

LA DÉTECTION DES ÉTOILES • LE GOÛT • LA FIN DE L'EFFET PAPILLON



■ POUR LA

Pour la Science

SCIENCE

Mai 2001

édition française de

www.pourlascience.com

SCIENTIFIC
AMERICAN

Le relief des continents

Canada : \$ 8,95 / Belgique : 285FB / Suisse : 11,20FS

M 2687 - 283 - 39,00 F



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

4

SCIENCE ET ÉCONOMIE

Quand il vaut mieux ne pas savoir

5

par Ivar Ekeland

TRIBUNE DES LECTEURS

6

SCIENCE ET GASTRONOMIE

Tendreté de la viande

7

par Hervé This



POINT DE VUE

Musées et patrimoines scientifiques en danger

8

par André Langaney

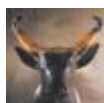


PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

L'intégrale de Lebesgue a cent ans

10

par Robert Ryan



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

14

Le bœuf à la mode asiatique ■ Les brousses tigrées ■ Bon pied, bon œil ■ Naufrage antique ■ Tam-tam

d'éléphant ■ Étoiles alcoolisées ■ Aphrodite en couleurs ■ Agent double protéique ■ Des piles à l'eau de mer ■ Les plus anciens dinosaures sauropodes ■ Un petit astre proche ■ Un agent de division ■ Énergie et douleur ■ Vieux de six millions d'années ■ La dyslexie universelle



ART ET SCIENCE

Le combat des hémisphères

94

par Yves Frégnac



LOGIQUE ET CALCUL

Jusqu'à où l'ordinateur calculera-t-il?

100

par Jean-Paul Delahaye



VISIONS MATHÉMATIQUES

Obstruction de polygones

106

par Ian Stewart



IDÉES DE PHYSIQUE

Un vide plus ou moins... vide

108

par Roland Lehoucq et Jean-Michel Courty

ANALYSES DE LIVRES

110

■ *La symbiose. Structures et fonctions. Rôle écologique et évolutif*, de Marc-André Selosse ■ *Chercheurs de météorites*, de Françoise et Michel Franco ■ *Les Nouveaux Frankenstein. Quand la science nous trahit*, de Harry Collins et Trevor Pinch ■ *La muséologie des sciences et ses publics : regards croisés sur la Grande Galerie de l'évolution du Muséum national d'histoire naturelle*, de Jacqueline Eidelman et Michel Van Praët ■ *Une histoire de la physique, sans les équations*, Jean-Pierre Maury ■ *Nature vive*, Muséum national d'histoire naturelle et Éditions Nathan

L'effet papillon n'existe plus!

28

par Raoul Robert

Jusqu'à présent, on admettait que les prévisions météorologiques étaient impossibles au-delà de deux semaines, à cause de l'«effet papillon». La mécanique statistique a démonté ce dogme.



Le sens du goût

36

par David Smith et Robert Margolskee

Les physiologistes découvrent comment les cellules sensorielles de la langue enregistrent les sensations gustatives et comment le cerveau interprète ces signaux.

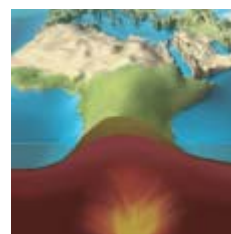


La sculpture des reliefs terrestres

44

par Michael Gurnis

Les mouvements de convection au cœur de la planète font dériver les plaques continentales. Ces phénomènes expliquent aussi le soulèvement de certaines régions de l'Afrique, par exemple.



Une histoire de lézards

52

par Jonathan Losos

Sur quelques îles des Grandes Antilles, l'évolution a répété la même histoire : différents types de lézards sont apparus plusieurs fois et se sont adaptés aux mêmes habitats.



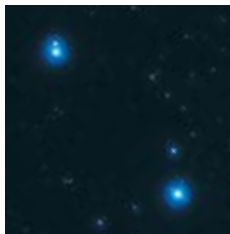
Chaque mois, retrouvez le sommaire complet de la revue **en ligne** avec pour chaque article une bibliographie et un complément d'information.

www.pourlascience.com

La détection des étoiles par interférométrie

par A. Hajian et T. Armstrong

Malgré les turbulences atmosphériques, les nouveaux interféromètres optiques au sol révèlent cent fois plus de détails que le télescope Hubble, qui est embarqué à bord d'un satellite.



58

L'Hôpital Laennec 400 ans d'histoire de la médecine

par Alain Dauphin
et Christine Mazin-Deslandes

La relecture de l'histoire de cet hôpital évitera peut-être que les exigences actuelles n'aient raison de la médecine d'excellence française.



68

Les diodes éclairent le futur

par G. Craford, N. Holonyak
et F. Kish

Les diodes électroluminescentes sont de plus en plus utilisées, et les diodes blanches remplaceront bientôt les ampoules à incandescence.

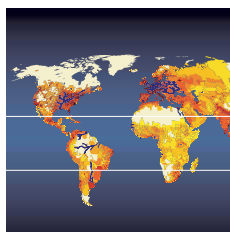


78

Richesses, pauvreté et contraintes géographiques

par J. Sach, A. Mellinger
et J. Gallup

De nouveaux programmes devraient aider les pays pauvres, situés en zone tropicale et dépourvus d'accès à la mer, à accéder à la richesse.



86

Un point de vue persan

De Tauris, le 18 de la Lune de Saphar

Il y a quelques jours un homme de ma connaissance me dit : « Venez entendre une défense de thèse à la Sorbonne. Les professeurs y sont les maîtres de la pensée, les pourfendeurs de l'ignorance, les colonnes tutélaires de la rigueur. » J'accourus.

En Perse, nous sommes incroyablement ignorants des mœurs post-modernes ! Aussi ne savais-je pas que la pratique universitaire de l'astrologie, autrefois interdite par Colbert, pouvait, dans la vieille Sorbonne, devenir licite quand elle était mâtinée de sociologie. J'en fus instruit.

Je pénétrai dans la salle Liard. Le goût pour les arts, personnifié au fond de la salle par un sévère portrait de Richelieu, était associé au talent, représenté par Corneille et Molière, de part et d'autre de la porte. Au centre, en symbiose, siégeait la candidate dont la réputation astrologique n'est plus à magnifier. En face d'elle trônait un jury dont la curiosité pour l'argumentation de la postulante avait été, on m'en assura, aiguisée par la lecture attentive des 900 pages de la somme. On m'avait, en Perse, enseigné que les fulgurances de la pensée s'exprimaient en termes concis, mais je fus détrompé : l'on travaillait à Paris dans le quantitatif et parmi l'abondance des citations d'une thèse, on m'assura qu'il devait s'en trouver de pertinentes. J'en convins très volontiers, quoique...

...quoique la cavalcade intellectuelle de la candidate m'essoufflait et j'avais quelques troubles à comprendre comment les incertitudes quantiques, au sens de David Bohm, éclairaient les perceptions sociales de l'astrologie. Ces lucidités m'étaient interdites, comme bien d'autres évocations d'un discours où une citation chassait l'autre, où toutes se couraient après. Et je m'émerveillai de la communion de pensée entre le jury et la candidate. Mais j'avais tort de m'étonner : l'examen circonstancié de centaines de références bibliographiques crée quelques connivences ambiguës.

Selon la tradition, lors du quolibet, quelques voix se firent entendre. Des fâcheux, m'expliqua-t-on, qui prétendaient que tout ce discours sur l'astrologie n'était que souffle d'Éole. Un irascible osa affirmer que le roi est nu quand, depuis 35 siècles, nul ne voit ses vêtements. On m'expliqua qu'il n'était point bon d'être tant impatient.

Et surtout je compris que, comme les décorations en Perse, certaines thèses d'État de la Sorbonne* ne témoignent plus du mérite scientifique : elles récompensent une réussite médiatique, donc sociale, donc sociologique.

**Le 9 avril 2001, Germaine Elisabeth Hanselmann, alias Élisabeth Teissier, a reçu le titre de Docteur en sociologie. Avec la mention très honorable.*



BLOC-NOTES

DIDIER NORDON

Égalité dans l'erreur

Les examens sont une période d'anxiété pour les candidats... et pour les auteurs de sujets. Des fautes d'impression aux erreurs de conception dans l'énoncé, les pépins abondent.

La différence entre les candidats et les auteurs, cependant, est que ces derniers ont bien tort de s'inquiéter. Quand on lui demande s'il y a eu des problèmes lors de son épreuve d'examen, un mathématicien de ma connaissance hausse les épaules et répond d'une formule aussi superbe que définitive : « Qu'est-ce que ça peut faire ? Les problèmes font partie du problème. »

C'est pourtant vrai ! Pour trier les candidats, un énoncé erroné n'est ni plus ni moins injuste qu'un correct. La seule obligation d'un examinateur, son devoir déontologique suprême, est de traiter les candidats avec une équité sans défaut. Qu'ils aient tous droit rigoureusement aux mêmes erreurs d'énoncé, et personne ne trouvera rien à redire. Car les problèmes font partie du problème.



L'économie est utile... à qui ?

« L'analyse économique enseigne que les politiques n'ont pas pour vocation d'appliquer les conseils des économistes. Comme un entrepreneur motivé par des intérêts personnels, les politiques font feu de tout bois (y compris d'une théorie économique). Ils ne cherchent pas à appliquer au mieux les connaissances dont on dispose pour atteindre le bien commun, mais à maximiser leur part de marché politique. » (Jacques Généreux, *Axiales*, n° 3, ASTS, 2000.)

Les économistes étant tout, sauf des naïfs, on s'étonne de les voir si nombreux et empressés à prodiguer leurs vains conseils aux princes



qui veulent bien les consulter. Selon J. Généreux, c'est encore à l'économie que revient d'expliquer ce comportement apparemment irréfléchi. Fréquenter les palais, dit-il, est plus gratifiant et plus rémunérateur qu'aller instruire les citoyens dans la cité.

Comme toutes les autres, l'économie est une science humaine, trop humaine...

L'idolâtrie de la possibilité

Les nouvelles technologies offrent des perspectives inouïes... Nous allons pouvoir tout faire. Au point que nous ne savons même pas jusqu'où cet extraordinaire tout va s'étendre...

Dès 1962, pourtant, donc bien avant que l'informatique et Internet ne fassent fantasmer à l'infini, un poète a vu ce qui nous arrive. Son acuité laissera parfois le plus subtil des sociologues. « En notre temps, il n'y a pas d'idoles au sens strict, car nous sommes si prompts à nous lasser de l'une pour en adopter une autre que le mot ne peut s'appliquer. Notre idolâtrie réelle, parce que permanente, est l'idolâtrie de la possibilité. »



(W. H. Auden, *Essais critiques*, traduction française Belin, 2000.)

L'idolâtrie de la possibilité : tout est dit. Même le tout dont nul ne sait encore ce qu'il sera.

Comme le dit Plodocus ?

Lorsqu'il trouvait l'atmosphère étouffante, Alphonse Allais proposait d'ouvrir une parenthèse. Prenons modèle sur lui, et allons prendre l'air dans la nature.

Promenons-nous en suivant une courbe du chien. N'ayons pas peur du serpent, animal utile, et n'écrasons pas le limaçon. Qu'il est beau, ce canard, dont l'aile étonnante rappelle la queue d'aronde ! Admironons la singularité de l'éléphant, suivons les étranges lignes du zèbre. Ne caressons pas le hérisson, bien sûr. Renonçons à ramasser le fer à cheval tombé par terre : il ne nous appartient pas. Et méfions-nous du papillon, dont l'effet est théâtral.

Alphonse Allais plaisantait... Eh bien, nous aussi. Le charme de la description ci-dessus provient non de sa grâce à évoquer la nature, mais du fait que les noms d'animaux qui y figurent sont tous empruntés... aux mathématiques. Inspirés par des simili-

CENTRE AÉRÉ DE GÉOMÉTRIE



tudes de formes ou de propriétés, les mathématiciens puisent dans la zoologie pour nommer certains de leurs objets. Oui, leur hérisson, abstrait, a quelque chose de commun avec celui de la nature.

Cessons maintenant de plaisanter. Considérons un astre sur lequel les mathématiciens sont apparus avant que les dinosaures n'aient disparu. Là, les mathématiques s'inspirent tout naturellement du stégosaure, du dimérodon ou du parasauropode. Au lieu d'écrire des articles sur les « hérissons projectifs », les « multihérissons » ou les « queues d'arondes » (je n'invente rien), les mathématiciens de cet astre en écrivent sur les « multistégosaures projectifs » ou les « queues de parasauropode ». La question n'est pas de savoir si ces termes-là sont jolis, mais si ces mathématiques-là étudient la même chose que les nôtres. Et la réponse est : non, puisque leurs objets ont des formes semblables aux formes d'autres animaux.

Donc les mathématiques ne sont pas universelles.



Quand il vaut mieux ne pas savoir

IVAR EKELAND

Au jeu de pile ou face modifié, tout comme dans le calcul de l'espérance de vie sur des bases génétiques, l'ignorance est un bienfait des dieux.

Comme le savent tous les lecteurs de romans policiers, en savoir trop peut coûter très cher. Ne pas savoir est quelquefois un luxe : quand la bienheureuse ignorance est perdue, on peut être contraint à des manœuvres compliquées pour pouvoir faire comme si on ne savait pas.

Commençons par un exemple simple, tiré, comme d'habitude, de la théorie des jeux. Un généreux mécène, aux poches profondes, tire à pile ou face devant Anne et Bernard ; il procède de la manière habituelle, c'est-à-dire qu'il lance la pièce en l'air, la rattrape au vol et la plaque sur le dos de sa main gauche. La pièce est alors cachée par sa main droite, et il demande à Anne, puis à Bernard (qui a entendu la réponse d'Anne), de deviner le résultat. S'ils tombent juste tous deux, ils reçoivent dix francs chacun ; si un seul a le bon résultat, le mécène lui donne mille francs, l'autre ne recevant rien ; si tous les deux parient mal, ils n'ont rien.

Point n'est besoin d'être grand clerc pour déterminer ce que feront les joueurs : peu importe ce que dit Anne, Bernard pariera sur le contraire. À chaque tour, l'un ou l'autre gagnera mille francs et, de cette manière, chacun gagnera en moyenne cinq cent francs par partie.

Mais ne voilà-t-il pas que notre mécène révèle sa perversité : il soulève légèrement la main, et montre la pièce à Anne sous le regard jaloux de Bernard. Désormais Anne sait et Bernard sait qu'Anne sait. C'est une catastrophe pour l'un comme pour l'autre ! Anne jouera le bon résultat, sinon elle ne gagne rien, et la seule possibilité pour Bernard de gagner quelque chose est de la suivre. Les voilà coincés, du simple fait qu'une information supplémentaire est donnée à l'un d'entre eux : ils passent d'un gain moyen de cinq cents francs par partie à un gain certain de dix francs : la perte est considérable pour les deux.

Ils ne peuvent pas s'en sortir dans le cadre de ce jeu. En

revanche, ils peuvent élaborer, à côté de ce jeu, des mécanismes ou des contrats qui rétablissent la situation antérieure. Le plus simple, bien sûr, est que les joueurs s'entendent pour partager les gains : Anne parie sur le bon résultat, Bernard parie sur le mauvais, et ils partagent les mille francs que touche Anne. On peut aussi concevoir que Anne fasse en sorte d'ignorer l'information qu'elle a ; mais cela ne suffit pas quoiqu'elle le dise, il faut aussi qu'elle soit crédible. Elle peut par exemple annoncer qu'elle jouera toujours face, et le faire scrupuleusement ; elle peut aussi lancer sa propre pièce devant Bernard, et jouer ce qui tombe. Bref, les joueurs doivent inventer des mécanismes plus ou moins compliqués pour leur permettre d'ignorer l'information.

LA MALADIE CERTAINE

Ce n'est qu'un jeu, direz-vous. Voire. Nous retrouvons une situation analogue avec les progrès actuels des analyses génétiques. Imaginons une maladie grave, mais rare. Elle fait normalement partie des hasards de la vie, et le risque correspondant est fondu dans la masse de tous ceux contre lesquels nous nous couvrons en contractant une assurance décès.

Supposons maintenant que l'on découvre une origine génétique à la maladie, et que de surplus on dispose d'un test efficace et bon marché : tout change. Le risque n'est plus assurable, car l'assureur demandera que tout client passe le test ; s'il ne le fait pas, ses concurrents le feront, et il se retrouvera avec tous les mauvais risques que les autres ont refusé d'assurer. Si l'on veut retrouver la situation antérieure, où la bienheureuse ignorance permettait de couvrir le risque, il faut se lancer dans des constructions compliquées, qui font l'essentiel du débat actuel sur l'utilisation des données génétiques individuelles.

Une première idée consiste à interdire aux assureurs de réclamer le test. Qu'à cela ne tienne : de petits malins le passeront de leur propre chef, et se présenteront chez l'assureur en demandant un rabais de prime au motif qu'ils ne courent pas ce risque-là. De fil en aiguille, le pli sera pris, et ceux qui ne présenteront pas le résultat du test se désigneront eux-mêmes comme porteurs du gène.

Aussi faudrait-il donc interdire aux compagnies, non seulement de demander le test, mais d'en tenir compte, même si le client l'a passé volontairement. Les effets de la confrontation entre des assureurs réglementairement aveugles et des clients qui peuvent s'informer totalement peuvent être catastrophiques. Je passe le test, et je découvre par malheur qu'il est positif ; me voici avec la quasi-certitude de tomber malade et d'en mourir. Quoi de mieux à faire que de courir m'assurer ? Je puis même monnayer cette assurance, en ouvrant des enchères et en la souscrivant au nom du plus offrant, tout en présentant le test génétique à l'appui de mes dires. Du point de vue de l'acquéreur, c'est beaucoup plus sûr qu'un viager traditionnel.

Il y a là de quoi déstabiliser tout le système de l'assurance décès. Si l'on persiste dans l'idée de ne pas exclure ce type de maladie des risques assurables, on ne peut donc pas s'arrêter là. Limiter le montant de l'assurance décès est une mesure courante, qui n'évite pas ce type de problèmes, mais qui permet que leur poids ne soit pas trop lourd pour la collectivité. Mais cela ne suffit pas : il faut aussi empêcher qu'une personne puisse souscrire plusieurs contrats auprès de plusieurs compagnies différentes ; on obligera donc les gens à choisir un seul assureur. En définitive, la situation est assez compliquée, avec diverses interdictions et des contrats exclusifs, tout cela parce qu'une certaine information est désormais disponible, et qu'on souhaiterait faire comme si elle ne l'était pas.

TRIBUNE DES LECTEURS

Immunologie et grossesse

L'article de Gérard Chaouat, *Le fœtus : une symbiose plus qu'une greffe*, paru dans le Dossier Les défenses de l'organisme (*Pour la Science*, octobre 2000), tente d'expliquer pourquoi le fœtus n'est pas rejeté par la mère bien qu'il provienne «pour moitié» du père, et que la moitié de ses «marqueurs du soi» responsables du rejet d'un corps soient donc étrangers à la mère. Chez l'homme, les principaux marqueurs du soi sont des molécules de type HLA.

Dans cet article, le rôle de la molécule HLA-G au cours de la grossesse nous semble avoir été sous-estimé. Nous considérons, au contraire, qu'il s'agit d'une molécule clé dans la symbiose mère-fœtus.

Le premier argument avancé par l'auteur selon lequel «Certaines femmes n'expriment pas HLA-G, mais ont des grossesses normales», s'appuie sur deux études récentes décrivant des femmes qui ne produisent pas la forme membranaire HLA-G1. On ne peut pour autant affirmer que la production de HLA-G est stoppée, car un mécanisme de correction des mutations (l'épissage alternatif) permet la production normale de certaines formes de la molécule.

Au regard des données récentes, on ne peut pas plus accepter l'argument qui stipule «le trophoblaste humain exprime HLA-C». Effectivement, à l'expression placentaire de HLA-G s'ajoutent non seulement une faible expression des molécules HLA-C, mais aussi l'expression de HLA-E, une autre molécule HLA. Plusieurs études fonctionnelles utilisant des trophoblastes (des cellules placentaires) ou des lignées cellulaires exprimant naturellement ou artificiellement la molécule HLA-G montrent que cette dernière est capable d'inhiber directement *in vitro* plusieurs réactions immunitaires essentielles, telle la destruction de cellules étrangères par les cellules tueuses naturelles. Ainsi, l'expression par les trophoblastes de la molécule HLA-C n'exclut en rien la capacité d'inhibition de HLA-G clairement démontrée *in vitro* et qui masque par son amplitude l'effet des autres molécules HLA.

Enfin, la molécule HLA-G s'exprime très tôt au cours du développement embryonnaire, même dans un contexte de grossesse extra-utérine. Au contraire, on observe un déficit en expression placentaire de la molécule HLA-G lors de la prééclampsie. Cet état pathologique de la femme apparaît après la vingtième semaine de grossesse et présente des caractéristiques correspondant à un rejet. En outre, certaines cellules cancéreuses (mélanome, cancer du sein) expriment la molécule HLA-G qui pourrait être un rempart supplémentaire pour échapper au système immunitaire de l'hôte.

N'oublions pas non plus l'une de nos récentes études réalisée sur des transplantés cardiaques qui révèle que l'expression de la molécule HLA-G à la surface de certains transplants est associée à une nette diminution des épisodes de rejet aigus et chroniques. Nous pensons que tous ces arguments plaident en faveur d'un rôle d'immunosuppression de la molécule HLA-G, qui apparaît comme un acteur incontournable dans les mécanismes régulant la tolérance immunitaire : facteur de tolérance immunologique, elle éviterait le rejet du fœtus et favoriserait la symbiose mère-fœtus.

Philippe MOREAU, Nathalie ROUASS-FREISS
et Edgardo D. CAROSELLA
Institut d'hématologie – Hôpital Saint-Louis
à Paris

Réponse de Gérard Chaouat

S'il est exact que, chez certaines femmes, HLA-G2 pourrait remplacer HLA-G1 absent, l'inhibition de lyse, par HLA-G1 ou HLA-G2, ou par HLA-G membranaire, n'est souvent que partielle. De plus, les trophoblastes de souris, de rat ou de porc, qui n'expriment pas HLA-G, résistent «intrinsèquement» à la lyse par les cellules tueuses naturelles ou par les lymphocytes T cytotoxiques.

La résistance HLA-G indépendante se voit aussi sur des choriocarcinomes n'exprimant pas HLA-G et donc proches du syncytiotrophoblaste. En effet, le syncytiotrophoblaste humain qui n'exprime pas HLA-G résiste à la lyse par les cellules tueuses naturelles, et chez certains singes, le trophoblaste invasif n'exprime pas HLA-G, mais est, lui aussi, résistant à la lyse par les cellules tueuses naturelles qui n'expriment pas HLA-G. Par ailleurs, il n'existe pas toujours un déficit HLA-G chez les femmes prééclampsiques. L'étiologie de cette affection est certes partiellement immunitaire, mais n'est pas celle d'un rejet immun (c'est une affection du remodelage des artères utérines, voir *Grossesse et hypertension*, par Françoise Ferré et Bruno Carbone, *Pour la Science*, mars 2001). Quant aux données sur les mélanomes et sur le cancer du sein, elles restent controversées.

Certains spécialistes de HLA-G vont même plus loin que moi puisqu'ils soutiennent que HLA-G n'intervient pas dans la tolérance de la femme vis-à-vis du fœtus qu'elle porte. Je maintiens que la place de HLA-G devait être relativisée, sans toutefois nier son rôle important chez les primates. Dans sa grande sagesse, Montaigne disait que tout ce qui est excessif risque de paraître insignifiant.

Gérard CHAOUAT, Unité Cytokines
et relations materno-fœtales,
Hôpital Antoine Béclière à Clamart

La maîtrise du risque : OGM et nucléaire

J'ai lu avec beaucoup d'intérêt l'article *La recherche publique sur les OGM* (*Pour la Science*, mars 2001) de Daniel Nahon. J'ai passé toute ma carrière dans le développement de réacteurs nucléaires, et je ne peux m'empêcher d'établir un parallèle entre la contestation des OGM et celle de l'énergie nucléaire. Les risques dans les deux disciplines présentent certes de profondes différences, mais aussi quelques analogies intéressantes. Le risque de l'énergie nucléaire est la dispersion dans l'environnement de produits radioactifs dangereux pour la santé humaine et pour le biotope. Pour le génie génétique au stade du laboratoire, le risque est semblable, c'est un risque de dispersion, avec de surcroît, un facteur aggravant. Le risque, au lieu de se réduire spontanément avec le temps (par décroissance radioactive) peut s'amplifier par reproduction. Au stade de l'application à grande échelle, le risque génétique ne peut plus être confiné : comment avoir l'assurance qu'il n'y aura pas d'effet dommageable – concurrence des espèces ou variété biologique, etc. – sur l'ensemble du biotope?

Lors d'une conférence sur la maîtrise du risque, j'ai été fort surpris d'apprendre qu'il n'existe en génie génétique aucune Autorité ayant pouvoir réglementaire et d'inspection, l'équivalent de la direction de la Sécurité nucléaire, mais seulement des commissions de pairs donnant des avis sur les expériences menées. Il serait bon et urgent de mettre en place une Autorité en génie génétique au niveau national, mais aussi international. Son but serait d'édicter des règles pour les expérimentations biologiques, d'analyser les protocoles expérimentaux et d'inspecter les laboratoires pour vérifier le respect des protocoles autorisés. Si une telle Autorité acquerrait la confiance du public, la recherche en génie génétique pourrait se poursuivre dans la sérénité, comme c'est le cas aujourd'hui dans le transport aérien : personne n'a jamais demandé les calculs des ailes des avions pour vérifier qu'elles ont été correctement dessinées et que les avions ne risquent pas de nous tomber sur la tête. Le public fait confiance à l'Autorité qui délivre les licences de vol!

Henri MICHOUX, Saint-Romain au Mont d'Or

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pouirlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pouirlascience.com.



Tendreté de la viande

HERVE THIS

Mastiquons... pour connaître la jutosité et la tendreté de la viande.

Il y a moins de dix ans, la tendreté de la viande semblait être sa plus grande qualité : le gourmand, on le sait, déteste la viande dure. Oui, mais... qu'est-ce qu'une viande dure? Et, *a contrario*, une viande tendre? On avait oublié que la viande n'est pas du beurre et que sa texture est une de ses qualités. On avait confondu sa dureté avec sa faible jutosité, avec un besoin de la mastiquer longtemps avant de l'avalier. Afin d'élucider les relations entre la structure des viandes et leur texture, des biologistes de la Faculté de Clermont-Ferrand et de l'INRA de Theix ont analysé en temps réel la mastication d'échantillons de bœuf diversement préparés.

Pendant longtemps, les études de la texture des aliments ont été entravées par une confusion : on assimilait la texture à la structure physique des aliments. Il s'agit plutôt de la réaction psychologique aux stimulus psychophysiques provoqués par la mastication. Les perceptions sensorielles modulent les actions motrices qui divisent l'aliment. Cycle masticatoire après cycle masticatoire, la structure de l'aliment est modifiée, tandis que sa texture se dévoile. Comment connaître cette texture des aliments?

Christèle Mathonière, Laurence Mioche, Eric Dransfield et Joseph Culioli ont étudié cette question dans le cas de la viande, en cherchant des correspondances entre les perceptions sensorielles de dégustateurs, les propriétés mécaniques (résistance en compression, résistance au cisaillement) de la viande et l'activité électrique des muscles de la mastication. La viande utilisée était du bœuf que l'on avait préparé de plusieurs façons : certains échantillons étaient rendus très durs (et la cuisson ne les attendrissait pas) par refroidissement immédiat après l'abattage, tandis que d'autres échantillons subissaient une longue maturation à la température de 2 °C. Puis les divers couples d'échantillons étaient cuits à 60 °C et à 80 °C. Un échantillon sur deux de chaque couple était analysé mécaniquement, tandis que l'autre était consommé par un dégustateur entraîné, qui jugeait l'élasticité, la

tendreté initiale, la tendreté générale et la durée en bouche, c'est-à-dire le temps de mastication nécessaire avant que la viande puisse être avalée. Pendant cette dégustation, les physiologistes analysaient la mastication en enregistrant l'activité électrique du muscle masséter et du muscle temporal.

Les mesures mécaniques ont d'abord corroboré ce qu'avaient établi les études effectuées depuis des années à Theix : le stockage immédiat au froid multiplie par trois ou quatre la résistance à la compression et au cisaillement. À l'inverse, un refroidissement lent suivi par une maturation prolongée diminue à la fois la résistance à la compression et au cisaillement. De surcroît, une température de cuisson supérieure augmente notablement la résistance à la compression, mais pas la résistance au cisaillement. Enfin les diverses viandes doivent surtout leurs différences aux protéines myofibrillaires (qui assurent la contraction) et au tissu conjonctif, formé de collagène, qui entoure les fibres musculaires. Face aux échantillons, les divers dégustateurs réagissent très différemment : pour les mêmes viandes, les activités masticatoriennes diffèrent selon les individus. La maturation et la température de cuisson ont des effets perceptibles sur la mastication, mais le type de viande consommée détermine peu l'activité électrique.

