek. P. 80 : Jessie Nathans. P. 81 : Gideon Mendel, Network Matrix. P. 84 (photographie) : Jonas Rabinovitch, avec l'aimable autorisation de la ville de Curitiba. P. 84 (carte) : Karl Gude. Pp. 85 et 86 (en haut) : Jonas Rabinovitch. P. 86 (en bas) : Karl Gude. P. 87 : Jonas Rabinovitch. P. 90 : Steven Lehman, SABA. Pp. 91 et 94 : Dimitry Schidlovsky. Pp. 96 et 97 : Jacques Ninio. Pp. 101 à 104 : documents PLS. P. 106 : Maos/Gamma. Pp. 107 à 109 : documents PLS. P. 111 :    Paris, BNF. P. 112 : C.W. Leong et J.M. Ottino, University of Massachusetts at Amherst.

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 Merviel. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Fabienne Aubineau. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Ont également collaboré à ce numéro : Serge Allou, Éric Bouvier, Bettina Deb  , Christian Glattli, Éric Gourgoulhon, Évelyne Host-Platret, Marie-Thérèse Landousy, Philippe Machetel, Claude Olivier, Pierre Pfeiffer, Michel Rosenheim, Jacqueline Stern, Régine T  man.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press (Managing Editor), Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, 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 Gerc  ens. Executive Committee : John Moeling, Vincent Barger, Robert Biewen.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06. Tél. (1) 46 34 21 42. T  l  x : LIBELIN 202978F. Télécopieur : 43 25 18 29.

  tranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay

Autres pays :   ditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres   dit  s par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

   Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront en pages 18A, 18B, 98A et 98B des bulletins d'abonnement.