Enfin, les dégustateurs notaient leurs sensations. Tous savaient parfaitement repérer les viandes les plus dures : le type de muscle, le mode de stockage et la température de cuisson déterminent la perception sensorielle de la même façon qu'ils modifient la mastication. Toutefois les descriptions sensorielles ne correspondaient pas aux prévisions des expérimentateurs : par exemple, l'élasticité ne traduit pas la tendreté initiale ; la jutosité est associée par les dégustateurs à la tendreté initiale, mais pas à l'élasticité ; la jutosité est plus influencée par la température de cuisson que par le type de stockage ; la perte de jus n'est pas une perte de jutosité. Aujourd'hui, on ignore donc ce qu'est exactement la jutosité : la quantité d'eau dans la viande et dans la bouche? La

quantité de gras? La quantité de salive sécrétée au cours de la mastication?

Au total, les dégustateurs ont groupé les viandes en cinq classes. Les viandes les plus tendres sont celles qui sont mûries le plus longtemps. Les viandes les plus dures sont celles qui sont refroidies juste après l'abattage. L'allongement de la période de maturation n'a d'effet que sur les viandes cuites à 80 °C. Enfin, les viandes cuites à basse température sont plus tendres que celles qui sont cuites à température supérieure. La jutosité est surtout déterminée par la température de cuisson, et peu par le type de stockage ou de maturation, ou par le type de muscle. Les premières bouchées font la différence selon la température de cuisson.

Ainsi, les mesures mécaniques, les appréciations sensorielles et les mesures électromyographiques donnent les mêmes résultats, pour la tendreté. Ce ne sont pas quelques coups de dents qui donnent la meilleure information, mais une mastication prolongée. En revanche, la jutosité est mieux appréciée par les premiers coups de dents : ceux-ci détectent les caractéristiques générales de l'aliment, avant d'adapter la mastication.

Une telle étude donne aussi des indications méthodologiques. Elle révèle que l'évaluation sensorielle est la méthode la plus sensible pour détecter les différences selon les échantillons. L'enregistrement de la séquence masticatoire complète représente mieux les propriétés sensorielles de la viande que les mesures mécaniques, et le nombre de cycles masticatoires est une meilleure mesure de l'élasticité, de la tendreté et de la dureté en bouche que les mesures de compression ; en revanche, une mesure de compression est un meilleur marqueur de la jutosité. On sait que le dégustateur adapte sa mastication à l'aliment, mais à partir de quel stade de division les bouchées passent-elles? C'est la question étudiée aujourd'hui...

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le 24 mai 2001, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Musées et patrimoines scientifiques en danger

ANDRÉ LANGANEY

Les collections de quatre musées pourraient être démantelées. Ces institutions de savoir sont menacées d'asphyxie, voire de fermeture, à des fins ambiguës, voire mercantiles.

Une politique destinée à mettre en place le musée du quai Branly et le plan «Université du troisième millénaire» menace quatre musées nationaux, localisés à Paris, de fermeture ou de démantèlement. Les collections de ces musées – statutairement inaliénables – seraient dispersées ou déménagées dans des conditions n'assurant pas leur conservation, leur inventaire, leur accessibilité ou leur cohérence. Ces décisions hâtives et irresponsables compromettraient sans retour les missions de conservation, de recherche et d'enseignement de ces musées.

Le gouvernement veut fermer le Musée national des arts africains et océaniques (MNAO), dès que possible.

Au Muséum national d'histoire naturelle, le représentant du gouvernement, investi de pleins pouvoirs ni légaux ni contrôlés, veut faire promulguer, sans concertation, un projet de décret statutaire autoritaire qui conduirait au démantèlement de l'institution par la séparation de la gestion des collections, de la recherche, de l'enseignement et de la diffusion des connaissances.

Le Musée de l'homme serait dépouillé, comme le MNAO, de ses collections d'ethnologie pour habiller l'éventuel musée du quai Branly (prévu au plus tôt pour 2004) et n'est pas autorisé à programmer ses expositions pour l'année 2002, alors qu'une programmation deux ans à l'avance est indispensable ! Voilà qui laisse entendre qu'on veut le fermer sous peu.

Le Musée national des arts et traditions populaires, cousin, pour l'ethnologie française, du Musée de l'homme et modèle de tous les écomusées français, est menacé de désintégration par un projet de déménagement à Marseille dans le cadre d'un problématique Musée de l'Europe et de la Méditerranée, prévu pour 2008, musée dont le cadre et les ambitions sont imprécis et ambigus.

Quatre musées sont ainsi gravement menacés. A-t-on pris en considération leurs centaines de milliers de visiteurs annuels, leurs missions d'enseignement, de communication scientifique et de recherche dans des domaines très sensibles ? Existe-t-il des projets transparents pour la reconversion de leurs bâtiments et l'avenir de leur personnel ?

LE PROJET DU QUAI BRANLY EST AMBIGU

Le Musée de l'homme est la seule institution combinant la recherche, l'enseignement et la communication scientifique sur les thèmes des origines de l'homme, de la diversité biologique et culturelle des humains et de leur adaptation à l'environnement. Ces thèmes ne seraient pas évoqués, au quai Branly, dans un musée d'arts exotiques issu d'un caprice présidentiel, à vocation esthétisante, sinon commerciale. Avant construction, le quai Branly a acheté, pour plus de 120 millions de francs, des objets dont des pièces issues de trafic illicite, à des collectionneurs et marchands étrangers, amis d'un ami du président. Il les expose au Louvre, malgré l'opposition des autorités locales et les vives protestations du Conseil international des musées (ICOM). À ce sujet, des personnalités internationales n'ont pas hésité à dénoncer la France, le Président de la république et le gouvernement en termes peu flatteurs, mais argumentés.

Pourtant, les rénovations du Musée national des techniques, du Musée Guimet et de la Grande Galerie de l'Évolution du Muséum national d'histoire naturelle montrent que des investissements raisonnables dans les locaux et les institutions existantes conduisent à de magnifiques réalisations et à de grands succès de fréquentation. Lorsque des collections tricenaires, comme celles du Musée de l'homme ou du Muséum, ont

été constituées, c'est avec le souci de rassembler des ensembles cohérents de documentation pour les sciences de la nature et humaines. Éclater, délocaliser ou disperser ces collections, c'est détruire des projets menés dans une continuité historique qui les rend précieuses et uniques au monde.

LE GRAND HERBIER A TROIS SIÈCLES

Les collections de systématique du Muséum, comme le Grand herbier de France (créé sous Louis XIV!), riches d'un très grand nombre de «types» de références pour la description des espèces vivantes, sont consultées par des milliers de spécialistes de tous les pays dans le cadre de recherches sur l'écologie et les environnements naturels. L'expérience irremplaçable des chercheurs et techniciens les maintient «vivantes», documentées et accessibles à la recherche.

Pourquoi les collections d'ethnologie de tous ces musées devraient-elles être transférées n'importe où, n'importe comment, dans des dépôts provisoires, quatre à huit ans avant la construction des bâtiments censés les recevoir ? Serait-ce dans le seul but de fermer discrètement les établissements qui les ont constituées, restaurées, étudiées et valorisées au cours des décennies passées ? Peuvent-elles être partagées comme un butin entre des établissements à venir qui ne seraient pas soumis aux mêmes règles de conservation et valorisation des collections nationales et historiques ?

LES MARCHANDS DU TEMPLE SONT DANGEREUX

Un projet de loi dangereux vient d'être déposé par le gouvernement et doit être examiné par le parlement. Il créerait des «Musées de France» qui regrouperaient les musées nationaux de l'éducation et

de la culture, des musées régionaux et municipaux, mais aussi des musées privés. Il instaurerait un principe de libre circulation des objets entre ces établissements et permettrait de détruire la cohérence des collections constituées par chacun d'eux, selon son projet scientifique et/ou muséographique. Notre crainte est que, par des échanges judicieux, le quai Branly, entre autres, soit dessaisi au profit de partenaires privés, très présents – et en force – dans son Comité d'acquisitions.

Nous devons exiger le retrait du projet de loi dit des «Musées de France» qui vise à détruire les musées nationaux, à remettre à la Culture les musées de l'Éducation nationale et qui tend à instaurer une dispersion irrationnelle, ingérable et dangereuse de leurs collections.

Nous devons exiger le retrait du projet actuel de statut du *Muséum*, qui permettrait son démantèlement et, bien sûr, celui du *Musée de l'homme*.

Nous devons exiger que les collections nationales de sciences naturelles et humaines fassent l'objet d'actions déterminées, financées au niveau nécessaire, de restauration, de conservation et de valorisation, là où elles ont été constituées, dans la continuité historique du projet qui les a créées et sous la seule autorité des enseignants-chercheurs, des conservateurs et des techniciens spécialisés qualifiés pour ces opérations.

FÉDÉRER LES VOLONTÉS?

Le gouvernement du Front populaire a, dans un élan culturel et éducatif, créé des musées comme le *Palais de la Découverte* et le *Musée de l'homme*. Le gouvernement socialiste actuel va-t-il organiser leur démantèlement? Ne serait-ce pas le rôle des politiques que de fédérer les volontés des serviteurs de l'État en dépassant les incompréhensions primaires entre gestionnaires, chercheurs et syndicats, qui *in fine* travaillent dans un but commun? Combien des plus brillants chercheurs français n'ont-ils pas découvert leur vocation lors de la visite des musées?

Il serait insensé, voire criminel, de briser l'héritage, précieux pour la science, l'enseignement et la pensée, de Jussieu, Buffon, Lamarck, Cuvier, Geoffroy St-Hilaire, Daubenton, Becquerel, Claude Bernard, Roger Heim, Paul Rivet, Georges Henri Rivière, Griaule, Leiris, Leroi-Gourhan et Théodore Monod, pour ne citer que quelques noms...

André Langaney est professeur d'Anthropologie au Musée de l'homme et à l'Université de Genève.



Clio

l'art de voyager

Des conférenciers historiens ou spécialistes d'art vous feront partager leur passion.

Des voyages en petits groupes pour profiter des découvertes dans les meilleures conditions.

Plus de 200 circuits vers 80 pays, riches en trésors artistiques ou archéologiques.

27, rue du Hameau - 75015 Paris
Tél : 01 53 68 82 82 - Fax : 01 53 58 82 60
Lic. 075 95 0468 - Mél : information@clio.fr

Je souhaite recevoir gratuitement le catalogue général des circuits Clio.

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

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

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



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

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



L'intégrale de Lebesgue a cent ans

ROBERT RYAN

Par un changement de perspective et inspiré par la nouvelle mesure de Borel, Henri Lebesgue définit une nouvelle intégrale qui correspond à l'intuition des probabilistes.

Henri Lebesgue (1875-1941) expose son «intégrale» dans une courte note des *Comptes Rendus des Séances de l'Académie* du 29 avril 1901. La note fera date : en moins de trois pages, les aspects essentiels d'une nouvelle définition de l'intégrale sont exposés. Nous allons relire «cette note sur l'intégrale de Lebesgue» en examinant ses différences avec les définitions antérieures des intégrales de Cauchy et de Riemann.

Pour des raisons qui tiennent à l'enseignement des mathématiques, les lemmes préliminaires, le symbolisme des définitions de limites et les précautions épistolaires des spécialistes de la rigueur, l'intégrale de Lebesgue a été le cauchemar de l'étudiant et, dans une mesure moindre, la plaie de l'enseignant qui avait quelques difficultés à intéresser son auditoire à un exposé où la forêt des définitions cachait l'arbre de l'idée. Pourtant les notions de base, dégagées de la gangue, sont compréhensibles et presque «naturelles», comme on dit...

L'INSPIRATION DE BOREL

Lebesgue a su tirer parti de la nouvelle théorie de la mesure décrite par Émile Borel (1871-1956) trois ans auparavant et qu'il généralisera. Il n'existe pas un type de mathématicien standard : Borel et Lebesgue étaient des tempéraments opposés. Borel vivait dans le siècle, aimant les honneurs et les engagements politiques : il sera député et, brièvement, ministre de la Marine dans le cabinet de Paul Painlevé. Lebesgue, mathématicien créatif, donc révolutionnaire, n'avait pas la vie privée correspondant à son statut de mathématicien hors ligne et ne fréquentait pas, comme Borel, les salons d'Anna de Noailles et des intellectuels de l'époque. Lebesgue, plus renfermé, se souciait peu de sa notoriété en dehors du domaine mathématique. Des échanges de lettres pendant la Première

guerre mondiale réveillèrent des querelles de paternité scientifique entre Borel et Lebesgue sur la définition des ensembles de mesure nulle...

DE LA LONGUEUR À LA MESURE

Comme il est de règle en mathématiques, l'idée de mesure correspond à une généralisation de l'idée de longueur, ou, à plusieurs dimensions, à celles d'aire, de volume, etc. Cette généralisation correspond à une question souvent posée par les enfants, quand on leur définit ce qu'est une aire ou une longueur, et qu'ils s'interrogent : comment déduire une valeur d'un ensemble de points que l'on ne peut compter, comment des ensembles de points peuvent-ils «mesurer» quelque chose ?

À un ensemble de points sur une droite, les mathématiciens associent une mesure qui a les propriétés d'une longueur : la mesure d'une réunion dénombrable d'ensembles disjoints est la somme de la mesure de ces ensembles.

Un ensemble de points est, selon Borel, de mesure nulle si l'on peut enfermer tous les points de l'ensemble dans des intervalles (en nombre fini ou infini) dont la somme est inférieure à tout petit nombre donné par avance. La mesure de l'ensemble vide est nulle, comme on doit s'y attendre. Toutefois la réciproque n'est pas vraie : un grand nombre d'ensembles ont pour mesure 0 et ne sont pas vides. Ainsi l'ensemble constitué par un point est de mesure 0, car on peut le recouvrir par un segment de longueur arbitrairement petite.

Dès que l'on a envisagé, après Cantor, les deux types d'infinis des points sur un segment de droite, les points d'abscisse rationnelle (infini dénombrable, c'est-à-dire que l'on peut numérotter) et les points d'abscisse non rationnelle (infini non dénombrable), la question pertinente était de s'interroger sur la «mesure» de ces différents ensembles.

Quelle est la mesure de l'ensemble de points d'abscisse rationnelle ? Comme l'ensemble des nombres rationnels n'est pas composé d'un ensemble fini d'intervalles, sa «longueur» n'est pas définie *stricto sensu*, mais sa mesure l'est.

Comme les nombres rationnels sont dénombrables, chaque nombre rationnel peut être recouvert par un des intervalles de longueur $1/8$, $1/16$, $1/32$... etc., la longueur totale de ces intervalles étant égale à $1/4$ (somme d'une série géométrique de raison 2). Donc tous les rationnels sont inclus dans une somme infinie d'intervalles de longueur $1/4$. Mais les nombres rationnels sur $[0;1]$ pourraient aussi être recouverts par une série d'intervalles de longueur $1/16$, $1/32$, $1/64$... etc., et donc par un segment de longueur $1/8$. En utilisant des séries d'intervalles de longueur de plus en plus petite, la longueur des segments recouvrant l'ensemble des rationnels est aussi petite que l'on veut. Donc l'ensemble des rationnels est de mesure nulle. Bien entendu,



quand il s'agit de traiter de l'infini, il faut prendre des précautions mathématiques, ce qu'a fait Borel.

La mesure de Borel est une extension à des ensembles plus généraux que des segments : elle « mesure » ces ensembles et garde le principe d'additivité mentionné précédemment, c'est-à-dire que la mesure d'une réunion dénombrable d'ensembles disjoints est la somme des mesures de ces ensembles. Cette idée de Borel aidera Lebesgue à définir son intégrale : dans une intégrale, il est deux quantités qui jouent un rôle prépondérant, la mesure de l'intervalle de variation de la fonction et les valeurs de la fonction sur cet « intervalle ».

Lejeune Dirichlet

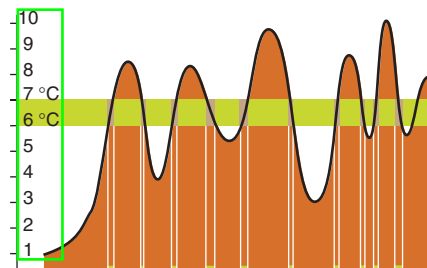


géométrie de l'infini, que les nombres irrationnels « se trouvent en une quantité sans comparaison plus grande que les nombres rationnels ». L'intuition probabiliste nous incite à penser que si l'on prend au hasard un point sur le segment $[0,1]$, sa valeur sera irrationnelle et que la valeur de la fonction considérée sera 0 « en moyenne ».

LES INTÉGRALES DE CAUCHY ET DE RIEMANN

L'intégrale de Riemann (1826-1866) est une généralisation de l'intégrale de Cauchy (1789-1857) publiée en 1823 dans le *Résumé des leçons données à l'École polytechnique sur le calcul infinitésimal*. Le problème initial est de calculer l'aire située sous une courbe définie par une fonction $f(x)$. Cauchy remplace l'aire située sous la courbe de $f(x)$ par la somme des aires de rectangles jointifs. La base de chacun de ces rectangles (un intervalle) est une portion du segment $[a,b]$ et la hauteur est égale à la valeur de la fonction au « début » du segment. Cauchy montre (1) que la valeur de l'aire des rectangles additionnés est égale à celle sous la courbe continue quand la longueur de la plus grande base des rectangles tend vers zéro, et (2) que cette valeur limite ne dépend pas du découpage en rectangles.

Cauchy « montre » plus qu'il ne démontre, car il suppose implicitement que la fonction est uniformément continue. Cauchy ne sait pas intégrer des fonctions qui sont discontinues en un nombre infini de points, c'est-à-dire qui bondissent en



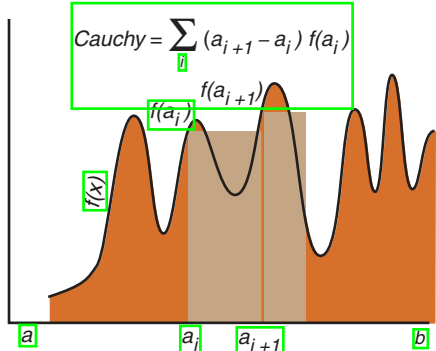
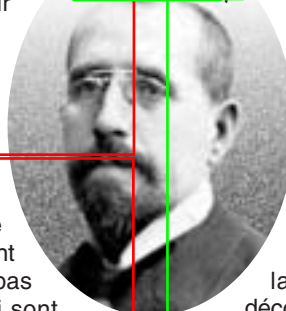
TEMPS PENDANT LEQUEL LA TEMPÉRATURE EST COMPRISE ENTRE 6 °C ET 7 °C

La température à midi durant le mois de février 1998 a varié entre 1 et 10 °C. Cherchons les intervalles de temps où la température est comprise entre 6 et 7 °C. Pour ce faire, nous coupons la courbe des températures par deux parallèles de valeurs 6 et 7 °C et reporterons les valeurs du temps correspondant à cet intervalle de température. La somme des durées pour lesquelles la température est comprise entre ces limites est égale à λ_6 . Puis nous continuerons pour d'autres découpages, de 6 à 7 °C, de 7 à 8 °C et ainsi de suite... La moyenne de la température avec ce découpage sera $1\lambda_1 + \dots + 6\lambda_6 + 7\lambda_7 + \dots + 9\lambda_9$, divisée par la somme des λ_r . Nous pouvons prendre des intervalles de températures de plus en plus petits et finalement, par un passage à la limite, nous retrouvons la définition de l'intégrale de Lebesgue.

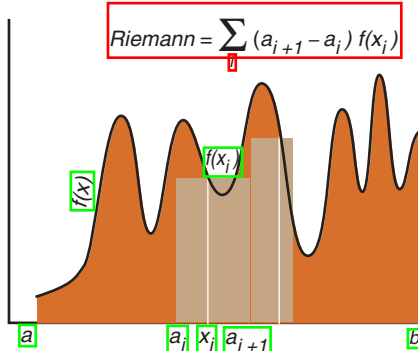
chaque point d'une valeur u à une valeur v .

La définition de l'intégrale par Riemann est une variation subtile de l'intégrale de Cauchy. Riemann prend pour hauteur du rectangle défini sur un intervalle, non plus la valeur du début de l'intervalle, mais une valeur de la fonction quelconque à l'intérieur de chaque intervalle. Quand on fait tendre la valeur maximale des intervalles vers zéro, et que la limite de la somme ne dépend ni du découpage en intervalles ni de la valeur des hauteurs, l'intégrale de Riemann existe. Il est patent que la valeur

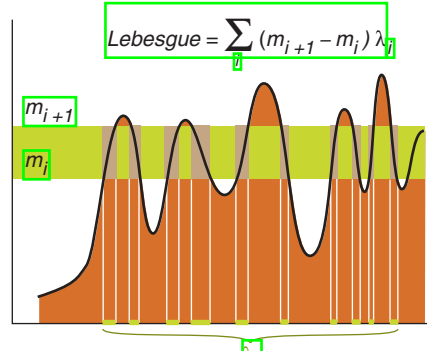
Gaston Darboux



Dans l'intégrale de Cauchy, on prend une succession d'abscisses a_i prises entre les deux points du domaine de définition de la variable, et, à chaque valeur de a_i , on associe la valeur de la fonction $f(a_i)$. La valeur de l'intégrale entre a et b est égale à la somme $\sum (a_{i+1} - a_i) f(a_i)$ quand les longueurs des intervalles $a_{i+1} - a_i$ tendent vers zéro. Dans l'intégrale de Riemann $\sum (a_{i+1} - a_i) f(x_i)$, on prend pour valeur de la



fonction une valeur x_i comprise entre a_i et a_{i+1} . L'intégrale de Lebesgue consiste à découper la fonction en tranches horizontales entre deux valeurs m_i et m_{i+1} , à multiplier la différence par la mesure λ_i de l'intervalle sur l'axe des abscisses correspondant à ces deux valeurs et à sommer toutes les valeurs quand l'intervalle $m_{i+1} - m_i$ tend vers zéro, soit $\sum (m_{i+1} - m_i) \lambda_i$.



des deux intégrales sont égales pour des fonctions continues, mais, avec la définition de Riemann, les mathématiciens savent intégrer des fonctions plus générales incluant par exemple des fonctions qui ont un nombre infini de discontinuités.

Avec l'intégrale de Riemann, on ne sait pas intégrer la fonction de Dirichlet, car sur chaque petit intervalle la fonction f oscille entre 0 et 1 : quel que soit l'intervalle, et aussi petit soit-il, il y a une infinité de valeurs rationnelles de l'abscisse pour lesquelles la valeur de la fonction de Dirichlet vaut 1 et une infinité de valeurs irrationnelles pour lesquelles la valeur de la fonction vaut 0. L'intégrale de Riemann dite «supérieure», selon les définitions de Darboux, est égale à 1 si l'on choisit des valeurs de l'abscisse x_i parmi les rationnels et l'intégrale «inférieure» est égale à 0 si l'on choisit les valeurs de x_i parmi les irrationnels. Or tout segment, aussi petit soit-il, contient une infinité de rationnels et une infinité plus grande encore d'irrationnels : la valeur de l'intégrale de Riemann de la fonction de Dirichlet n'est pas définie.

L'INTÉGRALE DE LEBESGUE

Lebesgue a un point de vue différent : au lieu de découper le segment $[a, b]$ en parties, il découpe en tranches l'intervalle des valeurs de la fonction $f(x)$ et réunit dans un même lot les «intervalles» pour lesquels la fonction est comprise entre deux valeurs. Puis Lebesgue définit deux sommes et quand ces deux sommes ont la même limite (alors que la valeur du plus grand des intervalles de valeur de la fonction tend vers zéro), la fonction f est «intégrable».

Dans sa note, Lebesgue donne un exemple particulièrement simple d'une fonction continue sur l'intervalle $[0, 1]$ et croissante, pour laquelle les deux définitions des intervalles à la Riemann et à la Lebesgue coïncident. Bien évidemment, Lebesgue voulait élargir les ensembles de fonctions qu'il pouvait intégrer par son découpage. L'exemple le plus simple est une fonction de Dirichlet.

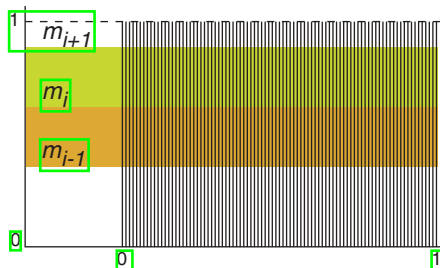


Illustration du calcul de l'intégrale de Lebesgue d'une fonction de Dirichlet qui a pour valeur 1 sur l'ensemble des rationnels du segment $[0, 1]$ et 0 sur les irrationnels du même segment.

L'intégrale de Lebesgue de la fonction de Dirichlet considérée revient à additionner deux valeurs sur des ensembles différents, l'une égale à 1 pour les nombres rationnels sur un ensemble de mesure nulle (donc cette contribution des rationnels est égale à zéro), et l'autre égale à 0 sur l'ensemble des irrationnels dont la mesure est égale à 1, mais cela n'a guère d'importance, car cette contribution est évidemment nulle, la fonction étant nulle en tous ces points. En conclusion, l'intégrale de Lebesgue de la fonction de Dirichlet est nulle. Comme il y a infiniment plus de points d'abscisse irrationnelle (une infinité non dénombrable) sur le segment $[0, 1]$ que de points d'abscisse rationnelle, la valeur nulle de l'intégrale de Lebesgue correspond à ce que les physiciens et les probabilistes entendent par «moyenne».

LEBESGUE ET YOUNG

L'idée de Lebesgue de découper «en tranches» la fonction avait été émise presque simultanément par William Henry Young (1863-1942). Toutefois, comme l'indique Hardy, le développement de la théorie de l'intégration à la Lebesgue est l'œuvre de Lebesgue et nul ne penserait à diminuer sa gloire. Young reconnaîtra l'antériorité et la suprématie des travaux de Lebesgue, et l'expression l'intégrale de Lebesgue est sa dénomination : on ne saurait être plus galant.

Henri Lebesgue est né à Beauvais en 1875. Son père, employé dans une imprimerie était un bibliophile et avait accumulé un bon nombre de livres dont le jeune Henri fit son miel. Henri se retrouva orphelin alors qu'il était encore au lycée et il ne put étudier qu'à la faveur de bourses successives jusqu'à son entrée à l'École normale supérieure à l'âge de 19 ans. Il fut maître de conférences à Rennes jusqu'en 1906, chargé de cours puis professeur à l'Université de Poitiers et enfin professeur au Collège de France.

L'esprit critique de Henri Lebesgue se manifesta alors qu'il était étudiant, à propos des surfaces développables, comme le cylindre ou le cône, qui peuvent être aplaniés ou «développés» sur un plan.

Dans la géométrie différentielle de l'époque, une surface développable devait avoir des régularités contraignantes, par exemple un plan tangent continu. Lebesgue démontra que ces conditions n'étaient pas nécessaires et pour convaincre ses condisciples de l'École normale, il froissait une feuille de papier de façon à obtenir une surface très irrégulière



René Baire

qui pouvait évidemment être développée sur un plan en enlevant tous les plis puisque la surface initiale de la feuille était plane. La preuve de Lebesgue, formalisée en 1899 dans *Sur quelques surfaces non réglées applicables sur le plan*, avait scandalisé Darboux. Les «mandarins» allaient être également interloqués par sa définition de l'intégrale...

inition de l'intégrale...

LA CLASSIFICATION DES FONCTIONS

Donc Lebesgue savait intégrer des fonctions «sauvages» à la Dirichlet et la question de la définition d'une «fonction» se reposait avec régularité. Lebesgue s'intéressa à la classification des fonctions donnée par René Baire en 1898. Dans la première catégorie de fonctions, selon Baire, étaient les fonctions continues, la classe C_0 . La limite de fonctions continues peut être discontinue, comme ne l'avait pas vu Cauchy. Les fonctions limites, pour chaque valeur de l'abscisse de fonctions continues, étaient classées par Baire dans la classe C_1 . Les fonctions limites des fonctions C_1 faisaient partie de la classe C_2 . Et ainsi de suite... Lebesgue montra l'existence de fonctions appartenant à chaque classe définie par Baire, et montra aussi qu'il existait des fonctions n'appartenant à aucune de ces classes : selon Lebesgue, la classification de Baire n'incluait pas toutes les fonctions de la variable réelle.

La généralité de la classification de Baire fut l'objet d'un conflit avec Lebesgue, qui n'était décidément pas d'un caractère très amène. Quant à Baire, sa neurasthénie en faisait une victime facile. Il se plaignait du fait que ses «idées ne prennent de l'importance que quand Lebesgue... y met le doigt».

PRIMITIVES ET DÉRIVÉES

Au début de sa *Note* Lebesgue traite de la généralisation de l'intégrale de Riemann dans une toute autre direction.

Dans le cas de fonctions continues, il y a identité entre les notions d'intégrale et de fonction primitive. Riemann a défini l'intégrale de certaines fonctions discontinues, mais toutes les fonctions dérivées ne sont pas intégrables, au sens de Riemann. Le problème de la recherche de fonctions «primitives» n'est donc pas résolu par l'intégration et l'on peut désirer une définition de l'intégrale comprenant comme cas particulier celle de Riemann et permettant de résoudre le problème des fonctions primitives.

La primitive d'une fonction f est une fonction P telle que sa dérivée P' est égale à f . Lebesgue affirme qu'une fonction f peut avoir une dérivée f' qui n'est pas intégrable au sens de Riemann. Un exemple en est donné par le mathématicien italien Vito Volterra qui utilise un ensemble de Cantor.

En définitive, il y avait ainsi deux grandes idées dans la Note de Lebesgue.

La première était la partition de la fonction – et non de la variable – pour calculer la valeur de l'intégrale de la fonction dans un intervalle. Dès que l'on pense à cette partition de la fonction, la considération d'une mesure des «intervalles» des abscisses correspondant à ce découpage en découle naturellement.

La seconde est la définition de la mesure d'un ensemble et l'introduction des ensembles mesurables. Il existe néanmoins, montre Lebesgue, des ensembles non mesurables... mais la marge de ce texte est trop petite pour que nous puissions en détailler un exemple. Lebesgue a étendu la notion d'ensemble mesurable bien au-delà de ce que considérerait Borel, par exemple il considère que toute partie d'un ensemble de mesure nulle est de mesure nulle (ce qu'il fallait prouver, car il existe des ensembles pathologiques de mesure 0).

Pourquoi Lebesgue n'enseigna jamais sa théorie de l'intégrale? Peut-être par modestie, peut-être parce que les exemples physiques (par exemple) comme le mouvement brownien où elle est indispensable n'existaient pas encore. Un roman c'est un théorème, disait Gide, et si les théorèmes étaient des romans? La définition de l'intégrale est une longue histoire qui connaîtra d'autres rebondissements avec les travaux de Radon, Daniell, Carathéodory, et surtout des probabilistes, au premier rang desquels Wiener et Kolmogorov.

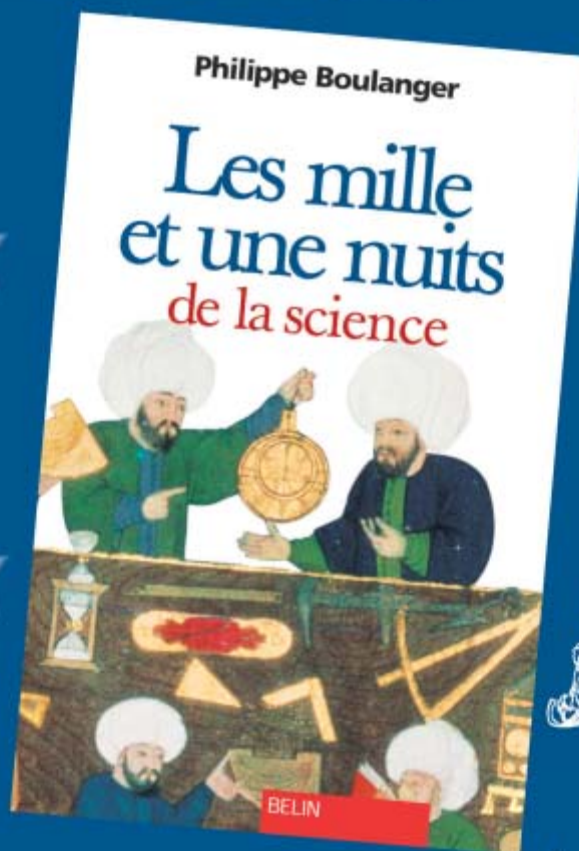
Nous remercions Jean-Pierre Kahane de l'aide précieuse apportée à la rédaction de cet article.

Tous les documents concernant la genèse de l'intégrale de Lebesgue sont contenus dans les cinq volumes des œuvres scientifiques de Lebesgue publiés par la revue de Genève *L'enseignement mathématique*, complétés par les *Lettres de Lebesgue à Borel* datées de mai 1901 à décembre 1914, publiées par Pierre Dugac et Bernard Bru dans les *Cahiers du séminaire d'histoire des mathématiques*.

La thèse de Pierre Dugac est un ensemble parfait traitant des *Fondements de l'analyse de Cauchy à Baire* (1978).

René Baire, *Œuvres scientifiques*, Bordas, 1990.

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



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

Hervé Ponchelet
Le Point

Code 002445 • 240 pages • Prix 100 F
Voir bon de commande p. 98



BELIN • POUR LA SCIENCE

Le bœuf à la mode asiatique

Le dernier grand mammifère découvert au XX^e siècle n'était qu'un mythe!

La duplicité et l'ingéniosité humaine ont forgé nombre de chimères, inventé des monstres imaginaires ou monté des canulars zoologiques. C'est ainsi que sirènes, poissons à fourrure, faux oiseaux, lièvre à cornes et prétendus scalp de Yéti ont pu être vendus jadis au poids de l'or à des naturalistes amateurs, ou soumis à la sagacité de cryptozoologistes toujours à l'affût de quelque bête ignorée. De telles fantaisies ou mystifications, fréquentes encore durant le XIX^e siècle, sont heureusement devenues rarissimes de nos jours. Pourtant, le dernier grand mammifère recensé en 1993 en Asie du Sud-Est, baptisé *Pseudonovibos spiralis* le plus officiellement du monde, et dont la découverte fut commentée dans les journaux scientifiques les plus sérieux, constitue paradoxalement l'une des plus incroyables supercheries de l'histoire de la zoologie.

Comment se fait-il que ce grand bovidé aux étranges cornes spiralées ait pu être inscrit sur la liste rouge des animaux menacés de l'Union internationale pour la conservation de la nature? Si menacé même que personne ne l'avait jamais vu



Un des trophées falsifiés du mammifère mythique *Pseudonovibos spiralis*, découvert au Cambodge.

sauf dans l'imaginaire plus ou moins collectif des villageois khmers, dans les provinces orientales du Cambodge, où l'animal, connu sous le nom de Khting Sipuoh (le bœuf mangeur de serpents) était supposé survivre. En réalité, le *Pseudonovibos spiralis* n'a jamais existé! Telle est la conclusion récente de deux expertises effectuées par des chercheurs français et publiées dernièrement dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*.

L'Affaire commence en 1993, au Vietnam, un an après la découverte, dans la cordillère Annamitique, d'un nouveau grand bovidé, le Saola, – celui-là bien réel – dénommé *Pseudoryx nghetinhensis*, suivi presque aussitôt de celle d'un curieux cervidé, un Muntjac géant, lui aussi nouveau. Cette région du Globe, souvent difficile d'accès, devient tout à coup un sanctuaire, où paraît subsister toute une faune sauvage encore inconnue. Curieusement, c'est à cette époque que l'on voit apparaître sur des marchés locaux, au Vietnam, puis à Phnom Penh, la capitale cambodgienne, plusieurs trophées de grands bovidés dont les cornes en forme de lyre et munies d'anneaux de croissance n'évoquent, une fois de plus, aucun animal connu. Plusieurs étuis cornés isolés sont dès lors rapidement décrits l'année suivante comme appartenant à un nouveau genre et à une nouvelle espèce, précisément *Pseudonovibos spiralis*, laquelle, à en croire certains chasseurs locaux, subsiste encore dans les forêts montagneuses à l'Est du Mékong.

En 1999, intrigué par ce mystérieux animal, tantôt assimilé à une antilope, tantôt apparenté à un capriné, mais que personne n'avait jamais vu, Arnould Seveau, un explorateur-naturaliste tente, lui aussi, de traquer l'énigmatique Khting Sipuoh. Pourtant, après plusieurs mois de recherche dans la jungle cambodgienne, à pied ou à moto, il doit admettre qu'il n'en a pas rencontré. Il ramène deux trophées recueillis à Phnom Penh. En France, il découvre quatre frontaux munis de leurs cornes appartenant manifestement au Khting Sipuoh, et récoltés, en 1925, dans l'ancienne Indochine française par un planteur de coton. Avec une équipe du Collège de France, du Muséum et de l'Université Pierre et Marie Curie, il étudie le matériel collecté.

Les analyses d'ADN effectuées sur les parties osseuses des crânes (et non des cornes) ont, dans un premier temps, montré que tous les frontaux provenaient... de bœufs domestiques. La surprise était de taille. Des moulages ont été réalisés pour chaque étui corné, et ils apportèrent leur lot de nouvelles surprises. D'une part, deux des six crânes étaient à l'évidence dotés de leurs propres étuis cornés. Les cornes étaient donc, elles aussi, d'un bœuf domestique. D'autre part, la moitié des moulages des étuis cornés présentaient un creux prononcé à leur extrémité, témoignant d'un pincement de ces étuis : opération qui n'était réalisable qu'une fois les étuis cornés retirés de leur pivot osseux. À cette déformation artificielle des cornes, s'ajoutaient deux autres observations qui ne laissaient aucun doute quant à leur caractère frauduleux : les anneaux de croissance étaient espacés bien trop régulièrement, et l'examen histologique des cornes, effectué grâce à des lames minces observées en lumière polarisée, a révélé que les couches de kératine qui, normalement, s'empilent les unes sur les autres au cours de la croissance, étaient entaillées artificiellement. Les anneaux de croissance n'avaient aucune existence réelle! Le verdict était sans appel : tous les spécimens examinés n'étaient qu'une habile contrefaçon obtenue en sculptant et en déformant de banals étuis cornés de bovins domestiques! Or le procédé qui consiste à ramollir la kératine en la chauffant pour permettre de modifier la forme du cornage était justement en usage en Indochine à l'époque coloniale, selon le témoignage d'un inspecteur vétérinaire d'alors.

Aucune information n'a permis jusque-là de circonscrire l'aire de production de ces cornes. Comme les populations khmères attribuent des vertus médicinales à ces cornes – censées guérir des morsures des animaux venimeux –, ces dernières devaient acquérir une grande valeur marchande d'autant que l'animal que personne n'avait jamais vu était devenu quasiment mythique.

S'il ne fait pas de doute que l'énigme zoologique du «bœuf mangeur de serpents» est résolue – non sans quelques grincements de dents dans la communauté scientifique –, il reste à en découvrir l'origine.

Herbert THOMAS, Collège de France

Les brousses tigrées

Au Niger, la végétation des zones sahéliennes adopte des profils différents selon l'abondance de l'eau et la pente du terrain.

En vol au-dessus de la zone sahélienne du Niger, les tons pastels aperçus attestent de l'aridité de la région. Cependant la végétation n'est pas absente. Plus encore, on distingue différents motifs d'organisation : ici, des bosquets forment des taches, plus loin la végétation présente des bandes parallèles et ailleurs encore les deux motifs coexistent. À quoi sont dues ces diverses organisations? Aboubacar Ichaou, de l'Université de Toulouse, en collaboration avec le CIRAD-Forêt, a étudié la structure et le fonctionnement de ces morphologies végétales.

Une cinquantaine de parcelles de 1 000 mètres carrés ont été étudiées. La diversité des organisations végétales reflète la pente du terrain et l'abondance des pluies. Lorsque les précipitations

varient de 250 à 450 millimètres par an et que la pente est d'environ un pour cent, la végétation adopte un profil, dit de brousse tigrée, c'est-à-dire où alternent des bandes végétales et des bandes de sol nu. Sur des pentes inférieures, avec 500 à 600 millimètres de pluie par an, les bandes alternent avec des massifs aux formes plus variées. Enfin, entre 600 et 800 millimètres et des pentes quasi nulles, la végétation est diffuse.

Quelle est l'origine de la structure particulière d'une brousse tigrée? Les bandes végétales de ces brousses sont constituées de trois zones alignées perpendiculairement au sens de la pente du terrain : en amont, une zone de plantes annuelles, des graminées et des herbacées, puis une zone d'arbres vivants et enfin une zone d'arbres morts. À la saison des pluies, l'eau ruisselle sur la croûte dure du sol, puis, s'infiltre dans le sol aux abords de la bande végétale. Toutefois, cette infiltration de l'eau n'est pas homogène sous les bandes végétales : elle est maximale au centre.

En amont de la végétation, la zone nue, où un peu d'eau stagne, est colonisée par des graminées. Ce front progresse chaque année. Plus en aval, des arbres «peu exigeants» s'installent. Progressivement, les arbres qui se développent sont de plus en plus avides d'eau, mais ils finissent par être dans la zone où la profondeur humide est faible (en aval). L'apport en eau est alors insuffisant, et ils meurent. Ainsi, la brousse tigrée n'est pas immobile : toutes les bandes végétales se déplacent d'environ 50 centimètres chaque année vers l'amont.

Ces structures végétales traduisent une adaptation naturelle et efficace à la raréfaction de l'eau. Plus cette dernière est rare, plus la végétation est contrainte d'adopter une organisation de brousse tigrée, qui assure sa survie. Afin d'améliorer la gestion à long terme des ressources végétales et forestières, A. Ichaou a comparé les rendements en bois des différentes structures végétales, et a étudié leur fonctionnement selon les pluies. Il détermine des paramètres simples, tels la proportion de recouvrement végétal, l'identification des espèces principales ou encore le nombre de bosquets par unité de surface. Rappelons qu'au Niger, ces brousses fournissent 80 pour cent de l'énergie consommée par le pays.

BRÈVES

Une fine mouche

Lorsque vous entendez le bourdonnement d'une mouche, vous localisez rapidement l'insecte, car vos deux oreilles, éloignées l'une de l'autre, ne perçoivent pas le son simultanément. La mouche peut-elle aussi vous localiser au son de votre juron agacé? Oui, si l'on en croit l'étude de Ron Hoy, de l'Université Cornell, sur l'appareil auditif d'*Ormia ochracea*, une mouche parasite du criquet. Posée sur une balle de ping-pong en sustentation sur un jet d'air, la mouche se déplaçait dans la direction des chants de criquets qui étaient émis. En observant les mouvements de la balle, les zoologistes ont montré que l'insecte suivait les chants à deux degrés près, une précision étonnante si l'on considère que ses deux tympans ne sont distants que de 0,5 millimètre.

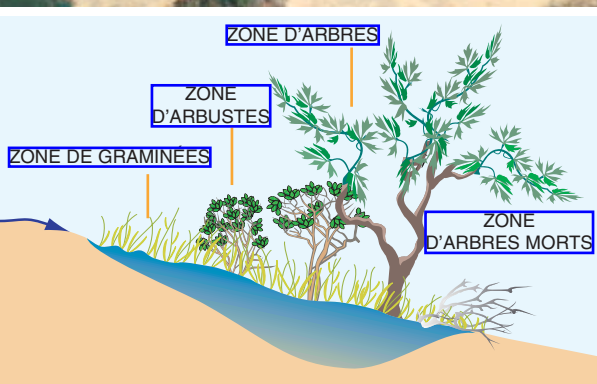


Des étoiles à neutrons forgeronnes

Où se forgent les atomes lourds, tels que l'or ou le platine? Les astrophysiciens doutent que ce soit dans les supernovae, issues de l'explosion d'étoiles massives, qui ne produisent sans doute que des éléments plus légers. Un creuset plus vraisemblable serait les étoiles à neutrons. Une équipe anglaise a simulé sur ordinateur la collision de deux étoiles à neutrons et a montré que, outre la formation d'un trou noir, le choc rejetait de grandes quantités de matière extrêmement chaude et riche en neutrons, où auraient lieu les réactions nucléaires de synthèse des éléments lourds.

La momie de la femme du gouverneur

Une mission archéologique égyptienne a découvert la momie de Naassa, la femme du gouverneur des oasis, sous la XXVI^e dynastie pharaonique, aux VII^e et VI^e siècles avant notre ère. Elle reposait dans un sarcophage en pierre calcaire, entourée d'une centaine d'amulettes et de mascottes en or, dans la vallée des momies de l'oasis de Bahariya, à 400 kilomètres au Sud-Ouest du Caire. Cette vallée mise au jour en 1999 est une immense nécropole de près de 10 000 sépultures, où reposent plus de 200 momies recouvertes de plastrons en or. Le tombeau du gouverneur des oasis a été découvert il y a un an dans cette même vallée, où les fouilles se poursuivent.



Les brousses tigrées (en haut) poussent dans les zones de faible pente, où les pluies sont rares. L'eau de ruissellement est d'abord tout juste suffisante pour des graminées. Ces dernières retiennent l'eau, de sorte que des arbustes qui consomment peu d'eau peuvent se développer en aval (en bas). L'eau continue à s'accumuler, des arbres poussent, mais ils absorbent toute l'eau disponible et ceux qui croissent en aval meurent. Ce mécanisme se manifeste par des bandes d'espèces végétales, séparées par des bandes de sol nu : c'est la cause de l'aspect tigré de la brousse.

Des conifères paléoclimatologues

L'analyse de carottes de glace ou de sédiments renseigne sur l'histoire du climat, mais n'en donne qu'une image moyennée sur de longues périodes. Certains conifères du Sud du Chili vivent jusqu'à 3 600 ans. On a retrouvé des souches de ces conifères fossilisées et conservées dans des terrains volcaniques depuis 50 000 ans. On en a analysé les cernes de croissance que l'on a comparés avec ceux des arbres qui poussent aujourd'hui. Cette comparaison semble indiquer que le climat actuel ressemble à celui qui régnait dans cette région au Sud du Chili, il y a 50 000 ans.

Champ de nanobosses

De minuscules dômes poussent désormais sur le silicium. Leur hauteur atteint 25 atomes pour un diamètre de 100 atomes (25 nanomètres). Ils sont six fois plus fins que les motifs obtenus dans l'industrie microélectronique. Des chimistes de l'Université de Cornell ont mis au point une technique dite d'«attaque contrôlée des dislocations».



Ils assemblent une tranche de silicium très mince sur une plus épaisse. Les deux tranches sont légèrement décalées. Quand les atomes de la tranche mince sont superposés avec ceux de l'autre tranche, ils forment des liaisons fortes, alors que les atomes de silicium décalés forment des liaisons faibles. Une solution chimique détruit alors les liaisons les plus faibles, faisant apparaître ces nanodômes.

La Pompéi des Salamandres

En Chine du Nord, 500 salamandres vieilles de plus de 150 millions d'années ont été découvertes. Elles ont été conservées grâce à une éruption volcanique qui avait rempli un étang de cendres chaudes et l'avait transformé en une sorte de «Pompéi des amphibiens». Mises au jour par des paléontologues du Muséum d'histoire naturelle de New York et de l'Université de Chicago, toutes les salamandres étaient pétrifiées sur une surface de 10 mètres carrés. Les squelettes de ces petits contemporains des dinosaures, qui ont reçu le nom de *Sinerepeton fengshanensis*, du grec *sino* pour Chine, et *hepeton*, pour rampant (Fengshan est le nom du site de la découverte), diffèrent à peine de leurs équivalents modernes : leur morphologie est restée à peu près stable depuis le Jurassique supérieur.

Bon pied, bon œil

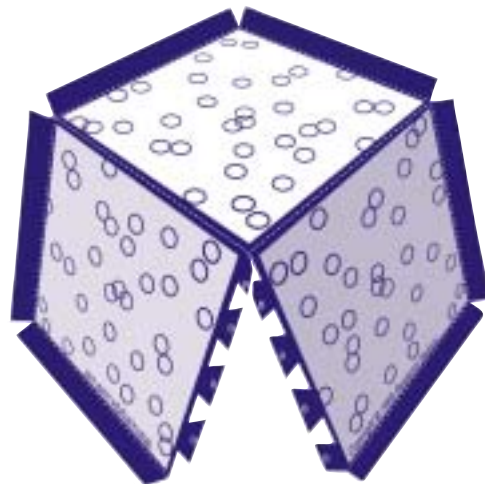
La perception visuelle de l'espace est plus efficace quand nous sommes en mouvement.

« On ne voit bien qu'avec son cœur ; l'essentiel est invisible pour les yeux », révèle le Renard au Petit Prince. Voit-on avec le cœur ? Peut-être. Avec les yeux ? Évidemment, mais ce n'est pas tout. Avec Ivan Lamouret, Francesco Panerai et Jacques Droulez, nous venons de montrer que la vision n'est pas seulement rétinienne, mais que la perception visuelle du relief provient aussi des informations captées par le cerveau sur nos propres mouvements. En d'autres termes, nous voyons le monde d'une façon différente quand nous nous déplaçons autour d'un objet immobile ou quand nous sommes immobiles et que l'objet bouge par rapport à nous.

Notre cerveau se sert de plusieurs moyens pour voir le relief. L'un d'eux est la vision binoculaire : notre cerveau reconstruit la forme en trois dimensions d'un objet ou le relief d'un paysage à partir du décalage entre les deux images perçues par chaque œil. Nous étudions un autre mode de perception du relief, fondé sur le mouvement. Chacun a déjà constaté que les objets les plus proches semblent se déplacer plus vite que les objets éloignés. Quand nous marchons dans une forêt, les arbres proches défilent apparemment plus vite que les arbres lointains. En fait, nous ignorons, à partir des seules informations captées sur la rétine de l'œil, si nous nous déplaçons dans une forêt stationnaire, ou si nous sommes immobiles et que la forêt défile autour de nous.

Jusqu'à présent, les psychophysiciens pensaient que la forme d'un objet fixe perçue par un observateur en mouvement était identique à celle perçue par un observateur immobile qui regarde l'objet en mouvement. Selon eux, le cerveau reconstruirait l'objet en trois dimensions à partir des seules informations captées par la rétine, en mettant en œuvre des algorithmes complexes. Si les informations rétinienne étaient équivalentes, alors les perceptions seraient forcément identiques. C'est faux ! Nous avons montré que la perception diffère, même quand des informations identiques parviennent sur la rétine.

Dans l'expérience que nous avons menée, deux observateurs sont placés dans un dispositif de réalité virtuelle où



un écran affiche l'image d'un objet virtuel. L'un des observateurs bouge la tête et la déplace devant l'écran. L'image qu'il observe change, réactualisée en permanence en fonction du mouvement, grâce à des capteurs qui détectent les mouvements de sa tête. Le second observateur est immobile. Il regarde sans bouger l'objet qui tourne sur l'écran. Les deux observateurs reçoivent exactement les mêmes informations visuelles.

L'objet virtuel a, par exemple, une forme réelle concave, mais parce qu'on y a dessiné des cercles qui semblent vus en perspective, il donne l'illusion d'être un cube (voir l'encart). Ce type de trompe-l'œil – introduit en psychologie par Albebert Ames il y a 50 ans – est proche des «anamorphoses» découvertes par Léonard de Vinci et aussi utilisées par les artistes Georges Rousse et Patrick Hughes. Cet objet est source de conflit, car le cerveau peut avoir deux interprétations de la forme de l'objet à partir des informations rétinienne : l'observateur perçoit la vraie forme de l'objet, ou la forme erronée, le faux relief.

Bien que les signaux rétinienne soient identiques pour l'observateur actif qui déplace sa tête et pour celui qui reste immobile, la perception qu'ont les deux observateurs du relief de l'objet est différente. Les observateurs en mouvement voient beaucoup plus souvent la vraie forme de l'objet virtuel que les observateurs passifs. Ce résultat démontre que l'observateur en mouvement utilise des informations sur son déplacement pour créer une perception du relief. Ces informations ne sont pas de nature visuelle, mais elles concernent la position et le déplacement. En effet, le cerveau dispose de capteurs d'accélération localisés dans l'oreille interne. Il utilise, dans un des modes de perception du relief, les informations qu'ils produisent. Notre propre mouvement est donc très important dans la perception du relief. On ne voit bien le relief qu'avec ses pieds, aurait rajouté le Petit Prince.

Mark WEXLER, Laboratoire de physiologie de la perception et de l'action du Collège de France.

Naufrage antique

Le navire transportait une cargaison d'amphores à vin grecques vers l'Égypte.

A la recherche d'un sous-marin israélien disparu en Méditerranée orientale il y a 31 ans, la Société américaine *Nauticos*, spécialisée dans l'exploration des grands fonds, a détecté par sonar un groupe de cinq «objets» qui gisaient à plus de 3 000 mètres de fond, entre Rhodes et Alexandrie. Les images vidéo obtenues grâce à un robot sous-marin ont confirmé que l'un d'eux était une épave. Quelle est l'histoire de cette mystérieuse épave? Le film enregistré par le robot a révélé qu'elle contient des amphores grecques, dont la forme caractéristique indique qu'elles datent de la fin du III^e ou du début du II^e siècle avant notre ère. Aucune épave antique n'avait jamais été découverte à une si grande profondeur.

Le navire a coulé, puis s'est couché sur le flanc gauche, qui s'est aplati sous le poids des amphores. Ces dernières se sont renversées, ont roulé et se sont

entassées dans le flanc gauche. L'épave mesure environ 20 mètres. Six types d'amphores à vin ont été identifiées, dont l'un est celui de Rhodes et un autre est celui de Kos, une île voisine. Les archéologues estiment à 2 500 le nombre d'amphores transportées.

La zone correspondant à la proue a été identifiée grâce à la présence de cinq ancres. Dans l'Antiquité, les ancres étaient en plomb et en bois. Les restes métalliques reposaient sur l'avant du pont, où les ancres sont généralement rangées pendant les voyages en haute mer. Il n'est pas rare d'en trouver six, voire davantage, sur les épaves de cette époque, car elles étaient souvent endommagées, ou même perdues lors de leur utilisation. À l'arrière du bateau, dans la zone qui servait à l'équipage, reposent quelques ustensiles de cuisine.

Un chaudron de métal se trouve sur un amas d'amphores en désordre. Des sédiments s'y sont déposés depuis 2 000 ans. Les océanographes cherchent un moyen de les récupérer afin d'étudier les changements qu'a connus la Méditerranée durant cette période.

A cause de la grande profondeur où gît l'épave et du froid qui y règne, certains morceaux de la coque de bois semblent avoir été conservés : une

poutre du pont et un petit morceau de planche dépassant des sédiments ont été repérés. L'ensemble du côté gauche de la coque serait intact.

Les archéologues supposent que le navire faisait route vers l'Égypte, parce que l'épave a été retrouvée à mi-chemin entre Rhodes, autrefois un grand centre commercial, et Alexandrie, et qu'il transportait une cargaison de vin grec. Le naufrage aurait été causé soit par une avarie, soit par une tempête. Aujourd'hui, on ignore si les navigateurs de l'Antiquité se contentaient de suivre les côtes ou traversaient la Méditerranée. Cette épave semble indiquer que les marins grecs naviguaient en pleine mer pour acheminer des marchandises jusqu'en Égypte.



KYLE YAMADA / UNIVERSITY OF ARIZONA / SCIENTIFIC AMERICAN

Tam-tam d'éléphant

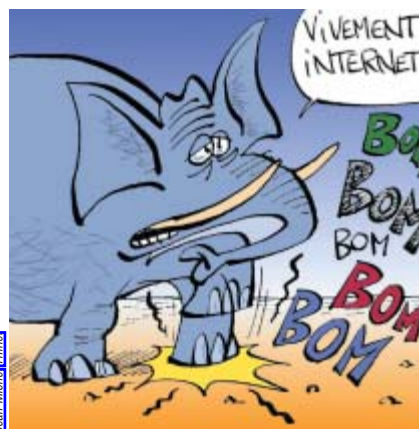
Les éléphants communiquent par des ondes sismiques qui se propagent dans le sol.

P rès d'un point d'eau, à la tombée du jour, une partie des troupes du colonel Hathi se désaltèrent après une longue journée à la recherche infructueuse de Mowgly. Leur comportement est étrange : sans raison apparente, ils se penchent en avant, ils lèvent une de leurs pattes et se figent, ou bien ils martèlent le sol de leur patte. Pour quelles raisons? Caitlin O'Connell-Rodwell, de l'Université de Stanford, a observé plusieurs fois cette scène, non pas dans *Le livre de la jungle*, mais dans le Parc national Etosha, en Namibie. Selon elle, les pachydermes répondent aux messages émis, via le sol, par des congénères qui s'approchent d'un point d'eau.

Depuis les années 1980, on sait qu'outre les barrissements, les éléphants utilisent un deuxième moyen de communication : des grondements à très basse fréquence (20 hertz), inaudibles, qui se propagent dans l'air jusqu'à envi-

ron 10 kilomètres. Grâce à ces ondes, des animaux éloignés coordonnent leurs déplacements. Pour étudier le troisième moyen de communication des pachydermes, la zoologiste et ses collègues ont tout d'abord enregistré trois messages sonores connus pour signifier *Bonjour*, *Alerte* et *On y va*. Puis, ils les ont convertis en ondes sismiques qu'un émetteur a propagées dans le sol, à proximité d'un groupe d'éléphants. À chaque fois que le message d'alerte était émis, une des femelles étudiées entraînait dans un état d'extrême agitation.

A l'aide de microphones et d'enregistreurs d'ondes sismiques enterrés,



LEAH-MICHEL / NATURE

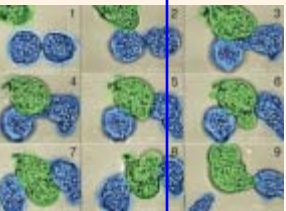
C. O'Connell-Rodwell a estimé que ces signaux, émis simultanément avec les grondements à basse fréquence, étaient perceptibles jusqu'à plus de 30 kilomètres. Les vibrations sont captées par la corne des ongles et relayées jusqu'à l'oreille interne par les os du squelette. Ainsi, les éléphants indiquent sur de longues distances la présence d'un prédateur, recherchent des partenaires, et repèrent même les orages : lorsqu'un orage éclate en Angola, les éléphants du Parc Etosha, à 160 kilomètres au Sud, se dirigent vers la zone arrosée, probablement en réponse aux vibrations que l'orage transmet par le sol.

Une autre observation confirme ces résultats. En Afrique du Sud, où l'habitat naturel des éléphants est de plus en plus restreint, les responsables des parcs nationaux tuent les éléphants en nombre. Quand cette chasse en hélicoptère a lieu dans le Nord du parc Kruger, les éléphants, à plusieurs dizaines de kilomètres au Sud, sont agités et nerveux : sans doute perçoivent-ils les appels de détresse de leurs congénères pourchassés, ou bien les vibrations des pales de l'hélicoptère.

Faut-il isoler les éléphants des zoos des sources urbaines de vibrations, afin d'améliorer leurs conditions de captivité?

Les amibes accoucheuses

Lors de la naissance d'un bébé, une sage-femme attentionnée coupe le cordon ombilical. Les amibes, des organismes unicellulaires qui se reproduisent par division de la cellule en deux cellules filles, jouissent des mêmes soins. L'équipe d'Elisha Moses, de l'Institut Weizmann,



a montré que, lorsque les deux cellules filles ne se séparent pas complètement et restent reliées par un fil, une troisième amibe est sollicitée pour couper le fil, en exerçant une pression. Cette accoucheuse unicellulaire répondrait à un signal chimique libéré par la membrane des deux siamoises sous l'effet de la tension exercée à l'endroit du fil, quand il ne parvient pas à se rompre tout seul.

Le plaisir de l'inattendu

Une étude américaine a révélé quelques-unes des bases biologiques de l'attraction qu'exercent les événements inespérés. On a enregistré les images de l'activité cérébrale de sujets dans la bouche desquels on déversait de petites quantités d'eau ou de jus de fruit (l'objet du plaisir). Dans un type de tests, la séquence des boissons était connue, dans l'autre non. On a constaté que le circuit de la récompense ou encore l'un des «centres du plaisir» (le noyau accumbens) est notablement plus activé par le jus de fruit quand ce dernier est délivré sans être annoncé. Les plaisirs inattendus sont plus forts que les plaisirs prévisibles. Cette étude éclairera peut-être notre compréhension des mécanismes de dépendance aux drogues, dont on sait qu'elles perturbent le fonctionnement du noyau accumbens.

Une bague contraceptive

Les femmes devraient bientôt disposer d'un nouveau moyen contraceptif : une bague en plastique souple à insérer dans le vagin une fois par mois. Elle délivrerait chaque jour, à un rythme régulier, les mêmes hormones qu'une pilule classique. Les hormones traversent la muqueuse vaginale pour atteindre la circulation sanguine, où leur concentration y serait suffisante pour bloquer l'ovulation, mais deux fois inférieure à celle délivrée par les pilules. La bague a déjà été testée sur plus de 1 000 femmes ; le taux d'échec (un pour cent) est quasiment le même qu'avec la pilule. Ce moyen contraceptif devrait être disponible dès cette année aux États-Unis et, en 2002, en Europe.

Étoiles alcoolisées

Des astronomes ont imaginé une méthode pour évaluer l'âge des étoiles massives en fonction de la concentration en alcool dans leur voisinage.

Après l'ivresse des profondeurs et celle des sommets, voici l'ivresse de l'espace : des astronomes de l'Observatoire de Leyde, aux Pays-Bas, viennent de développer une méthode de datation des étoiles massives fondée sur la mesure de la concentration en alcool contenu dans le nuage moléculaire qui entoure l'étoile. Il ne s'agit pas de l'éthanol que l'on trouve dans les boissons alcoolisées, mais du méthanol qui s'évapore de particules de glace d'un mélange d'eau, de dioxyde de carbone et d'alcool présentes dans les nuages où sont plongées les étoiles massives. Une piste pour suivre l'évolution de ces mastodontes de l'espace ?

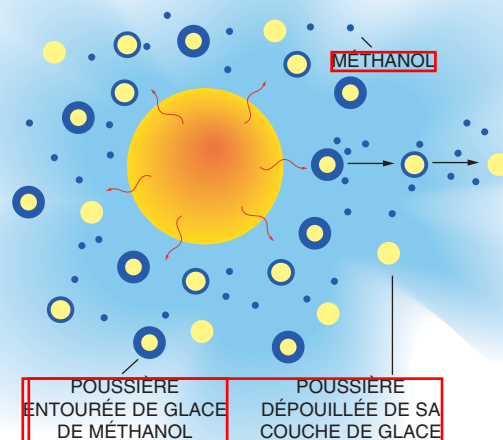
Les étoiles dites massives sont les plus grosses connues dans l'Univers. Leur masse atteint parfois 50 fois celle du Soleil, alors que la majorité des étoiles a une masse inférieure à 10 fois la masse solaire. Plus riches en hydrogène, les étoiles massives brillent plus intensément que les autres, mais elles s'éteignent aussi plus vite, quand elles ont brûlé tout leur «carburant». Par exemple, les étoiles dont la masse est 10 fois supérieure à celle du Soleil brillent 1 000 fois plus intensément, mais meurent au bout de 100 millions d'années. En comparaison, notre Soleil brillera encore plusieurs milliards d'années.

Les étoiles massives se forment au cœur d'un nuage de gaz, composé essentiellement d'hydrogène, d'hélium et de traces d'azote et de monoxyde de carbone. On ignore si les couches gazeuses se contractent pour former une seule étoile massive ou alors plusieurs petites étoiles qui fusionnent par la suite. Le nuage peu dense qui entoure la jeune étoile et son atmosphère est un résidu du nuage initial. Il contient aussi des poussières, des silicates et du graphite, qui représentent à peine un pour cent de sa composition. Ces poussières sont beaucoup plus petites que celles que l'on trouve sur la Terre : quelques dixièmes de micromètre, soit la taille des particules dans la fumée de cigarette. Elles fixent pourtant des molécules gazeuses et sont alors enveloppées d'une fine pellicule de glace,

qui contient de l'eau, du dioxyde de carbone et de l'ammoniaque. Ce givre constitue un catalyseur pour de nombreuses réactions chimiques, dont les produits se retrouvent alors piégés dans la glace, et parmi eux, des molécules d'alcool.

Après leur naissance, la température des étoiles massives augmente et atteint plusieurs milliers de degrés en quelque 50 000 ans. Elles émettent alors un rayonnement ultraviolet suffisant pour que le méthanol piégé dans les enveloppes de glace se sublime (dans le voisinage des étoiles massives où règne une faible pression, les astronomes ont estimé qu'il se sublime vers -180°C). Peu à peu, la concentration en méthanol dans les pellicules de glace diminue, alors qu'elle augmente avec le temps dans le nuage stellaire. Plus l'étoile est vieille, plus la concentration en alcool dans le nuage est élevée.

Floris van de Tak et son équipe de l'Observatoire de Leyde ont analysé le rayonnement émis par dix très jeunes étoiles massives de la Voie lactée et notamment les raies spectrales du méthanol, à partir de mesures effectuées au télescope Maxwell, à Hawaï. Ils en ont déduit que la concentration en alcool représente un indicateur de l'âge de l'étoile. Il n'existe aucune méthode pour mesurer l'âge des jeunes étoiles massives et, grâce à cet indicateur, les astronomes pourront comparer les âges de jeunes étoiles massives situées dans une même région. Ils pourront déterminer si elles se sont formées ensemble ou non, et lever ainsi un peu le voile sur leur formation.



Les poussières contenues dans le nuage de l'étoile sont entourées d'une couche de glace contenant notamment du méthanol. Sous l'effet du rayonnement de l'étoile, la glace se sublime progressivement, libérant le méthanol : la concentration en alcool augmente dans le nuage stellaire, à mesure que l'étoile vieillit. En mesurant cette concentration, on a une idée de l'âge de l'étoile.

Aphrodite en couleurs

Un ver marin velu sert de modèle aux physiciens qui étudient les cristaux photoniques.

Entre 1 000 et 2 000 mètres de profondeur, vous explorez les fonds marins à bord d'un sous-mmersible : tout n'est que nuances de bleu dans le monde du silence. Tout? Non, au détour d'un récif, votre regard est attiré par un étrange ver velu, d'environ 20 centimètres de longueur sur cinq centimètres de largeur, et dont les soies, au gré de leurs mouvements, se parent de rouge, de bleu et de vert, selon l'angle d'incidence de la lumière. Cet animal est une aphrodite, un ver polychète, c'est-à-dire poilu, qui vit dans les vases et les sables sous-marins.

Cette apparence multicolore n'est pas due à une pigmentation comme chez de nombreux animaux : à une telle profondeur, la faible luminosité en atténuerait l'effet. L'équipe de G. Rouse, de l'Université de Sydney, a montré que ces soies iridescentes tirent leurs propriétés d'une structure identique à celle des cristaux photoniques. Ces cristaux sont des matériaux composites opaques à certaines longueurs d'onde, mais transparents à d'autres. Cette propriété est due à l'agencement régulier des éléments constitutifs : une fibre de silice percée de canaux creux régulièrement espacés selon un réseau hexagonal est un cristal photonique. Le motif répété, ici un canal entouré de ses six plus proches voisins, a une taille de l'ordre

des longueurs d'onde de la lumière visible (entre 450 et 800 nanomètres). Dans un tel cristal, selon la longueur d'onde et l'angle d'incidence, la lumière est complètement réfléchie ou, à l'inverse, pénètre dans le cristal et y est piégée, en raison de phénomènes complexes de réflexion et de diffraction. Ainsi, selon l'angle d'incidence de la lumière, les longueurs d'onde piégées diffèrent, de sorte que la couleur observée, celle qui s'échappe, varie, de la même façon que celle de l'opale, elle-même un cristal photonique.

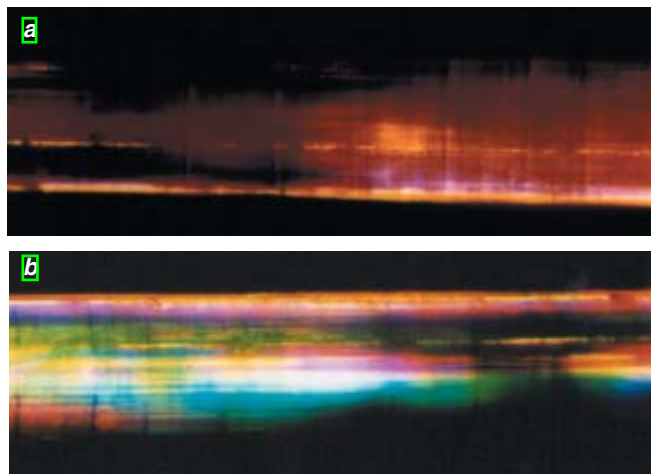
L'observation au microscope électronique d'une soie d'aphrodite a montré qu'elle ressemble aux fibres de silice décrites précédemment. Cette soie est constituée d'une série de cylindres creux dont la paroi est composée de chitine, une protéine présente dans la carapace des arthropodes. Ces cylindres sont agencés en un réseau hexagonal (chacun a six plus proches voisins), lui-même cylindrique, de 210 micromètres de diamètre. La distance qui sépare chaque

petit cylindre de son plus proche voisin est remarquablement constante le long de la soie.

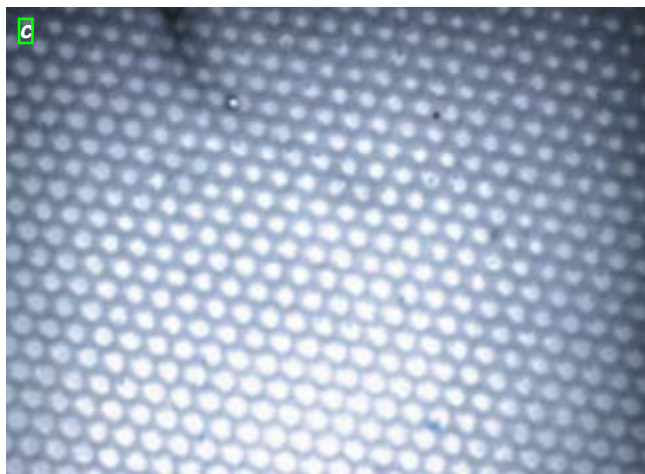
Dans une seconde étape, les zoologistes ont modélisé une soie afin d'en déterminer les caractéristiques optiques. Confirmant les observations sur l'animal, le modèle réfléchit les longueurs d'onde du rouge, du vert et du bleu, tandis que celles comprises entre 520 et 580 nanomètres sont complètement absorbées par la soie : elles ne sont pas transmises.

On ignore encore quels avantages des soies iridescentes apportent aux aphrodites : est-ce pour reconnaître leurs congénères, trouver un partenaire ou attirer les proies?

L'aphrodite n'est pas le seul animal doté d'une parure aux couleurs changeantes : les papillons en sont un autre exemple. Toutefois, à l'inverse de la structure complexe des ailes des lépidoptères, la simplicité géométrique des soies du ver marin en fait un modèle de choix pour les physiciens qui souhaiteraient en copier la structure.



L'aphrodite (en haut) est un ver marin qui mesure environ 20 centimètres de longueur et dont les soies latérales sont iridescentes : selon l'angle d'incidence de la lumière, les soies réfléchissent des couleurs différentes. Le diamètre des soies est de l'ordre de 200 micromètres. Elles apparaissent ainsi rouges (a), ou vertes et bleues (b). Cette pro-



priété est due à la structure périodique des soies qui sont composées d'une série de cylindres creux dont les parois sont en chitine (c). Chaque cylindre a un diamètre de un micromètre. Certains rayons lumineux sont piégés dans les soies, tandis que d'autres sont réfléchis : leurs couleurs changent selon l'angle d'observation.

Agent double protéique

Une protéine essentielle pour le fonctionnement des muscles, la dystrophine, commande aussi le débit du sang dans les artères.

Pendant une course, le rythme cardiaque s'accélère, le flux sanguin augmente dans les organes qui participent à l'effort, mais ralentit dans les autres. Ces variations sont commandées par les petites artères périphériques alimentant les capillaires qui irriguent les organes. Ces petites artères ont presque le même diamètre chez tous les mammifères ; seul leur nombre varie. Pour augmenter ou, au contraire, réduire le flux sanguin, elles se dilatent ou se contractent. Daniel Henrion et son équipe, dans l'Unité INSERM 541, à l'Hôpital Lariboisière, à Paris, ont constaté que la dystrophine, une protéine essentielle du muscle, intervient dans la régulation du diamètre des artères qui commandent l'afflux de sang pendant l'effort.

Les vaisseaux sanguins sont constitués d'un endothélium, c'est-à-dire d'une couche de cellules en contact avec le sang, et de cellules musculaires lisses, qui entourent les vaisseaux et en autorisent la contraction. Pour une pression et un débit sanguin donnés, un équilibre s'établit entre le muscle lisse, prêt à réduire le diamètre du vaisseau, et l'endothélium, qui tend, au contraire, à le faire augmenter. Les physiologistes s'interrogent depuis longtemps sur l'identité de la molécule qui active les signaux biochimiques de la contraction ou de la relaxation musculaire, selon le débit sanguin perçu par les cellules endothéliales ou la pression détectée par les cellules du muscle lisse. L'équipe de l'INSERM a eu l'idée d'évaluer le rôle de la dystrophine,

une protéine du cytosquelette qui confère leur forme aux cellules. Dans les muscles striés, la dystrophine relie des protéines de la membrane cellulaire et les filaments d'actine. L'absence de dystrophine est à l'origine de la myopathie de Duchenne.

Pour élucider le rôle de la dystrophine, les biologistes ont prélevé des petites artères sur des souris dont les tissus sont dépourvus de dystrophine en raison d'une mutation du gène correspondant, puis ils ont étudié leurs réactions à des augmentations de la pression ou du débit sanguin. Chez des souris normales, quand le débit augmente, les vaisseaux se dilatent, mais quand la pression augmente, c'est le «tonus myogénique», c'est-à-dire la contraction, qui croît. Chez les souris sans dystrophine, les artères se dilatent très peu quand le débit augmente, mais le tonus des vaisseaux s'accroît normalement avec la pression sanguine. En revanche, en présence d'agents qui déclenchent la dilatation, l'acétylcholine, par exemple, les vaisseaux se dilatent, même chez les souris qui ne produisent pas de dystrophine : les cellules musculaires restent fonctionnelles, malgré l'absence de dystrophine, mais les messages de dilatation ne leur sont plus transmis.

Lorsque le débit sanguin augmente, l'endothélium libère des agents qui déclenchent la dilatation des vaisseaux. Le monoxyde d'azote (NO) est le principal d'entre eux. D. Henrion et ses collègues ont comparé la libération de monoxyde d'azote par l'endothélium de souris normales ou de souris mutées ; ils ont constaté que l'absence de dystrophine diminue notablement la synthèse de monoxyde d'azote, comme si l'endothélium était moins sensible à l'action mécanique du cisaillement. Normalement, la paroi des artères est soumise à deux types de forces : une force perpendiculaire à la paroi qui est due à la pression sanguine et une force de cisaillement, qui s'exerce dans le sens du flux et qui résulte des frottements des cellules sanguines sur la paroi. Ceci montre, pour la première fois, que la dystrophine est un maillon indispensable entre le signal physique, le cisaillement, qui est associé au débit sanguin, et le signal biologique responsable de la dilatation, la synthèse de monoxyde d'azote. La dystrophine serait un «détecteur» de cisaillement et, une fois activée, elle déclencherait la synthèse de monoxyde d'azote par les cellules endothéliales, médiateur qui agit sur les cellules musculaires pour qu'elles relâchent ou, au contraire, resserrent leur contrainte. Ainsi, la dystrophine adapte le débit sanguin aux besoins des tissus.

Marie-Thérèse LANDOUSY

Des piles à eau de mer

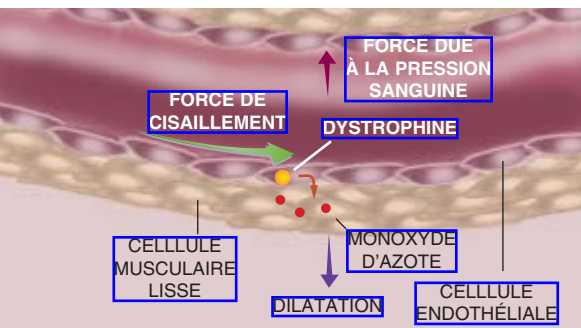
Une source d'énergie qui utilise l'eau de mer fait avancer des robots sous-marins.

La mer n'a pas fini de livrer ses richesses, et l'homme d'y puiser son énergie. Après les usines marémotrices qui produisent de l'énergie grâce aux marées, les prototypes de centrales qui convertissent l'énergie des vagues ou de la houle, des physiciens ont mis au point une pile qui fonctionne avec l'oxygène présent dans l'eau de mer.

Les robots autonomes, militaires ou civils, sont de plus en plus utilisés pour le contrôle d'installations sous-marines. On dépose le robot au fond de l'océan, où il se déplace lentement pour surveiller des câbles, des pipelines ou pour détecter des mines, par exemple. Pour que le robot soit autonome, il doit fonctionner avec peu d'énergie. On limite au maximum les opérations qui consistent à le remonter en surface pour changer ses piles ou pour recharger ses batteries ; l'intervention est fastidieuse et coûteuse, car elle nécessite le déplacement d'un navire. Les piles au lithium, les plus performantes aujourd'hui, ont une durée de vie trop courte. Les piles à eau de mer sont une nouvelle possibilité : elles sont bon marché et durent longtemps.

Elles ont été inventées par des ingénieurs russes dans les années 1970, mais se développent véritablement depuis les années 1990. Elles contiennent une anode composée d'un alliage métallique (magnésium ou aluminium) et une cathode formée d'un matériau inerte, du cuivre ou des fibres de carbone, le plus souvent. L'oxygène dissous dans l'eau de mer sert d'oxydant à la réaction électrochimique, et l'eau de mer est l'électrolyte. Le principe est simple, mais la mise en œuvre l'est moins. La concentration en oxygène dans l'eau de mer est faible (0,3 mole par mètre cube en moyenne). La circulation d'eau de mer dans la pile doit être suffisante pour fournir assez d'oxygène à la cathode.

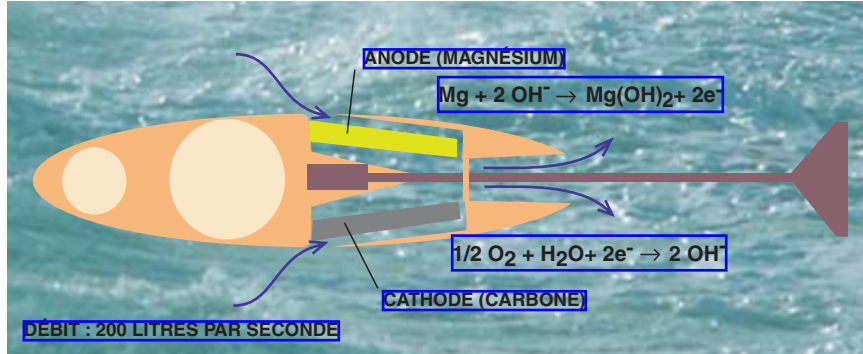
L'eau de mer, corrosive, débarrasse les électrodes des produits de la réaction (oxyde de magnésium...) qui s'accumulent et réduisent le courant dans la pile. Toutefois, des couches de calcaire se déposent sur la cathode et diminuent le rendement de la pile. Des «biofilms» se forment aussi : des bactéries ou des micro-organismes colonisent la surface de la cathode. Certaines détériorent la pile assez rapidement, lorsque le robot



La dystrophine, dans les cellules endothéliales, détecte le cisaillement dû aux frottements des globules rouges sur la paroi des vaisseaux et déclenche la production de monoxyde d'azote, lequel entraîne la dilatation de ces vaisseaux.

se déplace à faible profondeur. D'autres bactéries catalysent la réduction de l'oxygène, et le courant délivré par la pile augmente au cours des premiers jours passés sous l'eau. Il varie ensuite en fonction des fluctuations des paramètres auxquels les bactéries sont sensibles, telles que la température ou la luminosité.

Le courant délivré par la pile dépend aussi des mers où le robot évolue. Des essais ont été menés par l'Organisme de recherche militaire norvégien FFI dans la mer du Nord et dans la Méditerranée. Dans la Méditerranée, l'eau est plus chaude et plus salée, et sa conductivité est supérieure ; le courant délivré par la pile l'est aussi. En revanche, le dépôt calcaire, plus important, réduit la durée de



Clipper, un robot autonome mis au point par la Direction générale de l'armement, utilise des piles à eau de mer pour sa propulsion. Il a la forme d'un cigare de quatre mètres de longueur sur un mètre de largeur. Il parcourt 1 000 kilomètres à quatre nœuds avec la même pile.

vie de la cathode. Celle de la pile est surtout limitée par la taille de l'anode, laquelle dépasse parfois un mètre de longueur. Elle dépend aussi de la puissance demandée et du débit de l'eau de mer. Une pile à eau de mer est utilisée

pour la propulsion d'un robot sous-marin mis au point par la Direction générale de l'armement (DGA) et par le FFI. Des essais vont commencer au Bassin des carènes avant que le robot ne soit plongé dans de plus grands fonds.

Les plus anciens dinosaures sauropodes

Ils ont été trouvés en Thaïlande et ont plus de 200 millions d'années.

Les sauropodes sont presque l'archétype du dinosaure, avec leur silhouette caractéristique : une petite tête, un long cou, un corps massif soutenu par des membres en forme de pilier, et une très longue queue. Ces grands animaux herbivores ont connu un succès évolutif considérable tout au long du Jurassique (–205 à –135 millions d'années) et du Crétacé (–135 à –65 millions d'années). Parmi eux figurent les plus grands animaux terrestres ayant existé : *Diplodocus* atteignait une trentaine de mètres de longueur, et on a estimé que *Brachiosaurus* pouvait peser jusqu'à 80 tonnes (et il ne s'agit là que de formes connues par des squelettes complets ; d'après certains restes fragmentaires, les animaux auraient été encore plus grands).

Jusqu'à une date récente, cependant, on ne savait rien de l'histoire des sauropodes avant le Jurassique. Le plus ancien spécimen connu, *Vulcanodon karibaensis*, trouvé au Zimbabwe, datait du début du Jurassique. De la période précédente, le Trias (–245 à –205 millions d'années), on n'avait signalé que quelques traces de pas fort douteuses au Lesotho. Tout cela a changé avec l'identification, par notre équipe franco-thaïlandaise, d'ossements de sauropodes dans le Trias de Thaïlande. Ces restes proviennent de grès rouges déposés en milieu fluvial, correspondant à une formation géologique (la Formation Nam Phong) qui a pu être

datée par des géologues pétroliers d'après les grains de pollen et les spores qu'elle contient : ces microfossiles indiquent un âge Trias supérieur (Norien supérieur ou Rhétien, soit entre –210 et –205 millions d'années).

Les premiers ossements ont été trouvés en 1998 par un habitant d'un village de la province de Chaiphum (Nord-Est de la Thaïlande), qui chassait de nuit des écureuils volants dans une forêt et remarqua sur le sol des objets brillants au clair de lune. Ces objets se révélèrent être de gros ossements. Les paléontologues du Service géologique de Thaïlande ayant été alertés, des fouilles furent organisées et permirent de recueillir une partie d'un squelette, comprenant des vertèbres et des os des ceintures et des membres. Ce spécimen a été décrit sous le nom d'*Isanosaurus attavipachi* (le « reptile de l'Isan », nom du Nord-Est de la Thaïlande, où il a été découvert, et dédié au géologue thaï Pricha Attavipach). Il s'agit du plus ancien dinosaure sauropode connu à ce jour. L'animal ne semble pas avoir été très grand (du moins pour un sauropode) : sa longueur est estimée à quelque 6,5 mètres, mais sa croissance n'était pas achevée, comme l'indique le degré d'ossification de ses vertèbres. Les caractères de son squelette montrent qu'il s'agit bien d'un sauropode à part entière, et non d'un représentant des prosauropodes, autre groupe de grands dinosaures abondamment représentés dans le Trias. *Isanosaurus attavipachi* présente aussi des caractères primitifs : par exemple, les vertèbres du cou sont encore assez peu allongées, contrairement à ce que l'on voit chez des sauropodes plus évolués.

La découverte d'*Isanosaurus attavipachi* démontre de façon concrète que les sauropodes firent leur apparition dès

le Trias, ce que l'on supposait, mais de façon théorique faute de fossiles. On peut d'ailleurs penser qu'à la fin du Trias, ces dinosaures avaient déjà derrière eux une assez longue histoire, mais les prédécesseurs d'*Isanosaurus attavipachi* restent à découvrir. Quoi qu'il en soit, notre connaissance des sauropodes du Trias supérieur de Thaïlande n'en est encore qu'à ses débuts, et des surprises nous attendent sans doute. La preuve en est que quelques mois après la première découverte, une villageoise à la recherche de champignons dans la même forêt a trouvé à peu de distance du premier site les restes d'un deuxième squelette. Il appartient aussi à un sauropode, mais ses dimensions sont nettement plus imposantes que celles d'*Isanosaurus attavipachi* : d'après la taille de son humérus, l'animal aurait mesuré près de 13 mètres de longueur. Non seulement les sauropodes étaient déjà présents au Trias supérieur, mais dès cette période lointaine certains d'entre eux atteignaient une taille gigantesque.

Eric BUFFETAUT
et le Groupe franco-thaïlandais de
recherche sur les dinosaures



Le fémur d'*Isanosaurus attavipachi*.

Un petit astre proche

Un objet de faible masse et peu lumineux a été détecté – prouesse technique – à proximité du Soleil.

La Voie lactée est une galaxie spirale, caractérisée par un cœur dense et de long bras où naissent les étoiles. Le Soleil est à la périphérie du bras spiral majeur, à quelque 28 000 années lumière du centre galactique. Les astronomes estiment qu'il y aurait, dans la Voie lactée, entre 100 et 200 milliards d'étoiles, fourchette dont l'imprécision trahit à quel point la démographie stellaire est méconnue. Pour améliorer cette estimation, ils déterminent la densité stellaire au seul endroit de la Galaxie qui nous soit accessible, le voisinage du Soleil, et ils extrapolent cette densité à l'ensemble de la Galaxie. L'inventaire doit être le plus exhaustif possible, car toute erreur est multipliée, après extrapolation, par quelque 100 milliards! C'est pourquoi, la découverte d'un astre au voisinage du Soleil est toujours importante. Avec une équipe internationale d'astrophysiciens, nous avons découvert une nouvelle étoile, probablement une naine brune, à seulement 13 années-lumière du Soleil.

Les astronomes définissent le voisinage solaire par une sphère de 32 années-lumière de rayon, centrée sur le Soleil. Ils connaissent déjà environ 300 étoiles à l'intérieur de ce volume, mais l'inventaire n'est pas terminé. À combien d'étoiles peut-on s'attendre? On sait qu'il y a environ 50 systèmes stellaires à moins de 16 années-lumière du Soleil. Dans une sphère de rayon deux fois plus grand (32 années-lumière), il devrait y avoir environ huit fois plus d'étoiles, c'est-à-dire 400. Où se cachent les quelque 100 astres qui manquent à l'appel? Les astronomes

estiment qu'il doit s'agir pour l'essentiel d'étoiles peu lumineuses dont la masse est comprise entre 7,5 pour cent et 30 pour cent de celle du Soleil, voire d'objets encore plus petits : des naines brunes.

Une naine brune est un astre trop peu massif pour que les réactions de fusion thermonucléaire des noyaux d'hydrogène y aient lieu régulièrement. Grâce à ces réactions, qui commencent dès que leur température centrale atteint trois millions de degrés, les étoiles brillent. Or, la température du cœur d'une étoile diminue avec sa masse. Quand cette dernière est inférieure à 6 pour cent de celle du Soleil, aucune réaction thermonucléaire ne se déclenche. Celle des naines brunes ne dépasse pas 7,5 pour cent de la masse solaire et leur évolution se résume à un lent refroidissement. Les caractéristiques spectrales de ces astres froids expliquent qu'ils sont si difficiles à détecter. D'autres naines brunes se cachent probablement dans le voisinage solaire. Si l'on parvenait à évaluer leur nombre à l'échelle de la Galaxie, on aurait sans doute découvert l'une des clés du mystère de la masse manquante, cette fraction notable de la masse de l'Univers, manifestement présente, mais invisible.

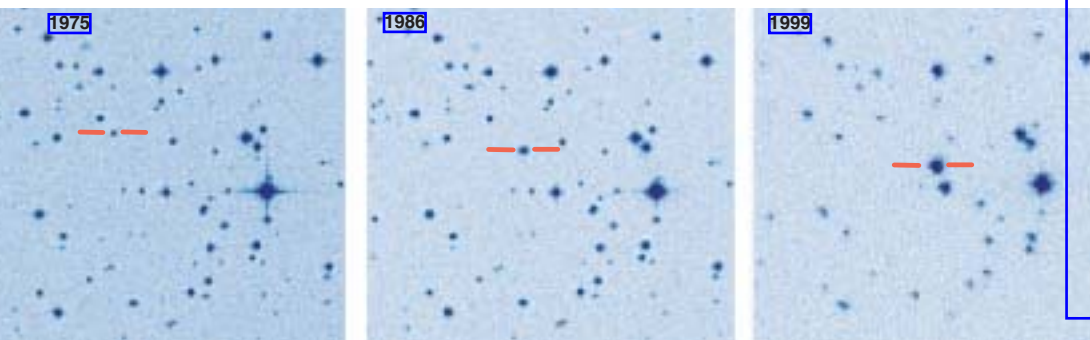
DENIS-P J1048-39, l'astre que nous avons découvert, est à la transition entre une étoile et une naine brune. Après que notre confrère espagnol Eduardo Martin a pointé le plus grand télescope du monde (Keck I) sur DENIS-P J1048-39, il est apparu que son atmosphère ne contenait pas de lithium. Si cet élément manque dans l'atmosphère, c'est qu'il a été entièrement consommé. La masse DENIS-P J1048-39 excède donc six pour cent de celle du Soleil, sinon, aucune réaction thermonucléaire n'aurait pu consommer le lithium. Grâce à une mesure spectroscopique, nous avons établi que la température du rayonnement de DENIS-

P J1048-39 est voisine de 2 200 °C. Seul un astre dont la masse n'excède pas neuf pour cent de celle du Soleil peut avoir une telle température. Pour savoir avec certitude si DENIS-P J1048-39 est bien une naine brune, c'est-à-dire si sa masse est inférieure à 7,5 pour cent de la masse solaire, il faudrait pouvoir la comparer à un astre similaire, mais dont la masse est bien connue. Les astrophysiciens espèrent en trouver un au sein d'un système binaire, car les masses des compagnons qui les composent se déduisent de l'observation de leurs orbites. Quelle que soit la nature de DENIS-P J1048-39, elle est en tout cas la seule de son espèce aussi proche de la Terre, ce qui la rend précieuse dans l'étude des phénomènes qui se produisent dans l'atmosphère des objets à la transition entre étoile et naine brune, notamment la formation de grains solides et d'aérosols liquides, voire l'apparition de phénomènes météorologiques.

Nous avons réalisé, après l'avoir découverte, qu'elle avait déjà été photographiée, mais jamais identifiée. Jean Guibert et Françoise Crifo de l'Observatoire de Paris ont retrouvé sa trace sur des plaques photographiques qui avaient plus de 30 ans. Ils ont ainsi pu montrer qu'entre 1975 et 1999 DENIS-P J1048-39 a parcouru un chemin considérable dans le ciel, ce qui n'est possible que s'il s'agit d'un objet proche. Nous avons comparé sa luminosité avec celle d'astres de même nature, d'éloignement connu, et nous avons conclu que DENIS-P J1048-39 se trouve à seulement 13 années-lumière du Soleil : elle fait partie des 40 premières étoiles groupées autour du Soleil.

Depuis quelques années, les astronomes tentent de compléter le catalogue des étoiles. Le nouvel astre doit son nom au programme européen *Deep Near Infrared Sky Survey (Relevé du ciel dans le proche infrarouge)* ou DENIS, qui a permis sa découverte. L'objectif de ce programme est la cartographie des quelque 100 millions d'étoiles et 250 000 galaxies visibles. À la fin de l'année 2000, près de 90 pour cent du ciel austral avait été cartographié grâce à un télescope de un mètre de diamètre installé à l'Observatoire de la Silla au Chili, et à des caméras sensibles au rayonnement infrarouge, précisément celui qu'émettent surtout les naines brunes et les étoiles de faible masse.

Xavier DELFOSSE, Laboratoire d'astrophysique de Grenoble,
Thierry FORVILLE,
Télescope CFH, Hawaï



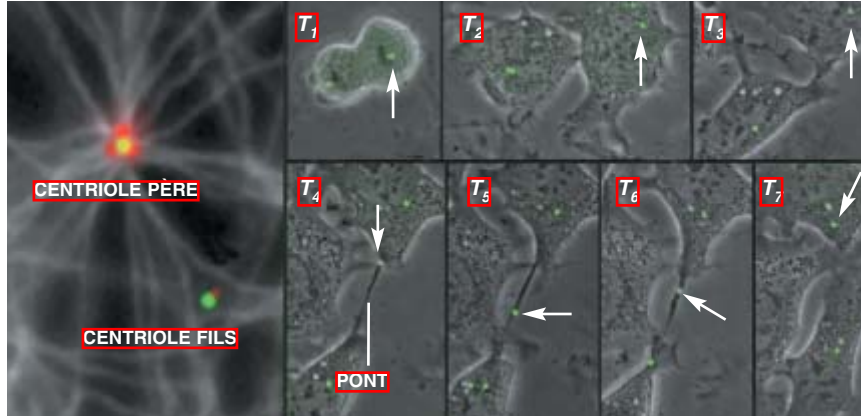
L'astre DENIS-P J1048-39 (entre les traits rouges) a été photographié en 1975, 1986 et 1999 : on constate qu'il a parcouru un chemin considérable dans le ciel par rapport aux étoiles fixes. Il s'agit d'un objet proche : on a calculé qu'il est éloigné de 13 années-lumière du Soleil.

Un agent de division

Le centrosome, un organe normalement situé au centre de la cellule, se déplace, lors de l'ultime étape de la division cellulaire, pour donner son feu vert à la séparation des cellules.

La vie repose sur un mécanisme essentiel : la division cellulaire. Durant cette division, le matériel génétique, et tous les constituants cellulaires, doivent être reproduits. Toute une série de contrôles interviennent à des étapes cruciales du cycle de division : le cycle peut être interrompu pour que d'éventuelles erreurs (dans la répllication de l'ADN, par exemple) soient corrigées. Quand l'erreur n'est pas réparable, la mort des cellules peut même être déclenchée pour assurer la survie de l'organisme. En «filmant» des cellules en cours de division observées au microscope, nous avons découvert que l'ultime étape de la division des cellules de mammifères est contrôlée par un des organites intracellulaires, le centrosome, qui, après avoir «constaté» que tout se déroule correctement, se déplace de sa position centrale vers la périphérie où il «autorise» la poursuite de la division.

Le centrosome, une structure constituée de protéines, est situé au centre de la cellule, où il a un rôle d'«organisateur». De lui rayonnent, vers la périphérie cellulaire, des polymères de protéines, les microtubules, qui constituent un squelette dynamique, une ossature



Le centrosome d'une cellule en cours de division, d'où rayonnent les microtubules (à gauche), se déplace vers le pont qui relie les cellules en cours de division, puis retourne vers sa position centrale (ce centrosome est repéré par les flèches blanches).

souple. Pendant le cycle de division cellulaire, le centrosome, qui renferme deux petites unités protéiques, les centrioles, se reproduit par duplication de chacune de ces sous-unités. Les deux centrosomes ainsi formés, qui contiennent toujours un ancien centrosome (père) et un nouveau centrosome (fils), se placent de part et d'autre du noyau ; chacun sera le centrosome de l'une des deux cellules produites lors de la division.

À l'aide d'un microscope équipé d'une vidéo-caméra numérique, nous avons étudié le mouvement des centrosomes pendant la division cellulaire. Pour cela, nous avons introduit dans le génome des cellules étudiées un gène codant une protéine des centrioles couplée à une petite protéine fluorescente ; ainsi, nous pouvons suivre les centrioles, qui sont les seuls constituants cellulaires fluorescents, dans les cellules vivantes. Lorsque la cellule se divise, elle se contracte en son milieu et forme un étranglement, dont on croyait qu'il se resserrait jusqu'à la séparation complète des deux nouvelles cellules. Nous avons observé que l'étranglement aboutit en fait à la formation d'un «pont» stable entre les deux cellules filles, qui peut persister plusieurs heures, et ne se rompt qu'après un curieux manège du centrosome : une fois l'étranglement formé, les centrosomes de chaque centrosome s'éloignent l'un de l'autre. Le centrosome père, d'où rayonnent les microtubules qui maintiennent la forme de la cellule, est moins mobile que le fils et garde une position centrale. Pourtant, le centrosome père de l'un ou des deux centrosomes quitte soudain son poste central (toujours lié aux microtubules qui se déplacent avec lui) et avance rapidement vers le pont étroit qui relie les deux cellules naissantes, y reste quelques minutes et reprend sa position centrale. Alors seulement les cellules se séparent. Par ailleurs, la plupart des cellules privées de centrosome, ou dont le centrosome père n'a pas la possibilité d'effectuer cette courte excursion, n'achèvent pas leur division.

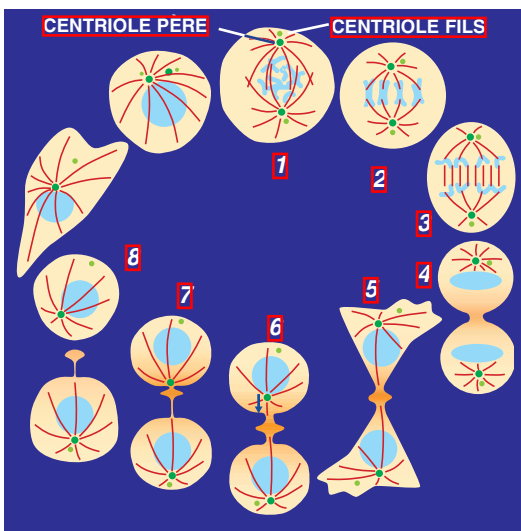
Pourquoi le «centre organisateur» des microtubules de la cellule doit-il lui-

même se déplacer? La question est ouverte. Le centrosome, au cœur du réseau de microtubules, est l'organite le mieux placé pour recevoir et centraliser toutes les informations spatiales et environnementales de la cellule. Lors de la division cellulaire, il pourrait rassembler et analyser les informations sur le déroulement des étapes de division et, lorsque tout s'est bien passé, déclencher la fission cellulaire.

D'autres biologistes ont observé que les cellules privées de centrosome non seulement n'achèvent pas leur division, mais qu'elles ne reprennent pas leur cycle cellulaire : l'absence de centrosome pendant cette étape ultime est un signal suffisant pour interdire une nouvelle duplication des cellules. Ainsi, le centrosome participerait aussi au contrôle de la prolifération, de la différenciation, voire de la migration des cellules, en traitant des informations provenant de l'intérieur comme de l'extérieur de la cellule et en émettant à son tour des signaux. Dans un tissu, chaque cellule fait partie d'une «communauté» cellulaire, où les signaux périphériques émis par les voisins doivent être analysés en permanence, et pris en compte ; il pourrait être essentiel que les informations soient centralisées pour que le comportement de chaque cellule soit asservi à celui de ses voisins.

Les différentes étapes de la division cellulaire sont autant de cibles potentielles pour empêcher la prolifération tumorale des cellules défectueuses. Les mécanismes de surveillance de l'ultime étape de la division cellulaire semblent participer au contrôle de la prolifération cellulaire : les cellules normales, en cas d'échec de cette dernière étape, n'ont plus l'«autorisation» de se diviser. En revanche, si cette interdiction est levée, les cellules peuvent se reproduire sans contrôle, et chaque nouvelle division engendre des cellules de plus en plus anormales. Le centrosome pourrait être une des cibles des futurs médicaments contre le cancer.

Matthieu PIEL et Michel BORNENS, CNRS-UMR 144, Institut Curie



Au cours de la division cellulaire, les constituants sont dupliqués (1 à 4). Pour que les cellules se séparent, le centrosome père doit s'être déplacé vers le pont qui les relie et avoir donné son autorisation (5 à 8).

Énergie et douleur

La molécule qui fournit leur énergie aux cellules est aussi un messager de la douleur.

L'ATP (l'adénosine triphosphate) est la principale ressource énergétique des cellules. Toutefois, cette molécule joue aussi un rôle à l'extérieur de la cellule. John Wood, de l'Université de Londres, et Debra Cockayne, des Laboratoires Roche, ont précisé le rôle de cette molécule dans le circuit de la douleur. Les premiers indices du rôle de l'ATP dans la douleur sont apparus vers le milieu des années 1970. Au cours d'une expérience, des biologistes ont appliqué des compresses imbibées d'un extrait cellulaire riche en ATP sur la peau saine de volontaires. Ces derniers ont alors eu la sensation que la compresse recouvrait une blessure.

Une molécule n'agit sur une cellule qu'à condition d'être reconnue par un récepteur qui lui est spécifique et qui est présent sur la membrane cellulaire. Quel est le récepteur spécifique de l'ATP?

Identifié en 1995, c'est le troisième membre de la famille des récepteurs P_2X : il fut nommé P_2X_3 . On a ensuite montré que seules les cellules nerveuses qui participent au circuit de la douleur portent le récepteur P_2X_3 . Cette molécule forme l'extrémité d'un canal membranaire qui s'ouvre quand une molécule d'ATP s'y lie. Lorsque l'ouverture a lieu, la répartition des charges électriques de part et d'autre de la membrane change, ce qui engendre un signal électrique propagé jusqu'au cerveau.

J. Wood et D. Cockayne ont étudié des souris génétiquement modifiées, qui sont dépourvues de récepteurs P_2X_3 . Ces souris sont peu sensibles aux blessures, mais restent sensibles aux autres types de douleurs, par exemple aux brûlures ou encore aux chocs électriques. On évalue la douleur ressentie par les animaux en mesurant le nombre de fois où ils lèchent une patte douloureuse. Qu'elles aient ou non des récepteurs P_2X_3 , les souris réagissent avec la même intensité à un stimulus douloureux qui n'est pas dû à une blessure.

Les biologistes ont aussi mis en évidence que l'ATP joue un rôle dans la miction. Les souris dépourvues du récepteur P_2X_3 urinent moins souvent que les



Pour soulager une patte douloureuse, une souris ou un chat la lèche.

autres. L'ATP semble jouer un rôle lorsque la pression augmente dans la vessie : lorsque la couche de cellules qui recouvre la paroi interne de la vessie est distendue par la pression, elle libérerait de l'ATP. Cette émission serait perçue par les récepteurs de terminaisons nerveuses en contact avec la vessie comme une envie d'uriner. Ils ont aussi constaté que les souris dépourvues de récepteurs P_2X_3 ne perçoivent pas la chaleur et l'on s'interroge : l'ATP participe-t-il aussi à la perception de la chaleur par la peau?

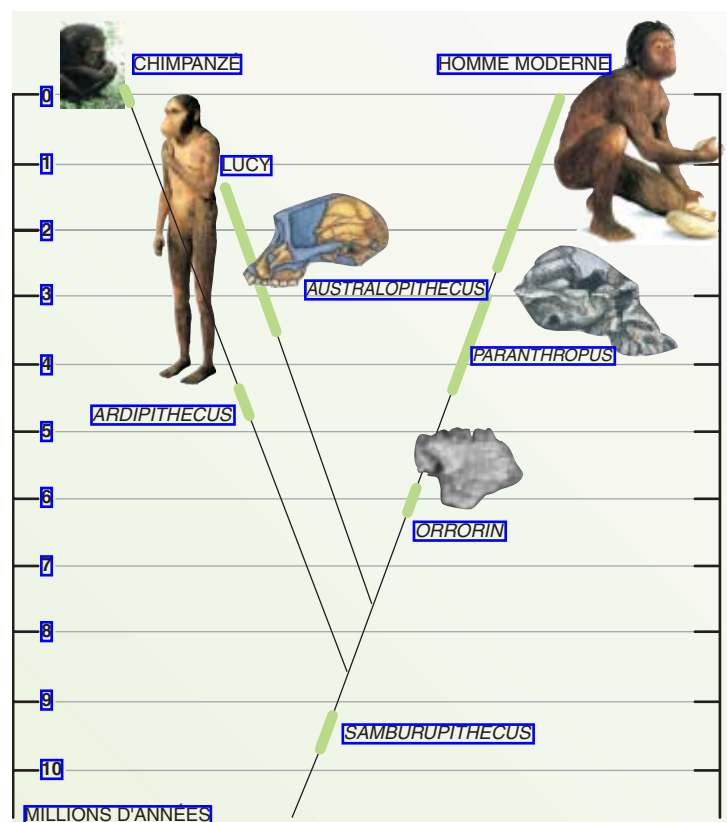
Une molécule qui agirait en bloquant les récepteurs P_2X_3 sera-t-elle une nouvelle substance contre la douleur? C'est peu probable, car l'ATP étant une molécule omniprésente, son inhibition aurait sans doute des conséquences graves sur le fonctionnement de l'organisme.

Vieux de six millions d'années

Notre ancêtre *Orrorin tugenensis* grimpait aux arbres, mais marchait déjà sur ses deux pieds.

À l'automne dernier, des restes d'hominidé ont été découverts au pied des collines Tugen, dans la Vallée du Rift, au Kenya. Ils datent de six millions d'années environ, ce qui fait de cet hominidé le plus ancien découvert à ce jour. Ce titre était jusqu'ici détenu par *Ardipithecus ramidus*, qui vivait en Éthiopie il y a environ quatre millions d'années, quelques centaines de milliers d'années avant les australopithèques. L'expédition, composée de paléontologues du Collège de France et d'une organisation non gouvernementale de promotion du patrimoine culturel kenyan, nommée *Community Museum of Kenya*, a récolté 13 ossements d'*Orrorin tugenensis* (l'homme «originel» des monts Tugen) sur quatre sites. Ils ont révélé que cet hominidé était plus «humain» qu'*Ardipithecus ramidus*, et moins «simiesque» que *Samburupithecus*, le grand singe le plus évolué découvert à ce jour parmi nos ancêtres. La divergence entre la lignée de l'homme et celle des autres hominidés serait plus ancienne que prévu, de même que l'apparition de la bipédie.

Martin Pickford, du Collège de France, avait étudié la géologie de la région des monts Tugen dans les années 1970 : des couches sédimentaires alternent avec des couches de lave. En 1974, il y avait trouvé une molaire inférieure, dans une couche de sédiments située entre une couche de lave volcanique de 6,2 millions d'années et une couche de lave basaltique de 5,6 millions d'années. L'origine de la dent était restée inconnue, parce qu'elle avait été érodée par un fleuve qui avait coulé à cet



Dans le nouvel arbre généalogique, revu après la découverte d'*Orrorin tugenensis*, les australopithèques ne seraient pas nos ancêtres. Ils auraient divergé de notre lignée il y a sept à huit millions d'années.

endroit. C'est entre ces deux mêmes couches de lave que les paléontologues ont retrouvé les restes de l'homme originel. Les plus anciens datent de 6,2 millions d'années.

Les ossements retrouvés appartiennent à au moins cinq individus dont un enfant, puisqu'on a retrouvé une dent de lait. Les paléontologues disposent de trois fémurs, de deux fragments de mandibule, d'un humérus et d'une poignée de dents. Ils estiment que l'homme originel mesurait 1,40 mètre et pesait 50 kilogrammes environ. Les dents sont petites et leur émail est épais, ce qui indique qu'il mangeait probablement des fruits à écorce dure ou même de la viande à l'occasion. Les dents des grands singes sont petites et leur émail est mince, tandis que les dents des australopithèques sont massives et l'émail est épais. Celles de l'homme originel sont à mi-chemin, plus primitives que celles des australopithèques. La dernière molaire est égale-

ment de petite taille, ce qui montre qu'il ne disposait de peu de place.

On déduit de la forme recourbée des phalanges et de la forme de l'humérus qu'il grimpait encore aux arbres. Toutefois, d'après la forme de la tête sphérique du fémur et des insertions des muscles fessiers, l'homme originel était bipède lorsqu'il se déplaçait sur le sol. Rappelons que ce critère est celui qui définit généralement la famille des hominidés. L'étude comparée des os montre que l'homme originel marchait mieux que les australopithèques, ce qui fait reculer d'au moins un million d'années l'apparition de la bipédie.

Les paléontologues ont également retrouvé des milliers de fossiles d'une faune riche et diversifiée : antilopes, gazelles, singes, éléphants, rhinocéros, girafes, crocodiles... Plusieurs ossements d'*Ororin tugenensis* portent d'ailleurs des traces de crocs, ce qui laisse supposer qu'il était la proie des car-

nassiers. Son aptitude à grimper dans les arbres devait le mettre à l'abri des grands prédateurs, tandis que la bipédie lui permettait de se déplacer plus aisément à terre.

A cause de ses caractéristiques anatomiques, l'homme originel a été classé dans un nouveau genre, autour duquel les paléontologues ont esquissé un nouvel arbre généalogique : dans le schéma classique, les australopithèques sont nos ancêtres directs, tandis que dans le nouveau schéma, proposé par Brigitte Senut, du Muséum national d'histoire naturelle, ils appartiennent à une branche morte et l'homme originel se trouve en amont des *Homo* qui ont précédé l'arrivée de l'homme moderne *Homo sapiens sapiens*. Leur lignée aurait divergé de celle des grands singes africains il y a sept à huit millions d'années à partir d'un ancêtre commun. Cette découverte relance la course au plus vieil ancêtre de l'homme.

La dyslexie universelle

Malgré les disparités des symptômes, ce trouble a des origines physiologiques identiques, indépendantes de la langue maternelle.

Une lecture lente et entachée d'erreurs est l'un des symptômes les plus fréquents de la dyslexie. En France, les troubles de l'apprentissage du langage écrit touchent environ un million d'enfants. Toutefois, la proportion des enfants atteints varie d'un pays à l'autre : par exemple, la proportion de dyslexiques aux États-Unis est deux fois supérieure à la moyenne en Italie. Pourtant, l'équipe de Jean-François Démonet, de l'unité INSERM U455, à Toulouse, en coopération avec des équipes anglaises et italiennes, a montré que les lésions cérébrales associées à ce trouble sont universelles : celles d'un Italien sont identiques à celles d'un Français ou d'un Anglais.

Jusque dans les années 1990, la dyslexie était interprétée comme la conséquence de difficultés psychologiques au sein de la famille et/ou avec les enseignants. Puis, avec l'avènement des techniques d'imagerie fonctionnelle, les neurologues ont pu étudier la dimension biologique de la dyslexie. Ainsi, les différentes équipes ont demandé à des étudiants italiens, français et britanniques de lire des mots pendant que l'activité de leur cerveau était enregistrée

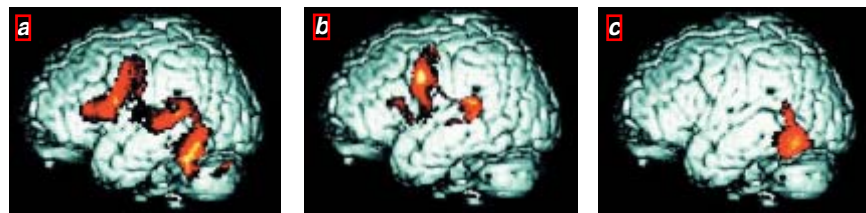
par tomographie par émission de positons. Chez tous les sujets dyslexiques, une zone du lobe temporal gauche est moins active que celle des sujets non dyslexiques étudiés comme témoins.

Cette zone est cruciale pour la lecture : elle constitue l'interface où l'information sur la forme des lettres lues est transformée en une information phonologique, un son qui peut ensuite être articulé à haute voix. En d'autres termes, le codage visuel est transformé en un codage auditif : ce mécanisme, automatisé chez les bons lecteurs, est déficient et laborieux chez les dyslexiques. Cette lésion résulterait d'une perturbation de la migration des neurones lors de la formation du cerveau : certains neurones de la zone incriminée dépasseraient leur lieu de « destination » normale jusqu'à atteindre la couche la plus superficielle, dite moléculaire, du cortex.

Quelle est alors l'origine des disparités observées selon les pays ? Elle dépend de la difficulté de la langue. Le français et l'anglais sont des langues dites opaques, car un même son peut être représenté par un grand nombre de

combinaisons de lettres. Par exemple, dans les mots *crapaud*, *seau* et *sabot*, le son *o* a trois orthographes différentes. En anglais, 1120 combinaisons de lettres, nommées graphèmes, représentent 40 sons, ou phonèmes ; en français, 190 graphèmes représentent 35 phonèmes. La complexité de ces deux langues oblige les individus à disposer, dans leur mémoire à long terme, d'un dictionnaire de mots (le lexique) qui s'enrichit à mesure de l'apprentissage.

À l'inverse, l'italien, comme l'espagnol, est une langue transparente : il y a environ autant de graphèmes que de phonèmes. Ainsi, on écrit sans ambiguïté un mot entendu : l'italien s'écrit comme il se prononce. Il en résulte qu'en Italie la dyslexie ne se manifeste que par un ralentissement de la lecture, tandis qu'en France et dans les pays anglophones s'y ajoutent des déformations des mots lus. La dyslexie, un dysfonctionnement du codage automatique des graphèmes en phonèmes, est d'autant plus prononcée que la langue est complexe, et que le nombre de graphismes pour représenter un son est grand.



L'activité cérébrale de sujets normaux (a) et de sujets dyslexiques (b) a été enregistrée pendant la lecture. La différence entre les deux cartes (c) montre que la zone responsable du codage de l'information graphique (les lettres) en information phonologique (les sons), située dans la partie inférieure du lobe temporal gauche, est sous-activée chez les dyslexiques.

L'effet papillon n'existe plus!

RAOUL ROBERT

Les prévisions météorologiques seraient impossibles au-delà de deux semaines, à cause de l'«effet papillon». Ce dogme est démenti par la mécanique statistique.

La sérénité de l'Olympe étant réservée aux dieux, les humains tentent depuis longtemps de deviner quel morceau du ciel risque de leur tomber sur la tête. En deux millénaires, les systèmes de prévision sont passés de la consultation des oracles, fondés sur le sacrifice animal, voire humain, aux modèles théoriques et aux calculs numériques.

La mécanique céleste était au centre des préoccupations scientifiques du XIX^e siècle, et la prévision météorologique prend son essor au XX^e siècle. Elle se heurte à des difficultés sérieuses, liées à la modélisation des phénomènes atmosphériques, ainsi qu'au traitement des équations obtenues, qui sont complexes. Face à ces obstacles, l'optimisme qui régnait dans les années 1950 se mue au cours des années 1960 en un pessimisme excessif, qui tient en un seul nom, charmant au demeurant : l'effet papillon.

Le déterminisme laplacien

Dans la longue histoire de la prévision, qu'elle traite du temps ou des mouvements célestes, un moment crucial est la découverte par Issac Newton au XVII^e siècle des équations qui régissent le mouvement des planètes : connaissant la position et la vitesse des planètes à un instant donné, on détermine les points de leur trajectoire à tout instant ultérieur. Comme tous les systèmes mécaniques obéissent à des équations du même type, l'état ini-

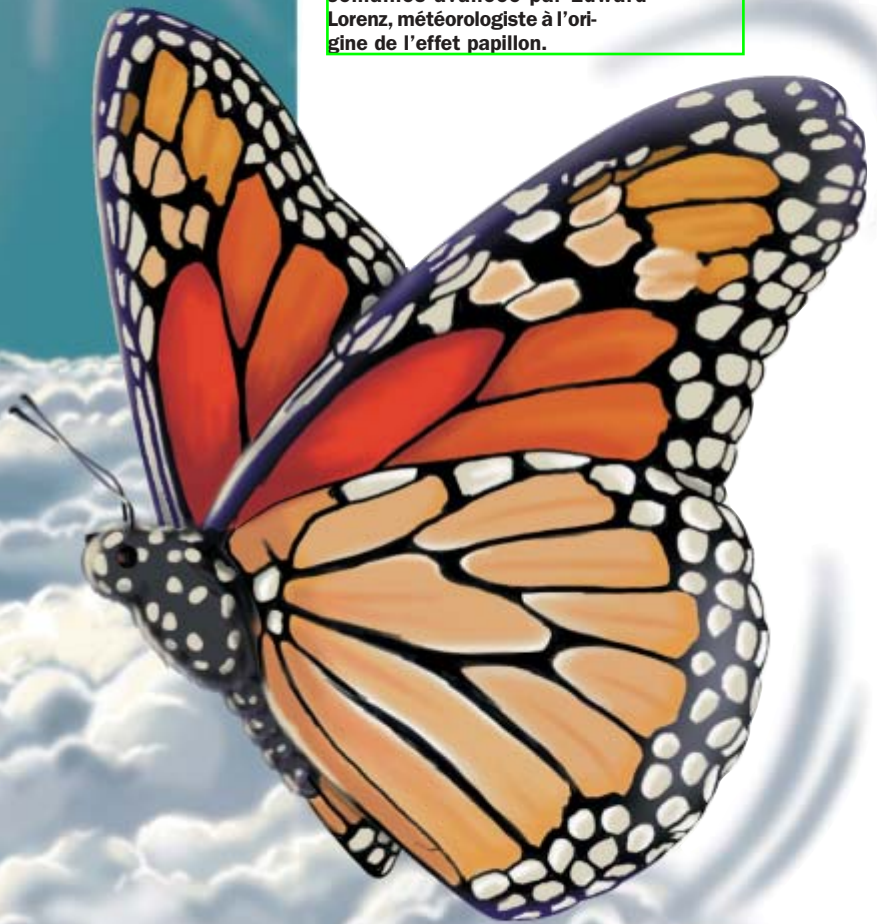
tial d'un système détermine complètement son avenir. Cette idée est popularisée par Laplace, au point de devenir une idéologie : le déterminisme laplacien, selon lequel rien de neuf ne peut advenir qui ne soit déjà contenu dans les conditions initiales. Le problème de la prévision semble dès lors résolu, du moins en théorie.

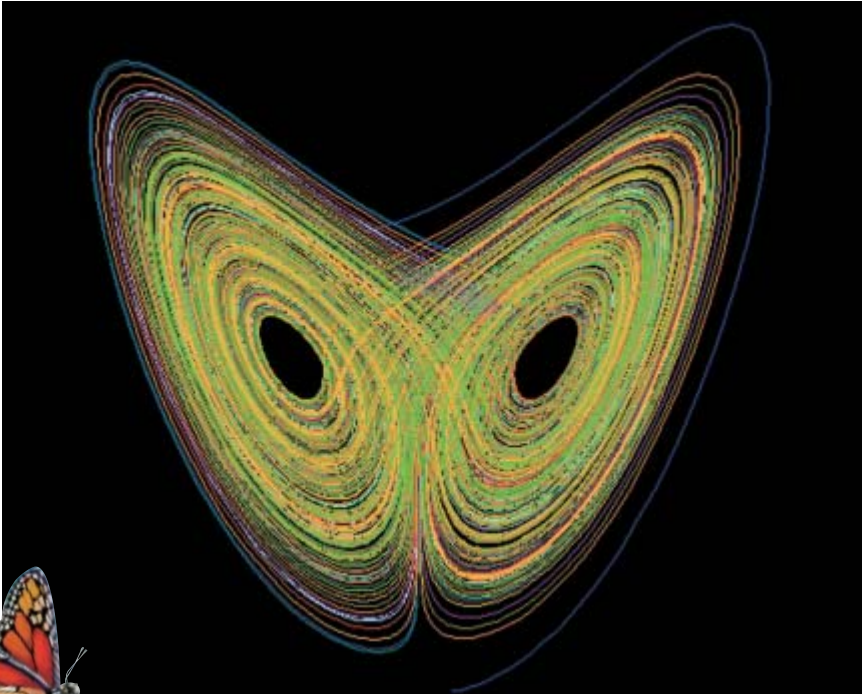
Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, le déterminisme laplacien est mis à mal quand des mathématiciens entreprennent de calculer les trajectoires des astres. Henri Poincaré, puis Jacques Hadamard découvrent que des systèmes pourtant simples, comme celui constitué de trois corps qui s'attirent par gravitation, donnent lieu à des trajectoires très compliquées et que, pour beaucoup de systèmes, la moindre variation des positions ou des vitesses initiales engendre des écarts de trajectoire considérables. Comme on ne connaît jamais l'état initial avec une exactitude parfaite, on ne peut déterminer l'évolution d'un tel système au-delà d'un certain temps. Ces travaux sont les prémices de la théorie du chaos, qui se développe à partir des années 1970 et étudie l'évolution de l'incertitude sur l'état initial. À partir des années 1980, les astronomes montrent qu'il est impossible de connaître l'état du système solaire au-delà de quelque 100 millions d'années. Au-delà de cet horizon, il faudrait tenir compte, dans les calculs, de la forme des astres, des effets des marées, et d'une multitude d'autres paramètres...

Cette découverte est fatale au déterminisme laplacien.

Revenons à la météorologie : dans les années 1950, la prévision météorologique « moderne », entreprise scientifique ambitieuse, commence à se mettre en place. Elle associe la physique de la modélisation de l'atmosphère, les mathématiques, le calcul numérique et l'informatique. Au début des années 1960, les premiers ordinateurs performants apparaissent et permettent des calculs auparavant inaccessibles. Le météorologiste américain Edward Lorenz commence alors à étudier un modèle simplifié de la convection atmosphérique, fondé sur des équations classiques de la convection dans les fluides. Son modèle contient trois degrés de liberté, c'est-à-dire trois inconnues, et se résume à trois équations différentielles à trois variables. En essayant de prévoir l'évolution de son modèle sur

1. LE BATTEMENT D'UNE AILE DE PAPILLON ne déclenche pas de tempête, contrairement à une idée très répandue. Des effets statistiques entrent en jeu dans l'atmosphère : la turbulence s'organise et la sensibilité aux conditions initiales disparaît. Par conséquent, on peut espérer prédire le temps qu'il fera au-delà de la limite fatidique de deux semaines avancée par Edward Lorenz, météorologiste à l'origine de l'effet papillon.





2. L'ATTRACTEUR DE LORENZ décrit l'évolution d'un système sensible aux conditions initiales. L'état du système est représenté par un point dans l'espace. Deux points initialement voisins ont des trajectoires qui se séparent rapidement et ont des comportements différents. D'un point de vue physique, une petite erreur sur la mesure de l'état initial engendre une incertitude importante sur la connaissance de l'état ultérieur.

un temps long, il constate qu'il est impossible de la calculer avec précision, car la moindre perturbation initiale du système a un effet considérable à long terme et aboutit à une incertitude sur son état futur, qui croît de façon exponentielle avec le temps. En outre, en représentant l'état du système par un point mobile dans l'espace, il observe que ce point décrit au cours du temps une courbe qui semble s'enrouler autour d'un objet de structure complexe, qualifié d'«attracteur étrange» et aujourd'hui nommé «attracteur de Lorenz» (voir la figure 2).

E. Lorenz s'attaque ensuite au problème de la circulation atmosphérique à grande échelle. Vue de loin, l'atmosphère apparaît comme une mince pellicule de gaz entourant la sphère terrestre. E. Lorenz considère, en première approximation, qu'il s'agit d'un fluide parfait, c'est-à-dire sans viscosité (à grande échelle, la viscosité moléculaire du gaz joue en effet un rôle négligeable), et à deux dimensions. Il n'utilise qu'un petit nombre de degrés de liberté (quelques dizaines), afin de simplifier les calculs. À nouveau, E. Lorenz retrouve le phénomène de sensibilité exponentielle par rapport aux conditions initiales : la taille d'une perturbation double à chaque fois que le temps augmente d'une valeur donnée. Il pense alors que, si l'avenir est aussi difficile à prédire avec un petit nombre de degrés de liberté, la situa-

tion ne peut qu'empirer avec un modèle plus réaliste de l'atmosphère, qui comporterait un très grand nombre de degrés de liberté (la pression atmosphérique, les composantes de la vitesse du vent, le taux d'humidité, etc., sont autant d'inconnues à définir en tout point de la Terre).

L'effet papillon sort de son cocon

Avec ces travaux, E. Lorenz retrouve des constatations déjà établies par Poincaré et Hadamard, c'est-à-dire qu'on ne peut pas toujours calculer l'évolution d'un système simple. Sa contribution est d'avoir montré que l'imprédictibilité ne concerne pas seulement la mécanique céleste, mais aussi les écoulements atmosphériques.

Un contradicteur, dont on ignore l'identité, fait alors remarquer à E. Lorenz que, si le mouvement de l'atmosphère est aussi instable qu'il le prétend, il suffirait du battement de l'aile d'une mouette pour changer irrémédiablement son évolution. E. Lorenz soutient que c'est en effet le cas et calcule que ce changement se produirait en deux semaines environ. De cette polémique, la mouette se transformant en papillon, naît l'«effet papillon» : un événement, tel le battement des ailes d'un papillon en un point de la Terre, est une perturbation suffisante pour déclencher, deux semaines plus tard, une tornade

en un point éloigné. Évidemment, comme on ne peut connaître l'état de tous les papillons à un instant donné, la prévision de l'état de l'atmosphère au-delà de quinze jours est impossible.

À la même époque, le mathématicien Vladimir Arnold, de l'Institut de mathématiques Steklov, à Moscou, développant des idées de son maître, Andreï Kolmogorov, établit un lien entre l'hydrodynamique d'un fluide parfait et les surfaces à courbure négative d'Hadamard. Ces surfaces à courbure négative présentent, en tout point, un profil en forme de selle de cheval. Considérons une petite bille qui glisse sans frottement sur une telle surface. À partir d'un point quelconque où on la dépose, la bille, lancée avec une certaine vitesse initiale, décrit une trajectoire bien définie. L'ensemble des trajectoires que l'on obtient en modifiant la position de départ et la vitesse initiale est nommé «flot géodésique». Hadamard a montré que le mouvement d'une bille sur une surface à courbure négative est exponentiellement instable : quand on déplace légèrement son point de départ ou que l'on modifie un tant soit peu sa vitesse initiale, la nouvelle trajectoire s'écarte très rapidement de l'ancienne (la bille peut glisser d'un côté ou de l'autre de la selle par exemple). En pratique, on ne peut pas calculer la trajectoire de la bille au-delà d'un temps court.

V. Arnold ramène le problème de l'instabilité hydrodynamique à un «simple» calcul de courbure. Son idée consiste à décrire le mouvement du fluide parfait comme celui d'un point sur une «surface» ; la surface en question est très particulière, puisqu'elle possède une infinité de dimensions (on peut néanmoins, comme sur une surface ordinaire, définir sa courbure et le flot géodésique). En d'autres termes, la vitesse du vent à chaque instant et en tout point de l'atmosphère (le champ des vitesses) est décrite par le déplacement d'une bille sur cette «surface», soit le flot géodésique. V. Arnold parvient même à calculer la courbure d'une telle «surface» et montre que les mouvements des fluides parfaits sont analogues aux flots géodésiques d'Hadamard.

La situation est évidemment plus compliquée, mais ces calculs indiquent que, le plus souvent, les trajectoires de particules fluides, voisines à l'instant

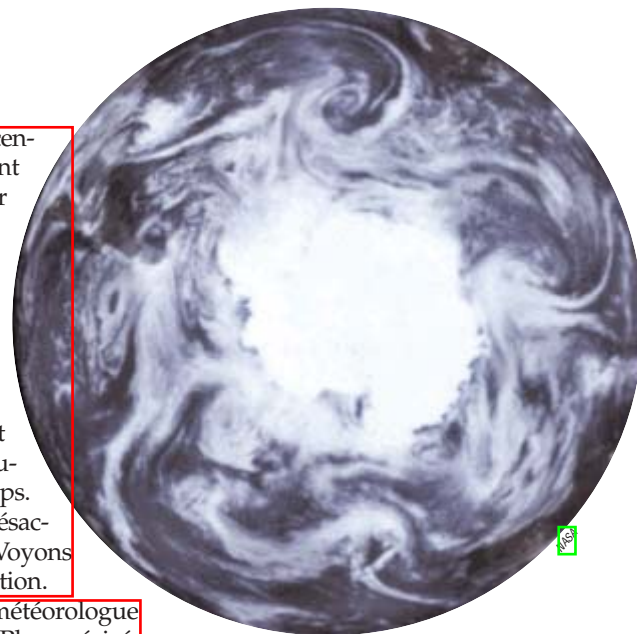
initial, s'écartent l'une de l'autre exponentiellement avec le temps.

Examinons l'état des connaissances tel qu'il se présentait à la fin des années 1960. Aux constatations de la fin du XIX^e siècle de Poincaré et d'Hadarnard sur la sensibilité des systèmes dynamiques aux conditions initiales, s'ajoutent deux résultats : les simulations numériques de E. Lorenz sur la circulation atmosphérique, qui portent sur trois, puis sur quelques dizaines de degrés de liberté, et ensuite l'étude théorique de V. Arnold d'un système doté d'un nombre infini de degrés de liberté, qui montre l'instabilité exponentielle des trajectoires des particules fluides. Ces résultats, joints aux difficultés pratiques de la prévision météorologique, font naître l'idée que les mouvements de l'atmosphère sont impossibles à prévoir, à cause de la sensibilité exponentielle aux conditions initiales : le célèbre «effet papillon» prend son envol. L'image de l'effet papillon, à la fois poétique et facile à comprendre, se répand rapidement dans le grand public et devient le nouveau paradigme qui remplace le déterminisme laplacien. Il diffuse vers d'autres disciplines (économie, sociologie...), et nous invite à repenser le monde en termes «modernes» de chaos, de complexité et d'imprédictibilité. Pourtant, à y regarder de plus près, l'effet papillon ne résiste pas à une analyse plus poussée.

L'effet papillon bat de l'aile

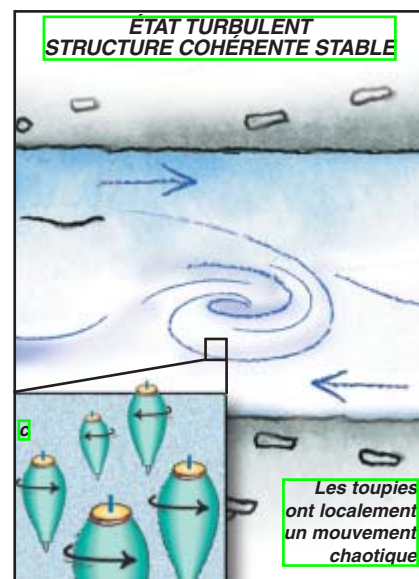
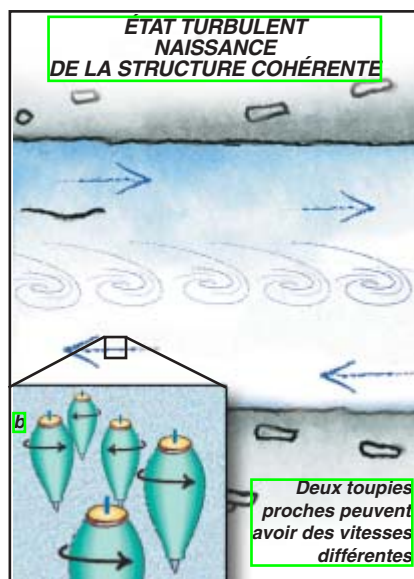
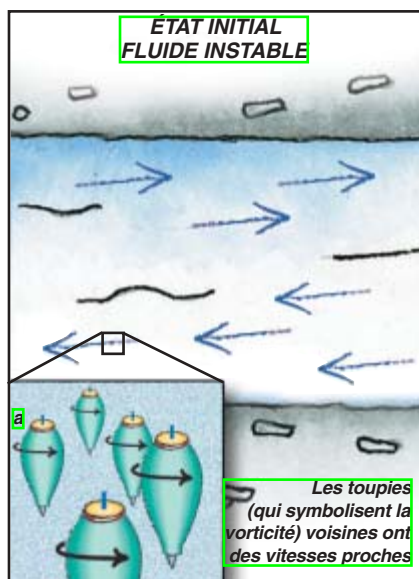
Au cours des dernières décennies, les météorologistes ont étudié comment une erreur initiale se propage dans les modèles de prévision du temps ; ils ont constaté qu'après une courte période de un à deux jours la croissance des perturbations n'est pas exponentielle, comme l'avait prédit E. Lorenz, mais plutôt proportionnelle au temps. Voilà une observation en désaccord avec l'effet papillon. Voyons d'où vient cette contradiction.

Dans sa démarche, le météorologue américain fit une erreur. Plus précisément, il se livra à une extrapolation hasardeuse qui le conduisit à des conclusions erronées. En effet, il ne tint pas compte des nouveaux phénomènes d'origine statistique susceptibles d'apparaître lorsqu'on passe d'un petit à un grand nombre de degrés de liberté. C'est le fondement de la mécanique statistique, que découvrit Boltzmann à la fin du XIX^e siècle. Prenons un exemple bien connu : considérons quatre ou cinq molécules de gaz enfermées dans une boîte. Elles interagissent entre elles et avec les parois de la boîte qui les contient. Pour décrire le comportement



3. DE GRANDS TOURBILLONS entourent le pôle Sud. Anticyclones ou dépressions, ces tourbillons, nommés structures cohérentes, naissent de l'organisation de la turbulence atmosphérique.

de ce petit système à long terme, on se heurte à la même difficulté de calcul que celle que rencontra Lorenz : on ne peut pas prévoir les trajectoires des molécules. En revanche, considérons maintenant le système formé par toutes les molécules de gaz présentes dans une pièce. Évidemment, si l'on voulait décrire avec précision le mouvement de toutes les molécules, la tâche serait insur-



4. DANS UN FLUIDE PARFAIT INCOMPRESSIBLE A DEUX DIMENSIONS (l'atmosphère par exemple), l'écoulement est décrit par la vorticité : à chaque point est associée une minuscule «toupie» qui est emportée par le flot, tout en conservant sa vitesse de rotation. Dans l'état initial (à gauche), deux points voisins ont des vorticités proches (les toupies associées tournent à peu près à la même vitesse (a)). Comme deux courants se croisent, l'état est

instable et l'écoulement devient turbulent (au centre) ; deux points proches ont parfois des vorticités très différentes (b). À l'échelle microscopique, on ne peut prévoir la vorticité de tous les points. Pourtant, l'ordre émerge de ce chaos et, à l'échelle macroscopique, l'écoulement fluide s'organise en structures cohérentes (à droite, un tourbillon simple). L'ordre semble régner alors que le chaos subsiste à petite échelle (c).

montable. En revanche, si l'on s'intéresse seulement à des valeurs moyennes, comme la densité, la pression, la température, on s'aperçoit que ces quantités de nature statistique sont prévisibles à long terme : on peut, par exemple, prédire avec un risque d'erreur minime que la densité va rester uniforme et constante dans toute la pièce. La cause apparaît dans le scénario imaginé par Boltzmann : si le système est suffisamment chaotique, les molécules ont tendance à occuper tout l'espace disponible. Autrement dit, même si l'on plaçait initialement toutes les molécules dans un coin de la pièce, elles ne resteraient pas confinées, à cause de leurs mouvements erratiques. On parle d'«observables macroscopiques» pour désigner ces moyennes statistiques, telle la pression, par opposition aux trajectoires individuelles des molécules, qui sont des «observables microscopiques». Résumons la leçon de Boltzmann : avec un grand nombre de degrés de liberté, bien que le système ne soit pas microscopiquement prévisible, les observables macroscopiques le sont. Avant d'aller plus loin, faisons une incursion dans le domaine de la turbulence, puisque l'atmosphère est un fluide turbulent.

Turbulence et structures cohérentes

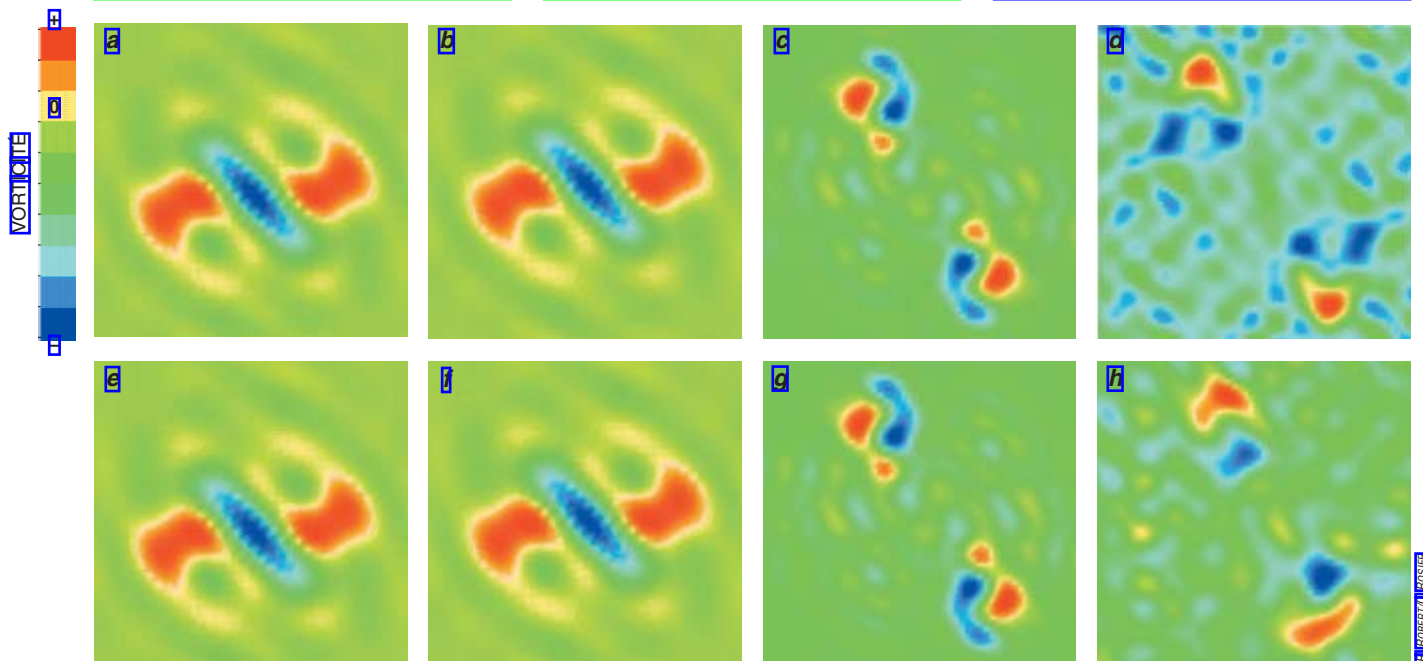
La turbulence, mouvement complexe et désordonné d'un fluide, apparaît dans presque tous les écoulements, sauf lorsque le frottement visqueux domine (le frottement des molécules les unes sur les autres). Dans ce cas, l'écoulement prend un aspect plus ordonné, et on dit qu'il est laminaire. En pratique, les écoulements que l'on observe à l'échelle humaine (les rivières, les courants d'air...) sont turbulents, de même que l'écoulement atmosphérique ou océanique.

Nous nous intéressons à la classe particulière d'écoulements turbulents à deux dimensions, c'est-à-dire qui ont lieu dans un plan ou sur une surface. Cela n'est pas une vue de l'esprit, mais une approximation justifiée pour un fluide contenu dans un récipient en rotation rapide, ou pour un fluide confiné dans une couche de faible épaisseur. Les mouvements de l'atmosphère et des océans sont considérés comme des écoulements bidimensionnels, car l'épaisseur des fluides est négligeable par rapport à leur étendue.

Nous faisons aussi l'hypothèse que l'écoulement de l'atmosphère est incom-

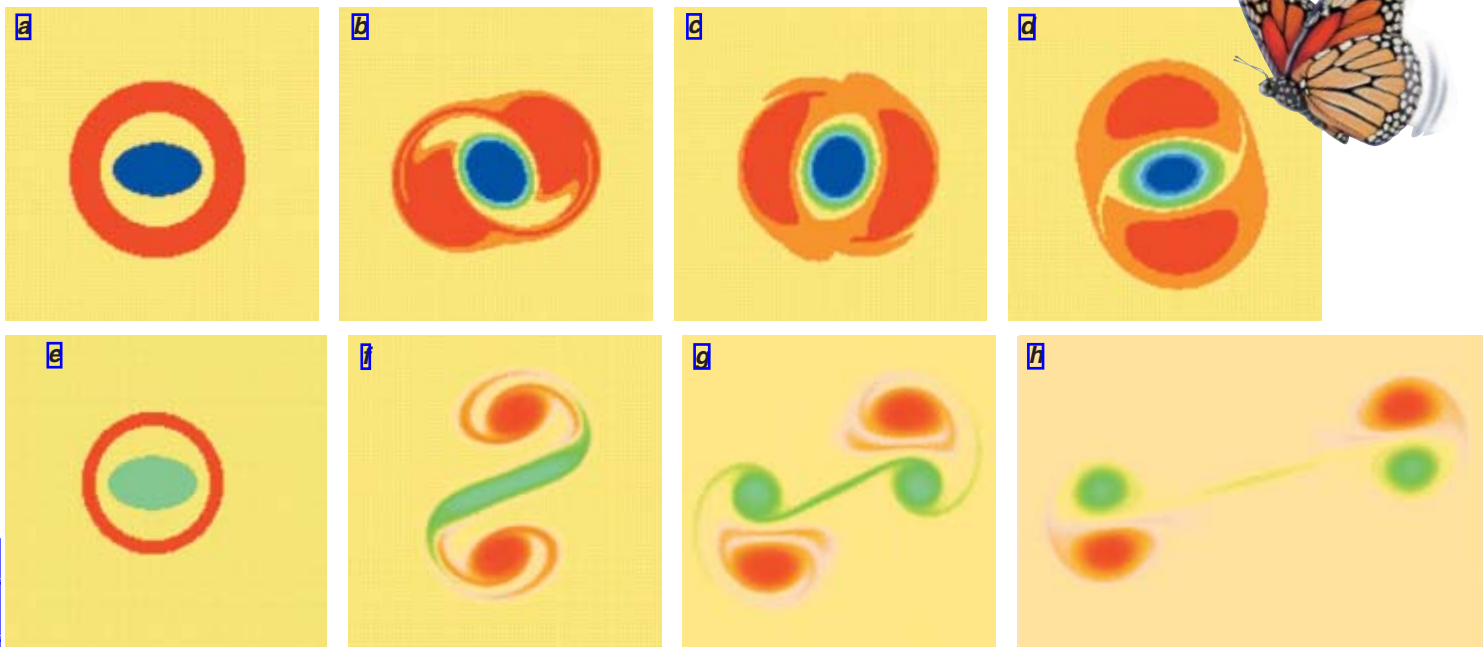
pressible, ce qui est vérifié à l'échelle globale dans l'atmosphère et dans les océans. Dans ce cas, la dynamique de l'écoulement est déterminée par une grandeur définie en chaque point du fluide et nommée «vorticité». Elle mesure la vitesse de rotation propre de chaque point du fluide (en termes mathématiques, la vorticité est le rotationnel de la vitesse) : chaque point est représenté par une petite toupie qui tourne sur elle-même. Le fluide est constitué d'une multitude de toupies, mais toutes n'ont pas la même vitesse de rotation. Quand le fluide s'écoule, elles se déplacent. Dans les écoulements que nous étudions, la vorticité d'une particule fluide reste inchangée, c'est-à-dire que les toupies gardent toujours les mêmes vitesses de rotation, car les frottements par viscosité sont négligeables.

Alors qu'à petite échelle, le mouvement est chaotique, on observe qu'à grande échelle les écoulements turbulents bidimensionnels incompressibles s'organisent, et de grandes structures tourbillonnaires apparaissent, nommées «structures cohérentes». Ces structures sont formées d'un seul tourbillon, ou de deux, accolés et tournant en sens inverse, ou encore de trois... ou plus.



5. L'EVOLUTION DE L'ATMOSPHERE est simulée avec un modèle d'écoulement identique à celui utilisé par E. Lorenz. À chaque point du plan est associée une «toupie», sa vorticité. Les valeurs sont indiquées par des couleurs allant du bleu (la vorticité est négative : la toupie tourne dans le sens des aiguilles d'une montre) au rouge (la vorticité est positive : la toupie tourne dans l'autre sens), en passant par le jaune (la vorticité est nulle). L'état initial (a) est choisi de façon à ce que le système évolue rapidement vers une structure cohérente : il a une forme particulière, constituée d'une ellipse où la vorticité est négative, entourée d'une couronne où la vorticité est positive (en réalité, il n'existe pas d'état initial de l'atmosphère, mais on sait que de

telles structures cohérentes se forment). Le calcul est effectué avec un faible nombre de variables (de l'ordre de 100) ; les «points» qui constituent l'atmosphère sont épais et les figures sont floues. Après une courte période d'évolution, trois tourbillons apparaissent (b), puis ils se fragmentent (c), et l'atmosphère devient de plus en plus chaotique (d). On perturbe très légèrement l'état initial. La perturbation étant très faible, rien n'est visible à l'œil nu au début (e et f) ; un examen attentif (g) révèle de légères différences avec la phase correspondante du modèle précédent (c). Ensuite, le système perturbé (h) évolue très différemment du système non perturbé. Pour un tel système, l'évolution à long terme n'est pas prévisible.



6. AVEC UN GRAND NOMBRE DE VARIABLES (de l'ordre de 100 000), la simulation de l'évolution de l'atmosphère diffère de celle que prévoit le modèle de Lorenz : l'atmosphère s'organise, car des effets statistiques interviennent. Au début, la couronne se déforme et s'enroule de manière complexe autour de l'ellipse (b) ; progressivement, un système formé de trois tourbillons se constitue (c), puis se stabilise en une structure formée d'un tourbillon central entouré de deux tourbillons accolés tournant en sens inverse, le tout étant animé d'un mouvement de rotation uniforme (d). On n'aboutit donc plus à un système chaotique,

mais à une structure cohérente stable. En changeant l'état initial (couronne plus mince) (e), on observe une organisation différente : le tourbillon central s'étire (f), puis le système se scinde en deux dipôles qui s'éloignent l'un de l'autre à vitesse constante (g, h). Dans les deux cas, une légère perturbation de l'état initial (non représentée ici) a un effet très faible, impossible à détecter à l'œil nu : on n'observe pas de sensibilité par rapport aux conditions initiales et l'on peut prévoir l'évolution. Les simulations numériques présentées ici ont été effectuées par Carole Rosier de l'Université de Lyon 1.

Elles s'étendent sur plusieurs milliers de kilomètres dans l'atmosphère terrestre, où l'on peut en observer tous les jours. Ces grandes structures cycloniques ou anticycloniques sont en effet visibles grâce aux nuages et apparaissent souvent sur les images prises par satellite (voir la figure 4). Plus loin de nous, la grande tache rouge de Jupiter, gigantesque tourbillon d'environ 20 000 kilomètres de diamètre, formé dans une mince couche fluide à la surface de la planète, est un exemple spectaculaire d'une telle structure (voir la figure 7).

La formation systématique de telles structures cohérentes est une caractéristique des écoulements à deux dimensions. Elles apparaissent et persistent au sein d'écoulements très chaotiques, ce qui a longtemps intrigué les observateurs. Pourquoi ne sont-elles pas disloquées par la turbulence vigoureuse où elles baignent ?

Un tourbillon, dans une rivière par exemple, se caractérise localement par une vorticité élevée, c'est-à-dire que de nombreuses toupies tournant dans le même sens se regroupent dans une même région. Cette description d'un tourbillon élémentaire ne suffit pas à nous faire comprendre l'organisation des systèmes tourbillonnaires cohérents.

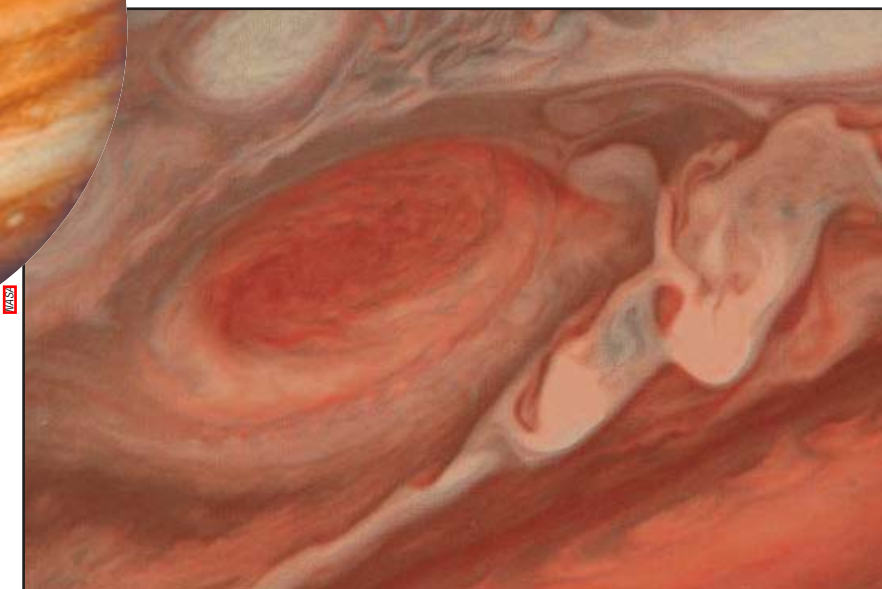
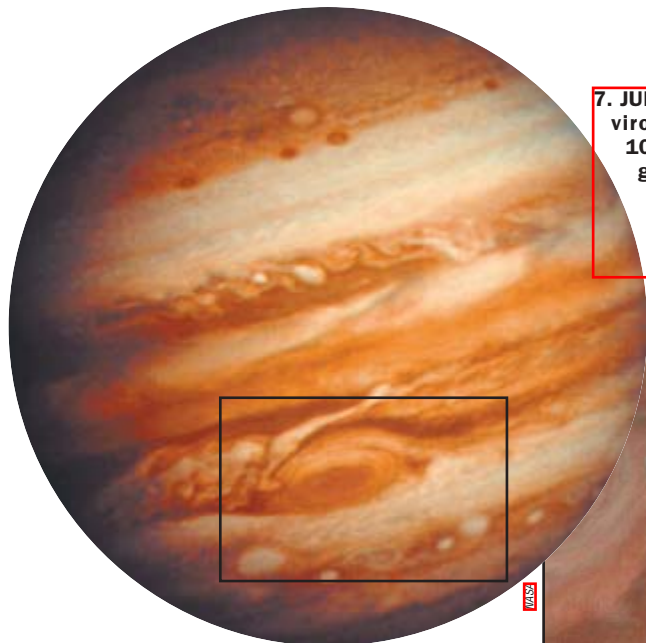
En effet, les tourbillons interagissent de façon complexe, et éclatent parfois en de multiples fragments. Cependant, l'écoulement finit par s'organiser en quelques structures simples qui persistent dans le temps, tel l'anticyclone des Açores qui se déforme et se déplace, mais reste toujours plus ou moins dans la même région. Grâce à des simulations numériques menées au cours des 20 dernières années, on a pu reproduire l'apparition de tourbillons stables au sein d'un écoulement turbulent.

En 1949, le physicien américain Lars Onsager remarque que l'énergie cinétique du fluide est conservée dans un écoulement turbulent bidimensionnel. Il suggère alors que les tourbillons stables devraient être décrits comme des états d'équilibre statistique, en étendant la mécanique statistique de Boltzmann au fluide parfait. L'entreprise s'est longtemps heurtée à des difficultés théoriques. Le problème se résout quand on introduit deux niveaux de description du mouvement fluide. Le premier niveau, macroscopique, concerne le mouvement à grande échelle, c'est-à-dire vu de loin, et ignore les détails (il se situe à l'échelle du millier de kilomètres pour l'atmosphère terrestre) ; le niveau microscopique

décrit ce qui se passe à petite échelle (quelques dizaines de kilomètres), à l'échelle où s'épanouit le chaos turbulent. Suivant la démarche de Boltzmann, on définit une entropie, une grandeur qui quantifie le désordre, ici lié à la turbulence : l'entropie statistique d'un état macroscopique s'obtient en comptant le nombre d'états microscopiques possibles de l'état considéré. Elle est d'autant plus élevée que le nombre d'états microscopiques – et donc le désordre – est important. On cherche ensuite les états macroscopiques du système les plus probables, c'est-à-dire ceux qui rendent l'entropie maximale. Ces états de l'atmosphère correspondent aux structures tourbillonnaires cohérentes.

Décrivons plus précisément le scénario de formation des structures cohérentes. Dans l'état initial, la vorticité varie de façon régulière d'un point du fluide à son voisin : des toupies proches tournent à des vitesses similaires. L'écoulement turbulent crée un mouvement complexe à petite échelle. À mesure que la turbulence se développe, les toupies de différentes vitesses de rotation se mélangent. La vorticité oscille alors de façon chaotique, quand on passe d'un point à un autre, voisin : une toupie

7. JUPITER EST UNE PLANETE GEANTE GAZEUSE. Un gigantesque tourbillon d'environ 20 000 kilomètres de diamètre occupe une couche superficielle de 100 kilomètres d'épaisseur dans son atmosphère. Galilée déjà avait repéré cette grande tache rouge. La persistance de ce tourbillon dans une atmosphère turbulente animée de vents très violents (de l'ordre de 300 kilomètres par heure) est restée longtemps mystérieuse. Il s'agit d'une structure cohérente de la turbulence bidimensionnelle. Les ovales blancs sont des tourbillons de plus petite taille. (Photo prise par la sonde Voyager 1).



qui tourne lentement juxta une autre dont la rotation sur elle-même est très rapide. Il est impossible de prévoir les vorticités des points du fluide. Pourtant, ces oscillations incohérentes de la vortacité à petite échelle entraînent la formation des structures à grande échelle.

Le passage de la vortacité (une variable microscopique) au champ de vitesses de l'atmosphère (une variable macroscopique) est analogue à celui qui mène du mouvement des molécules gazeuses à la pression : le déplacement chaotique des molécules pousse ces dernières à remplir uniformément l'espace, et la pression provient des chocs contre les parois. On déduit sa valeur du nombre moyen de collisions contre les parois : elle prend une valeur bien déterminée, uniforme dans la pièce. De même, on déduit le champ de vitesses de l'écoulement de la moyenne statistique des vorticités. Le champ de vitesses ainsi calculé n'est pas uniforme, mais il fait apparaître des tourbillons organisés.

L'introduction de la mécanique statistique dans l'étude des écoulements à deux dimensions montre que le champ de vitesses (une variable macroscopique) est théoriquement prédictible. Cela contredit-il les calculs d'Arnold ? Non, car ses calculs montrent que les trajectoires (microscopiques) des particules fluides ont une instabilité exponentielle dans le temps, c'est-à-dire que les trajectoires divergent, éparpillant les tourbillons dont la vitesse de rotation est lente parmi celles qui tournent très vite. Ce phénomène provoque les oscillations chaotiques de la vortacité à petite échelle, qui engendrent, en fin de compte, un champ de vitesses prédictible au niveau macroscopique.

Prévisions à long terme

Nous avons validé cette approche théorique en effectuant des simulations numériques sur l'équation du fluide parfait à deux dimensions et en utilisant un très grand nombre de degrés de liberté. Autrement dit, nous refaisons les calculs de E. Lorenz, mais avec un grand nombre de degrés de liberté, au lieu de quelques dizaines.

Pour faire le calcul, nous choisissons une condition initiale, déterminée par la vortacité en tout point, puis nous laissons évoluer le système. Cet état initial particulier donne naissance à des structures organisées, après une phase de transition assez rapide. En faisant varier l'état initial, nous obtenons deux types d'état final : soit une structure cohérente tripolaire, c'est-à-dire trois tourbillons accolés animés d'un mouvement global de rotation uniforme (voir la figure 6d), soit quatre tourbillons formés de deux paires de tourbillons accolés, tournant en sens opposés, chaque paire se propageant en ligne droite à vitesse uniforme (voir la figure 6h). De telles structures sont observées dans l'atmosphère ou dans les océans.

Qu'en est-il de l'effet papillon ? Effectuons sur les simulations précédentes une petite perturbation des conditions initiales. Dans le premier cas, qui mène à la formation de trois

tourbillons, la perturbation n'a aucun effet sur la formation de la structure : on retrouve les trois mêmes tourbillons accolés. Quand on calcule l'évolution dans le temps de l'énergie de la perturbation, on constate qu'elle se stabilise rapidement et reste très faible par rapport à l'énergie totale du système. Dans le deuxième cas non plus, la perturbation n'entraîne aucun effet visible, et l'on retrouve les deux paires de tourbillons. En revanche, l'énergie de la perturbation augmente linéairement avec le temps. Il existe un troisième cas exceptionnel, critique, à la frontière des deux cas précédents, où le système «hésite» entre les deux états finaux. Dans ce cas, et dans ce cas seulement, les systèmes perturbés et non perturbés ont des comportements distincts. L'énergie de la perturbation évolue au début comme dans les deux premiers cas, puis entre brusquement dans une phase de croissance exponentielle. On constate donc que l'instabilité exponentielle apparaît seulement dans cette situation exceptionnelle dite de «transition de phase», où le système hésite entre deux chemins possibles.

Si nous refaisons ces mêmes calculs en diminuant seulement le nombre de degrés de liberté (toutes choses égales d'ailleurs), on constate qu'aucune structure cohérente ne se

forme, mais qu'un chaos turbulent apparaît qui gagne tout l'espace (voir la figure 5), cependant que l'énergie de la perturbation croît rapidement pour devenir comparable à l'énergie du système ; on retrouve alors bien les observations de E. Lorenz.

Ces simulations numériques montrent que le système évolue très différemment selon que l'on prend en compte un petit ou un grand nombre de degrés de liberté : bien que, à cause de la turbulence à petite échelle, les trajectoires des particules fluides soient chaotiques et imprévisibles, on peut prévoir le champ des vitesses du fluide, c'est-à-dire qu'il n'est pas exponentiellement sensible aux petites variations des conditions initiales (sauf situation exceptionnelle).

On pourra objecter que l'atmosphère terrestre est beaucoup plus complexe que le fluide parfait à deux dimensions que nous avons étudié ici. À cela, nous répondons, d'une part, que c'est en considérant ce même système que E. Lorenz aboutit à une conclusion opposée ; d'autre part, les modèles complexes, qui décrivent de manière plus réaliste l'écoulement atmosphérique, possèdent les mêmes propriétés que l'équation du fluide parfait bidimensionnel (le chaos à petite échelle, l'imprédictibilité des trajectoires des particules fluides et la formation de structures cohérentes).

L'étude de sensibilité aux conditions initiales présentée ici porte sur un mécanisme d'auto-organisation particulier, qui, bien qu'il ait été choisi pour son caractère instable, n'épuise pas à lui seul tous les comportements possibles des écoulements bidimensionnels. Il est cependant représentatif du type de phénomènes que l'on observe dans la circulation atmosphérique, formée de structures cohérentes qui se déplacent autour de la planète et interagissent, tels les anti-

cyclones ou les dépressions. D'autres simulations numériques font apparaître le même phénomène que nous avons mis en évidence : la croissance de l'énergie de la perturbation est le plus souvent linéaire, très rarement exponentielle, en accord avec les observations des météorologistes. En conséquence, le pronostic de prévision change : l'erreur de prévision ne double pas à chaque fois que le temps augmente d'une valeur donnée, comme le prévoit E. Lorentz, mais elle croît linéairement (elle double quand le temps double). Les prévisions à deux semaines, annoncées par E. Lorenz, ne constituent pas une limite fatidique. La prévision à long terme devient possible si l'on améliore la connaissance de l'état initial de l'atmosphère. On peut donc s'attendre à des progrès importants de la fiabilité des prévisions dans les années à venir, grâce à des ordinateurs plus puissants, à un maillage plus serré du réseau d'observations et à des modèles plus perfectionnés. Cependant, cet optimisme doit être tempéré ; comme on l'a vu, des difficultés demeurent à cause des situations critiques où le système peut basculer vers une structure ou vers une autre. Les prévisions locales, comme les orages, sont encore plus difficiles à établir, car elles doivent en plus prendre en compte les détails du relief.

L'effet papillon est invoqué à tout propos, même en économie ou en sociologie, quand on cherche à souligner l'incapacité de prédire les conséquences d'infimes perturbations. Retenons de ce qui précède que dans les systèmes complexes, qui possèdent un grand nombre de degrés de liberté, et où l'on se préoccupe de prédire des quantités «macroscopiques», qui sont des moyennes statistiques, l'instabilité exponentielle du système «microscopique» n'est pas synonyme d'imprédictibilité.

Raoult ROBERT est directeur de recherches (CNRS) à l'Institut Fourier à Grenoble.

L. ONSAGER, *Statistical Hydrodynamics*, Nuovo Cimento Supp., n° 6, p. 279, 1949.

E.N. LORENZ, *Deterministic non periodic flow*, in *Atmos. Sci.*, n° 20, pp. 130-141, 1963.

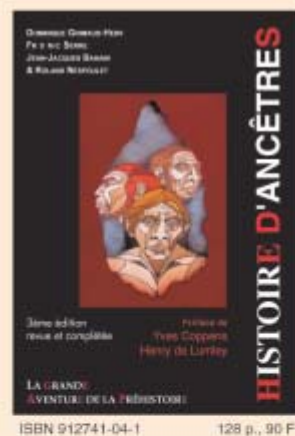
E.N. LORENZ, *A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model*, *Tellus*, n° 17, pp. 321-333, 1965.

R. ROBERT, J. SOMMERIA, *Statistical equilibrium states for two-dimensional flows*,

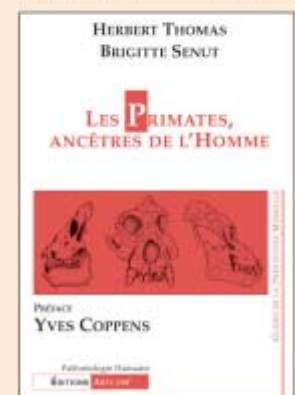
J. Fluid Mech. n° 229, pp. 291-310, 1991.
V.I. ARNOLD, B.A. KHESIN., *Topological methods in hydrodynamics*, Springer Verlag, 1996.

J. HUNT, *Prévision déterministe et statistique de l'environnement et de la turbulence*, in *Turbulence et déterminisme*, sous la direction de M. Lesieur, Presses universitaires de Grenoble, 1998.

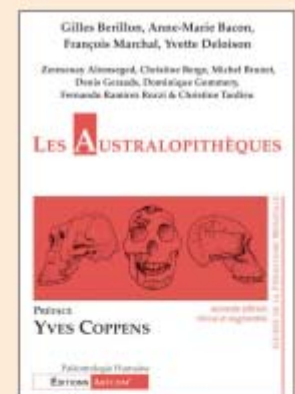
R. ROBERT, C. ROSIER, *Long range predictability of atmospheric flows*, *Non linear Processes in Geophysics*, n° 8, pp. 55-67, 2001.



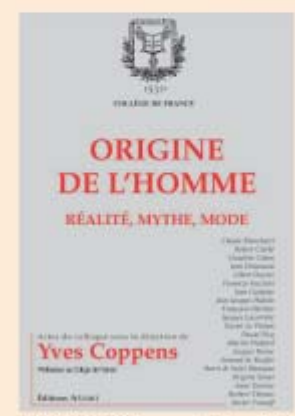
ISBN 912741-04-1 128 p., 90 F



ISBN 912741-22-X 184 p., 90 F



ISBN 912741-21-1 256 p., 90 F



ISBN 912741-07-6 344 p., 230 F

ÉDITIONS ARTCOM®
53, rue Boissière 75116 - Paris

Le sens du goût

DAVID SMITH • ROBERT MARGOLSKEE

Les physiologistes découvrent comment les cellules sensorielles de la langue enregistrent les sensations gustatives et comment le cerveau interprète ces signaux.

Hummmm, un délicieux bonbon au chocolat! Lorsque vous mordez dans une telle friandise, quelles sensations éprouvez-vous? D'abord, le mou, le sucré et le crémeux. Vous sentez ensuite la légère amertume du chocolat lorsque vous fermez la bouche et que son arôme envahit vos cavités nasales. Quand on est enrhumé, on mesure combien les odeurs représentent une composante importante de la saveur.

La saveur est un mélange complexe d'informations sensorielles du goût (la gustation), de l'odeur (l'olfaction) et du sens tactile activé lors de la mastication. Bien que le mot goût désigne fréquemment la saveur, le terme ne s'applique au sens strict qu'aux sensations reçues par les cellules gustatives de la bouche. La perception gustative humaine a longtemps été décrite au moyen de quatre qualificatifs : salé, acide, sucré et amer (*voir la figure ci-contre*). Toutefois, certains ont proposé l'existence d'un cinquième, l'umami, d'un mot japonais qui signifie délicieux et désigne la sensation produite par le glutamate, l'un des 20 acides aminés qui composent les protéines. Sous forme de monosodium de glutamate, le glutamate est également un agent de sapidité, c'est-à-dire qu'il accroît la sensibilité des récepteurs gustatifs. Néanmoins, nous verrons que le goût est un sens plus complexe que la simple combinaison de ces catégories fondamentales.

Les mécanismes du goût ont été progressivement élucidés au cours des dernières années. Ainsi, les neurobiologistes ont identifié des protéines qui participent à la détection des substances sucrées et amères par les cellules gustatives. Ces protéines ressemblent à certaines protéines de la vision. Puis on a montré que certains neurones réagissent à plusieurs types de signaux gustatifs, de la même façon que les cellules

rétinienne sont sensibles à plusieurs couleurs. Ces résultats améliorent notre compréhension de l'un des sens que l'on comprend encore le moins bien.

Les détecteurs gustatifs

Les cellules sensorielles sont localisées dans des structures spécialisées, nommées bourgeons gustatifs, situées surtout sur la langue et sur le voile du palais. Sur la langue, la majorité de ces bourgeons sont regroupés dans les papilles, les petites granulosités qui donnent à la langue son aspect rugueux (*voir la figure 1*). Toutefois, les papilles de la langue les plus nombreuses, les papilles filiformes, ne contiennent pas de bourgeons gustatifs : elles sont responsables des sensations tactiles. Parmi celles qui contiennent des bourgeons gustatifs, les papilles fongiformes (en forme de champignon) de la partie antérieure de la langue sont les plus visibles : elles contiennent un ou plusieurs bourgeons et ressemblent à des points rosâtres répartis sur le bord de la langue ; elles ressortent particulièrement bien sur la langue quand on a bu un verre de lait (il dépose un film blanchâtre qui augmente le contraste) ou que l'on a mis un colorant alimentaire sur le bout de la langue. À l'arrière de la langue, disposées en un «V» inversé, une dizaine de papilles de plus grande taille, nommées caliciformes, contiennent également des bourgeons gustatifs (*voir la figure 1*). Enfin, on trouve aussi des bourgeons gustatifs dans les papilles foliées, en forme de feuille, qui forment de petites tranchées sur les côtés de la région postérieure de la langue.

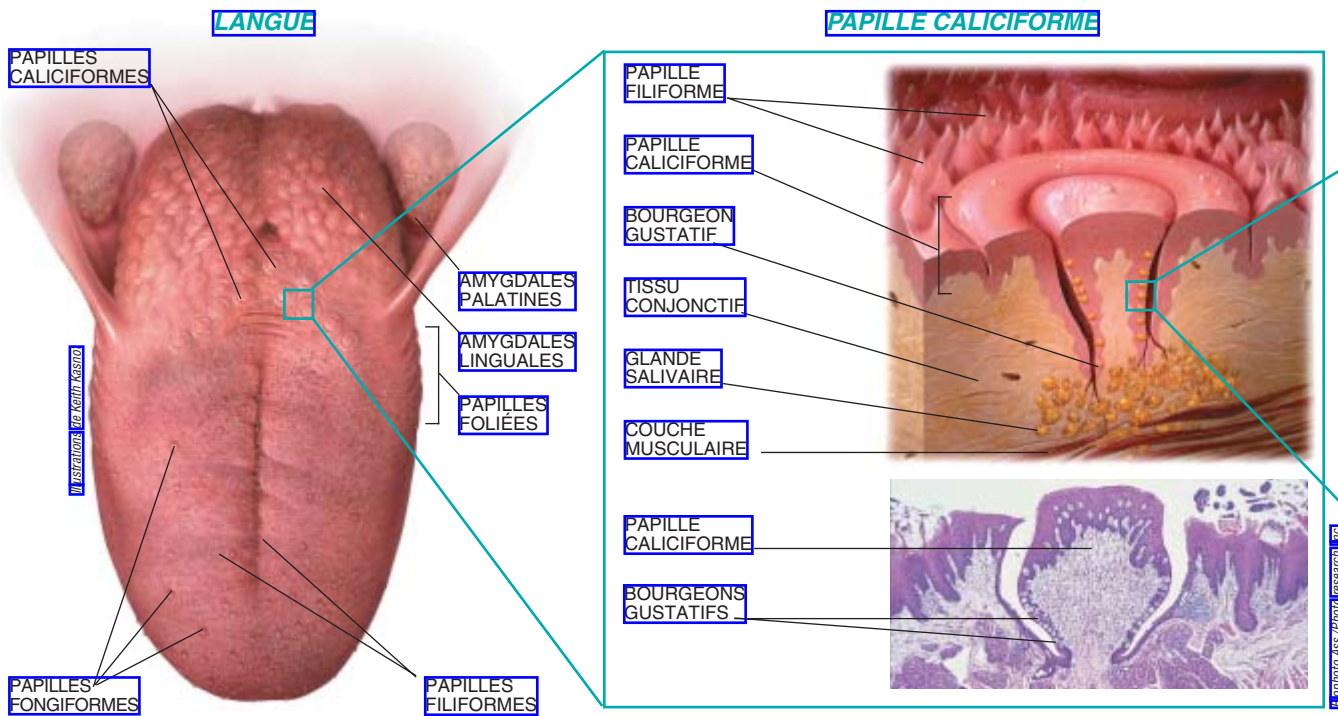
Les bourgeons du goût sont des amas sphériques, en forme d'oignons, qui contiennent entre 50 et 100 cellules gustatives : au sommet de chacune, de

fines projections, nommées microvillosités, font saillie à travers un pore gustatif, une ouverture à la surface du bourgeon du goût (*voir la figure 1*). Les substances contenues dans la nourriture ingérée (les substances sapides) se dissolvent dans la salive et interagissent alors avec les cellules gustatives, plus précisément avec deux types de protéines de la surface de ces cellules : les premières sont des récepteurs gustatifs, les secondes des pores nommés canaux ioniques.

À l'intérieur des cellules gustatives, ces interactions modifient les concentrations des atomes chargés électriquement, des ions. Comme dans les neurones, les ions ont des concentrations différentes de part et d'autre de la membrane des cellules gustatives. Cette différence de concentration en ions impose une différence de potentiel : la charge interne résultante est négative, tandis que la charge externe est positive. Les substances sapides modifient cet état en augmentant la concentration en ions positifs à l'intérieur des cellules gustatives : la différence de potentiel diminue (*voir l'encadré page 40*). En raison de cette dépolarisation, les cellules gustatives libèrent des messagers chimiques, des neurotransmetteurs, vers les neurones qui entourent la base des cellules gustatives ; ces neurones captent les neurotransmetteurs, ce qui crée des signaux électriques, propagés, via plusieurs relais, jusqu'au cerveau.

Toutefois, diverses expériences ont montré que les substances chimiques, notamment amères et sucrées, n'ont pas toujours des qualités gustatives spécifiques : les sucres, par exemple, n'ont pas tous un goût... sucré. De plus, le goût sucré est parfois dû à d'autres types de substances, tels le chloroforme ou les deux édulcorants de synthèse, l'aspartame et la saccharine (le premier





1. LA LANGUE HUMAINE (à gauche) est dotée de quatre types de papilles gustatives : les papilles caliciformes, les papilles foliées, les papilles fongiformes et les papilles filiformes. Seules les trois premières portent des bourgeons gustatifs. À l'intérieur d'une papille caliciforme, une

cavité circulaire irriguée par les glandes salivaires (au centre), les bourgeons gustatifs sont en contact avec la cavité buccale par des pores. Les bourgeons gustatifs (à droite) sont composés de cellules gustatives dont les microvillosités affluent par le pore gustatif. Par le biais

Hum, délicieux ! Pouah, immangeable !

L'information sensorielle reçue par les cellules gustatives nous aide à réagir correctement face à la nourriture. Ainsi, le goût sucré des hydrates de carbone stimule l'envie d'en consommer. Les informations gustatives déclenchent aussi des réactions physiologiques adaptées, telle la libération d'insuline, l'hormone qui diminue la quantité de glucose dans le sang. Ces réactions préparent l'organisme à utiliser au mieux les nutriments. «Instinctivement», l'homme ou l'animal qui a un déficit de sodium recherche des aliments riches en sodium. Des études ont également montré que les personnes et les animaux qui ont des carences alimentaires mangent préférentiellement des aliments riches en vitamines et en sels minéraux.

Si l'on doit éviter les carences alimentaires, on doit aussi s'abstenir de consommer des substances dangereuses. Les animaux, et les êtres humains, rejettent souvent les substances au goût acide ou amer, sauf celles dont l'acidité est peu marquée. Les composés toxiques, tels la strychnine et d'autres alcaloïdes végétaux, ont souvent un goût très amer, donc dangereux. Par ailleurs, de nombreuses plantes ont acquis la capacité de produire des substances amères qui, sans être toxiques, repoussent leurs prédateurs animaux dégoûtés. Par ailleurs, les aliments périmés, donc dangereux, ont souvent un goût acide.

Les réactions de plaisir et de dégoût déclenchées par les substances sucrées et amères se manifestent dès la naissance et résulteraient de connexions neuronales avec le tronc cérébral. Les animaux dont on a déconnecté les hémisphères cérébraux expriment pourtant du plaisir et du dégoût lorsqu'on leur donne à manger des substances sucrées ou amères.

Le lien entre saveur et plaisir, ou déplaisir, est à la base de l'apprentissage de l'aversion alimentaire : les animaux et les êtres humains apprennent rapidement à éviter un aliment lorsque son ingestion est associée à des troubles gastro-intestinaux (et la mémoire de la répulsion persiste longtemps).

La perte d'appétit est un effet secondaire fréquent des traitements anticancéreux par radiothérapie ou par chimiothérapie ; elle résulte des troubles gastro-intestinaux dus à ces traitements.

Par ailleurs, ce mécanisme rend difficile la conception d'un poison contre les rats, notamment, car ces animaux associent très facilement de nouveaux agents sapides à leurs conséquences physiologiques.

est un petit peptide, le second est un dérivé du toluène), dont les formules chimiques n'ont rien de commun avec celles des sucres.

Les composés qui ont un goût salé ou acide sont moins variés et sont souvent des ions. De tels composés agissent directement sur les canaux ioniques, tandis que les agents sucrés et amers se lient à des récepteurs de surface qui, via une cascade de réactions biochimiques à l'intérieur des cellules gustatives, déclenchent l'ouverture ou la fermeture de canaux ioniques. En 1992, on a identifié un élément clef de cette cascade, la gustducine, nommée ainsi par analogie avec la transducine, une protéine des récepteurs rétiniens qui participe à la conversion, ou transduction, des signaux lumineux en signaux électriques.

La gustducine et la transducine sont des protéines G (l'activité de ces protéines est commandée par une molécule nommée guanosine triphosphate). Ces deux molécules sont associées à de nombreux types de protéines réceptrices de surface et forment un complexe qui traverse la membrane cellulaire. Lorsqu'une molécule sapide se lie au récepteur de surface d'une cellule gustative, à la façon d'une clef dans une serrure, les sous-unités de la gustducine se dissocient dans la cellule : les réactions qui suivent aboutissent

BOURGEON GUSTATIF

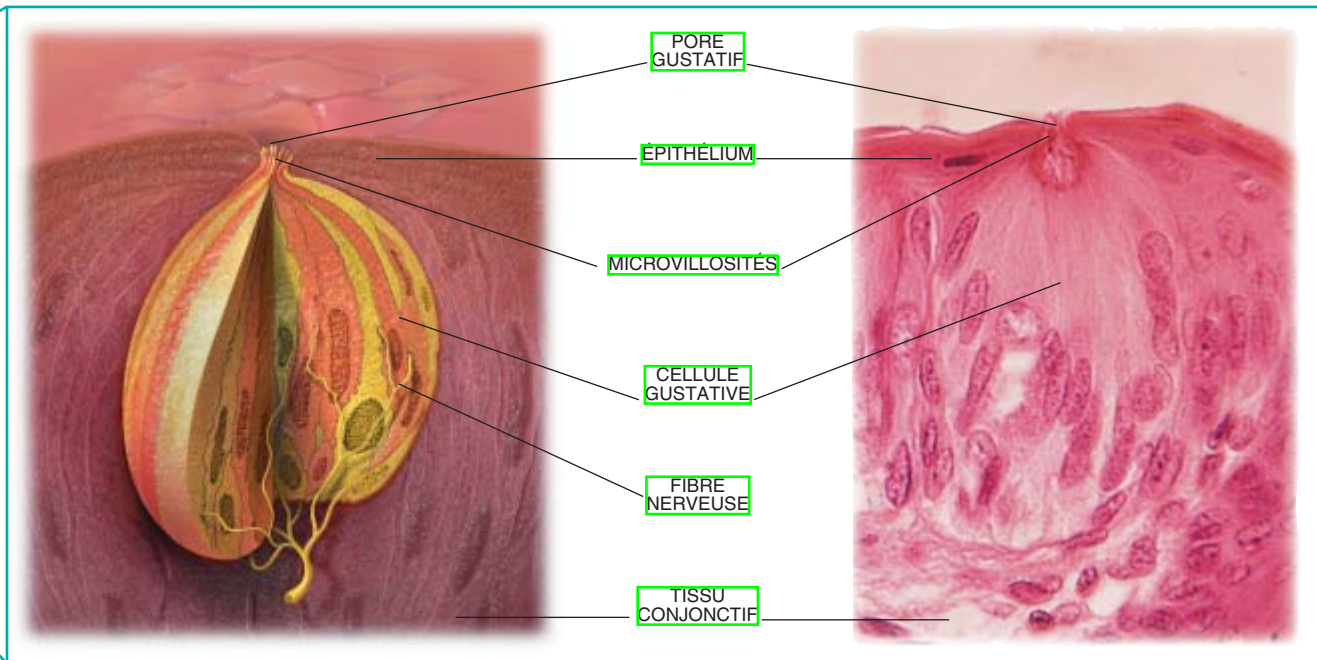


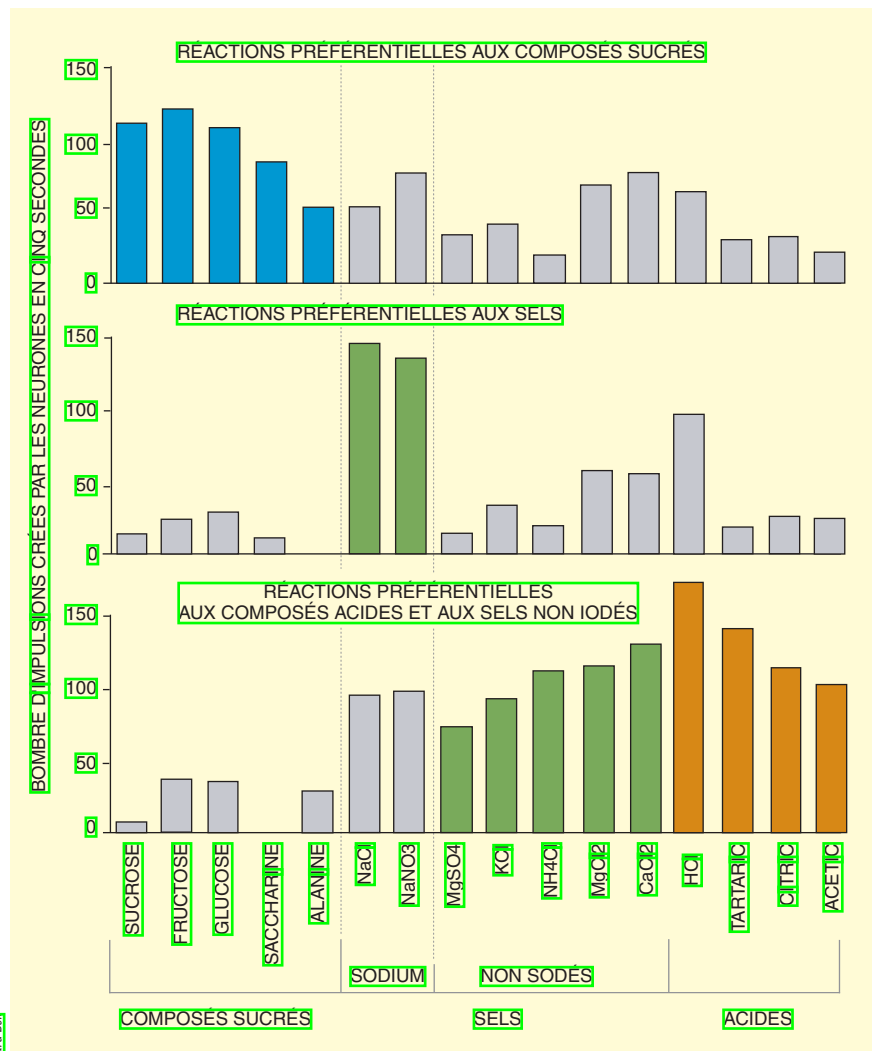
Photo Heschlars 12

de synapses, ces cellules sont en contact avec des neurones qui transmettent l'information gustative née des interactions entre les agents sapides et les récepteurs des microvillosités.

à l'ouverture ou à la fermeture de canaux ioniques, ce qui entraîne une augmentation des charges positives à l'intérieur de la cellule.

En 1996, grâce à des souris génétiquement modifiées dépourvues de l'une des trois sous-unités de la gustducine, on a montré que la gustducine est indispensable à la perception des goûts amers et sucrés. Contrairement aux souris normales, ces souris modifiées ne préfèrent pas les aliments sucrés et n'évitent pas les substances amères. Par ailleurs, chez ces souris dépourvues de gustducine, les nerfs principaux du goût sont peu activés par les agents sucrés et amers, mais les réactions aux composés acides et salés restent inchangées.

En 2000, les groupes de Charles Zuker, à l'Université de San Diego, et de Linda Buck, à l'Université Harvard, notamment, ont identifié, chez la souris et chez l'homme, les récepteurs des substances amères qui activent la gustducine. Ces récepteurs, dits T2R/TRB, appartiennent à une famille d'une cinquantaine (au moins) de composés. Des cellules en culture, où l'on a introduit les gènes *mT2R5* et *mT2R8* qui codent deux de ces récepteurs, sont activées par deux composés amers. D'autres expériences ont confirmé le rôle des récepteurs T2R dans la détection des substances amères : chez certaines souris, une version particulière



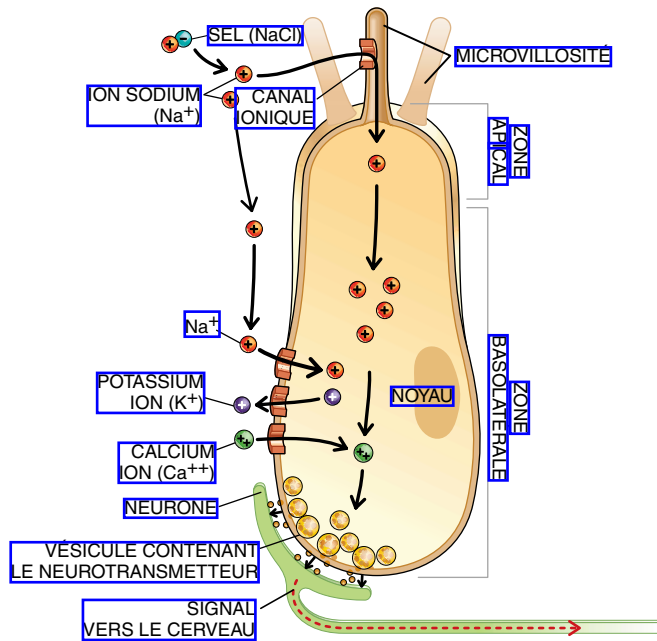
Edward 1291

2. LES TESTS D'ACTIVITE ont révélé que des «goûteurs» peuvent être répartis en trois catégories : ceux qui sont surtout sensibles aux composés sucrés (en haut), aux sels contenant du sodium (au centre) et, ceux qui réagissent surtout aux sels non sodés et aux composés acides (en bas).

Des saveurs aux cellules

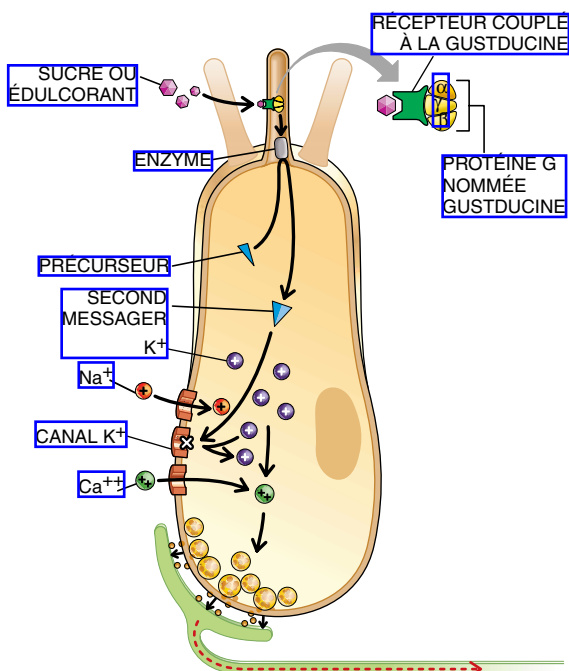
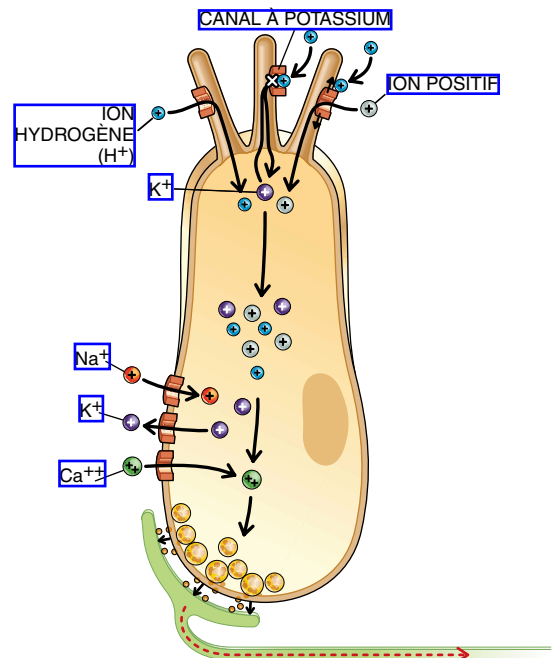
Les saveurs que le cerveau interprète comme salées, acides, sucrées, amères et, peut-être, umami, sont enregistrées sous forme d'une série de réactions chimiques qui se déroulent dans les cellules des bourgeons gustatifs. Les cinq voies biochimiques

sous-jacentes à chacune des cinq qualités sapides sont décrites ici dans des cellules séparées, mais c'est uniquement pour des besoins de clarté. En réalité, toutes les cellules gustatives sont sensibles à plusieurs types de stimulus sapides.

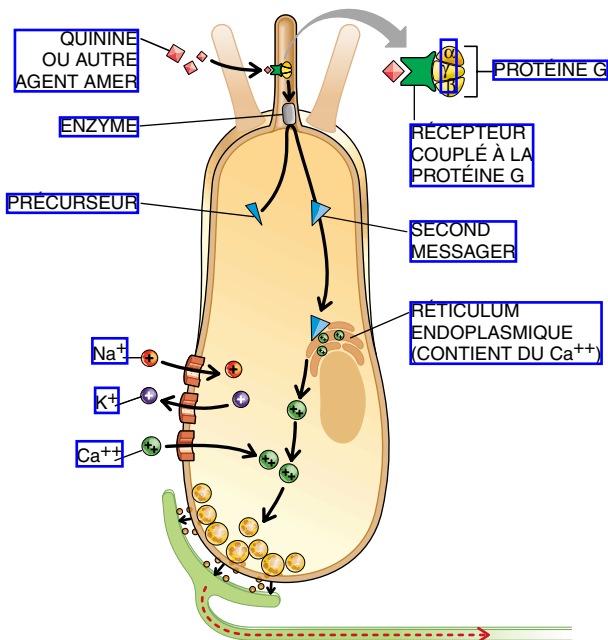


Les sels, tel le chlorure de sodium, sont perçus par les cellules gustatives lorsque les ions sodium (Na^+) traversent les canaux ioniques des microvillosités du sommet de la cellule (les ions sodium pénètrent également par des canaux situés sur le côté de la partie inférieure de la cellule). L'accumulation d'ions sodium modifie l'état électrochimique de la cellule et crée une dépolarisation qui entraîne l'entrée d'ions calcium (Ca^{++}) dans la cellule. Puis des signaux chimiques, nommés neurotransmetteurs, contenus dans des vésicules, sont libérés à l'extérieur de la cellule et sont captés par des neurones qui transmettent alors un signal électrique au cerveau. Les cellules du goût retrouvent leur état initial après la sortie d'ions potassium (K^+) par des canaux potassium.

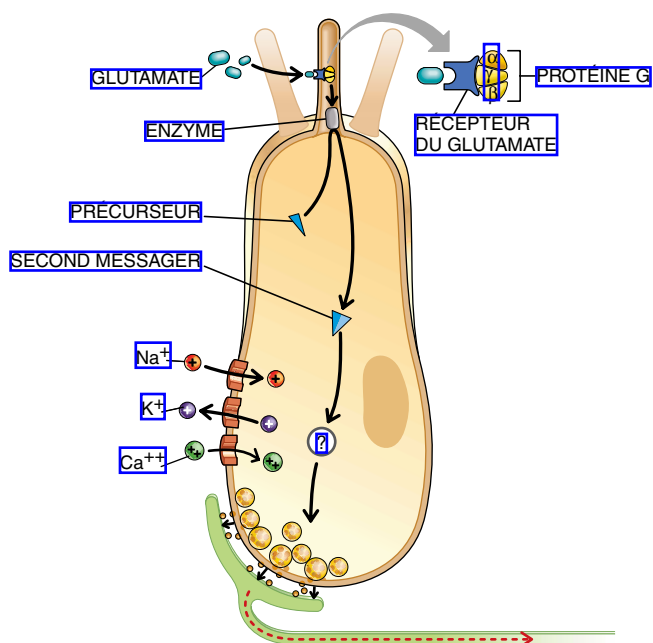
Les acides créent des ions hydrogène (H^+) lorsqu'ils sont en solution. Ces ions agissent sur les cellules gustatives de trois façons : ils entrent dans la cellule ; ils bloquent les canaux potassium (K^+) des microvillosités ; ils se lient aux canaux des microvillosités qu'ils ouvrent, et laissent ainsi entrer des ions positifs dans la cellule. L'accumulation de charges positives qui en résulte dépolarise la cellule et entraîne la libération du neurotransmetteur.



Les aliments sucrés, tels le saccharose ou les édulcorants artificiels, n'entrent pas dans les cellules gustatives, mais modifient l'intérieur de la cellule. Ils se lient à des récepteurs de la cellule gustative couplés à des protéines G. Les sous-unités alpha, bêta et gamma de ces protéines se séparent et activent une enzyme proche. Celle-ci transforme une molécule précurseur en un second messageur qui ferme les canaux potassium.



Les stimulus amers, telle la quinine, agissent aussi par l'intermédiaire des récepteurs couplés aux protéines G et des seconds messagers. Ici, sous l'action des seconds messagers, le réticulum endoplasmique libère des ions calcium. L'accumulation de ces ions provoque une dépolarisation des neurones et une libération de neuromédiateur.



Les acides aminés, tel le glutamate, à l'origine de la saveur umami, se lient à des récepteurs couplés à des protéines G et activent des seconds messagers. On n'a pas encore identifié toutes les étapes intermédiaires entre les seconds messagers et la libération du neurotransmetteur.

du gène *mt2r5* est liée à la sensation d'amertume conférée par l'antibiotique cycloheximide.

On n'a pas encore identifié les récepteurs du goût sucré. En 1998, Nirupa Chaudhari et Stephen Roper, de l'Université de Miami, ont identifié, chez le rat, un récepteur qui se lierait au glutamate. Ce récepteur serait responsable de la saveur umami. Cependant, la saveur umami n'est pas encore reconnue comme le cinquième goût fondamental. Le glutamate correspond peut-être à une sensation gustative particulière, mais, jusqu'à présent, seuls les Japonais ont un mot pour la désigner.

Une palette de saveurs

La saveur ne se résume pas à la simple juxtaposition de sensations perçues par quatre (ou cinq) types de récepteurs indépendants, chacun dévolu à un agent sapide primaire. Pour traduire l'information relative au goût, on parle en termes de sucré, salé, acide et amer, mais le goût relève de bien d'autres stimulus. Par exemple, nous ressentons l'intensité d'un goût, son caractère agréable, désagréable ou indifférent, la température et la texture des aliments. Les neurones gustatifs enregistrent simultanément toutes ces caractéristiques, de la même façon que le système visuel représente la forme, l'éclat, la couleur et le mouvement.

Les neurones gustatifs réagissent-ils spécifiquement à un agent sapide unique, tel le sel ou le sucre? Ou bien participent-ils à l'élaboration de plusieurs saveurs? Les neurones gustatifs centraux et périphériques réagissent à plusieurs classes de stimulus gustatifs. Bien que les neurones réagissent plus intensément à un agent sapide particulier, il sont souvent sensibles à divers stimulus gustatifs (voir la figure 2). Ainsi, le cerveau identifie des qualités gustatives variées à l'aide de combinaisons spécifiques de neurones activés.

Cette hypothèse avait déjà été émise, en 1940, par Carl Pfaffmann, de l'Université Brown. À l'aide d'études électrophysiologiques, il avait démontré que les neurones périphériques enregistrent tout un spectre de saveurs, et que la perception des saveurs résulte de l'activité de plusieurs neurones, puisque l'information de chaque neurone est ambiguë.

Cependant, dans les années 1970 et 1980, d'autres études avaient semblé montrer que des neurones spécifiques réagissaient de façon maximale à une saveur, c'est-à-dire qu'un type de cellules représente une qualité gustative donnée. Selon cette nouvelle hypothèse, des neurones sensibles au sucre signalent au cerveau le sucré, ceux qui sont sensibles au sel signalent le salé, etc.

Cette idée allait de pair avec le «découpage» de la langue humaine en régions spécifiques de la détection des goûts. Sur cette «carte du goût», le sucré est détecté par les bourgeons gustatifs du bout de la langue, l'acide par des bourgeons localisés sur les côtés, l'amer par des bourgeons du fond et le salé par des bourgeons latéraux.

Ces cartes du goût résultent d'une interprétation erronée de résultats acquis à la fin du XIX^e siècle ; elles sont fausses, mais, depuis leur apparition au début du XX^e siècle, elles persistent dans la littérature scientifique. En fait, toutes les qualités sapes sont perçues par toutes les régions de la langue, à condition que des bourgeons gustatifs y soient présents.

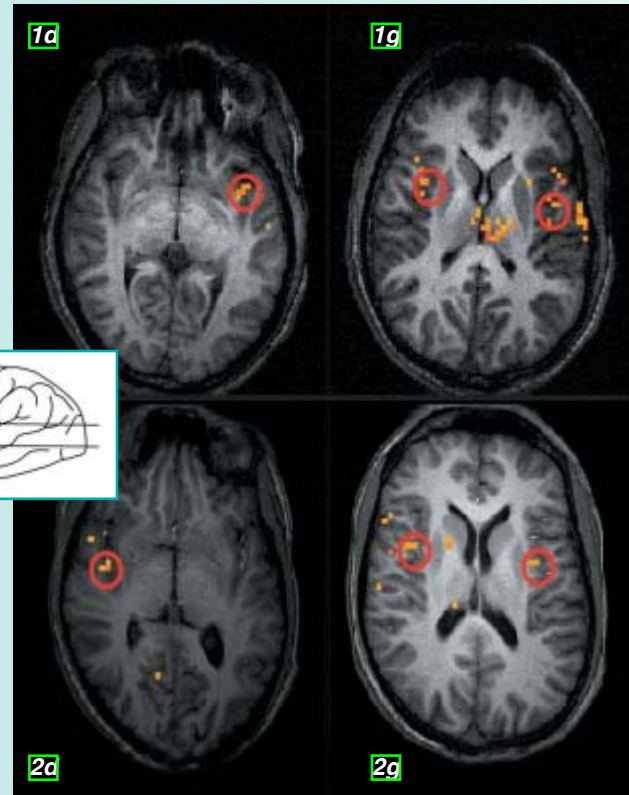
En 1983, nous avons montré que les neurones que l'on pensait dédiés à la détection spécifique du salé ou du sucré

La diversité des perceptions gustatives

Soutenue par des résultats d'études psychologiques, physiques et électrophysiologiques incompatibles avec l'hypothèse de quatre (ou cinq) «nerfs» gustatifs, l'idée d'une multitude de saveurs codées par des ensembles de neurones peu spécifiques s'impose aujourd'hui. L'hypothèse du codage de l'information par un ensemble de neurones peu spécifiques est solidement étayée. Ainsi, à chaque composé sapide correspond un ensemble particulier de récepteurs, et donc de neurones activés. Un ensemble différent de neurones signale la présence de composés distincts.

Par ailleurs, tous les êtres humains n'ont pas à la surface des cellules gustatives les mêmes protéines réceptrices : nous avons chacun un monde gustatif propre, de la même façon que nous avons des mondes olfactifs différents. Que ce soit pour le seuil de détection, l'intensité perçue ou la nature du goût, les différences entre les individus sont notables.

Bien que le vocabulaire adapté à leur description manque, les perceptions sont nuancées et nombreuses. Certes, on détecte des analogies entre deux substances sapes, par exemple les saveurs sucrées du glucose et du saccharose (le sucre de table), mais, expérimentalement, on vérifie bien que notre sens gustatif distingue ces composés.



Les zones d'activation des insula corticales (cercleées de rouge) diffèrent selon que le sujet est droitier (en haut) ou gaucher (en bas). Dans la partie supérieure de l'insula (coupes 2d et 2g), les zones activées sont identiques, mais, dans la partie inférieure (à gauche), seule l'insula d'un des deux hémisphères est activée : la droite pour le gaucher (coupe 1g) et la gauche pour le droitier (coupe 1d).

Hélas, nous n'avons que quatre (ou cinq) qualificatifs disponibles : acide, sucré, amer et salé (et umami?). Aussi, le discours est-il limité face à la richesse et à la diversité des perceptions.

Quelles sont les zones corticales sollicitées par le goût? Grâce à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, nous avons découvert, en collaboration avec Denis Le Bihan et Pierre-François van de Moortele, du CEA, les régions corticales activées lors de la stimulation gustative. Nous avons mesuré en continu la perception gustative de sujets : ces derniers, placés dans l'aimant de l'appareil, recevaient les substances sapes dissoutes par un tuyau placé dans leur bouche. Ainsi, nous avons observé les zones corticales activées lors de la perception gustative : il s'agit notamment du lobe de l'insula, cette région qui constitue les invaginations symétriques du cortex visibles sur une coupe transversale du cerveau.

L'identification de ces zones corrobore, d'une part, les données électrophysiologiques recueillies chez le singe, et d'autre part, les observations cliniques chez l'homme, tel le cerveau de soldats qui, après avoir reçu une balle dans la tête, avaient des déficits gustatifs.

L'activation touche les deux côtés de la partie haute de l'insula, alors qu'elle ne se manifeste que d'un seul côté dans la partie basse de l'insula de l'hémisphère dominant à gauche, chez les droitiers et, à droite, chez les gauchers (voir la figure). Les mêmes zones sont activées par les stimulus sapes et les stimulus tels le piquant, le chaud ou le froid... Cette observation confirme la convergence de toutes ces informations dans le cortex. Toutefois, ces deux types d'information, qui correspondent à deux voies neuronales différentes, sont distinctes : grâce à l'enregistrement des champs magnétiques engendrés par l'activation de diverses zones cérébrales, nous avons montré, en collaboration avec Tatsu Kobayakawa et Sachiko Saito au Japon, dans quel ordre temporel ces zones sont activées par la stimulation gustative. Après les zones de traitement des informations élémentaires, sont sollicitées, dans l'ordre, le gyrus cingulaire (siège des émotions), l'hippocampe (siège de la mémoire), puis le gyrus angulaire (une des aires du langage) et enfin l'insula inférieure de l'hémisphère dominant (les gyrus sont des «crêtes» corticales). En collaboration avec Claire Murphy et Barbara Cerf-Ducastel, de l'Université de San Diego, nous étudions aussi l'association des informations relatives au goût et à l'olfaction.

Par ailleurs, nous avons montré que l'on se familiarise à des stimulus gustatifs. Une exposition à un stimulus gustatif, répétée de nombreuses fois pendant quatre jours (consécutifs ou non), augmente la sensibilité à ce stimulus, c'est-à-dire que l'activation corticale est modifiée pendant que la sensibilité des nerfs gustatifs est augmentée. Nos travaux en cours visent à comprendre les mécanismes de cette sensibilité accrue.

Annick FAURION, Laboratoire de neurobiologie sensorielle de l'École pratique des hautes études

n'étaient plutôt que des éléments d'un réseau qui code l'information sous forme de profils d'activité. Ainsi, tous les neurones participent à l'élaboration du goût. De surcroît, la discrimination neuronale entre des stimulus différents dépend de l'activité simultanée de plusieurs types cellulaires, de la même façon que la vision des couleurs dépend de la comparaison de l'activité des récepteurs de l'œil. Nous en avons déduit que l'information gustative résulte de profils d'activité neuronale.

Les substances qui ont le même goût déclenchent des profils d'activité des neurones similaires. En comparant ces profils chez le hamster et chez le rat, et en utilisant des méthodes statistiques, on a identifié des similitudes entre des profils activés par différents agents sapides : les résultats sont en accord avec d'autres résultats obtenus lors d'expériences comportementales, où l'on détermine les stimulus qui ont des saveurs identiques ou ceux dont les saveurs diffèrent. Ces travaux montrent que les profils d'activation suffisent pour distinguer tous les goûts.

Quand on bloque l'activité de certains groupes de neurones, on perturbe la reconnaissance des goûts. Par exemple, chez le rat, un traitement de la langue par l'amiloride, une molécule antidiurétique, inhibe les canaux à sodium des récepteurs gustatifs qui réagissent surtout au chlorure de sodium. Ce traitement supprime les différences entre les profils d'activité dus au chlorure de sodium et à son substitut, le chlorure de potassium. La réduction de l'activité d'autres types cellulaires abolit également les différences entre les profils d'activité. Ces études montrent qu'un type cellulaire donné n'est pas responsable de la discrimination gustative, mais que celle-ci résulte de la comparaison de l'activité de groupes de cellules. Aussi la saveur dépend-elle de l'activité relative de différents types

de neurones, dont chacun contribue au profil global de l'activité gustative.

Puisque les neurones gustatifs sont sensibles à une grande variété de saveurs, les neurobiologistes comparent les niveaux d'activité de groupes de neurones pour identifier la sensation enregistrée. Aucun type de neurone isolé ne différencie seul des stimulus variés, car une cellule donnée réagit parfois de la même façon à divers stimulus, selon leurs concentrations relatives. Ainsi, le goût ressemble à la vision : grâce à seulement trois types de récepteurs sensibles à une large gamme de longueurs d'onde, nous voyons les multiples couleurs de l'arc-en-ciel. L'absence de l'un de ces récepteurs perturbe la discrimination des couleurs bien au-delà des longueurs d'ondes auxquelles le type de récepteur manquant est sensible.

Toutefois, malgré l'analogie vraisemblable du goût et de la vision des couleurs, certains neurobiologistes se demandent encore si certains types de neurones jouent un rôle privilégié dans le codage des saveurs. Le goût serait-il un sens analytique, où chaque qualité gustative serait distincte, ou bien un sens synthétique, où une combinaison de stimulus constituerait une saveur unique ? Si l'on parvient à identifier la relation entre l'activité des neurones gustatifs peu spécifiques et les sensations suscitées par des mélanges de saveurs, on aura percé les secrets du codage neuronal dans le système gustatif.

Les différents travaux, de l'isolement des protéines réceptrices des cellules gustatives à l'étude de la perception neuronale des saveurs chez l'homme, précisent petit à petit le fonctionnement du goût. Les découvertes à venir constitueront des pistes pour la mise au point de nouveaux édulcorants et pour l'amélioration des substituts du sel et des graisses, c'est-à-dire pour la conception de nourritures et de boissons plus saines et néanmoins goûteuses.

David SMITH est professeur à l'École de médecine de l'Université du Maryland. Robert MARGOLSKEE est professeur de physiologie, de biophysique et de pharmacologie à l'École de médecine du Mont-Sinaï.

Bernd LINDEMANN, *Taste Reception*, in *Physiological Reviews*, vol. 76, n° 3, pp. 718-766, juillet 1996.

Ralph NORGREN, *The Gustatory System*, in *The Human Nervous System*, sous la

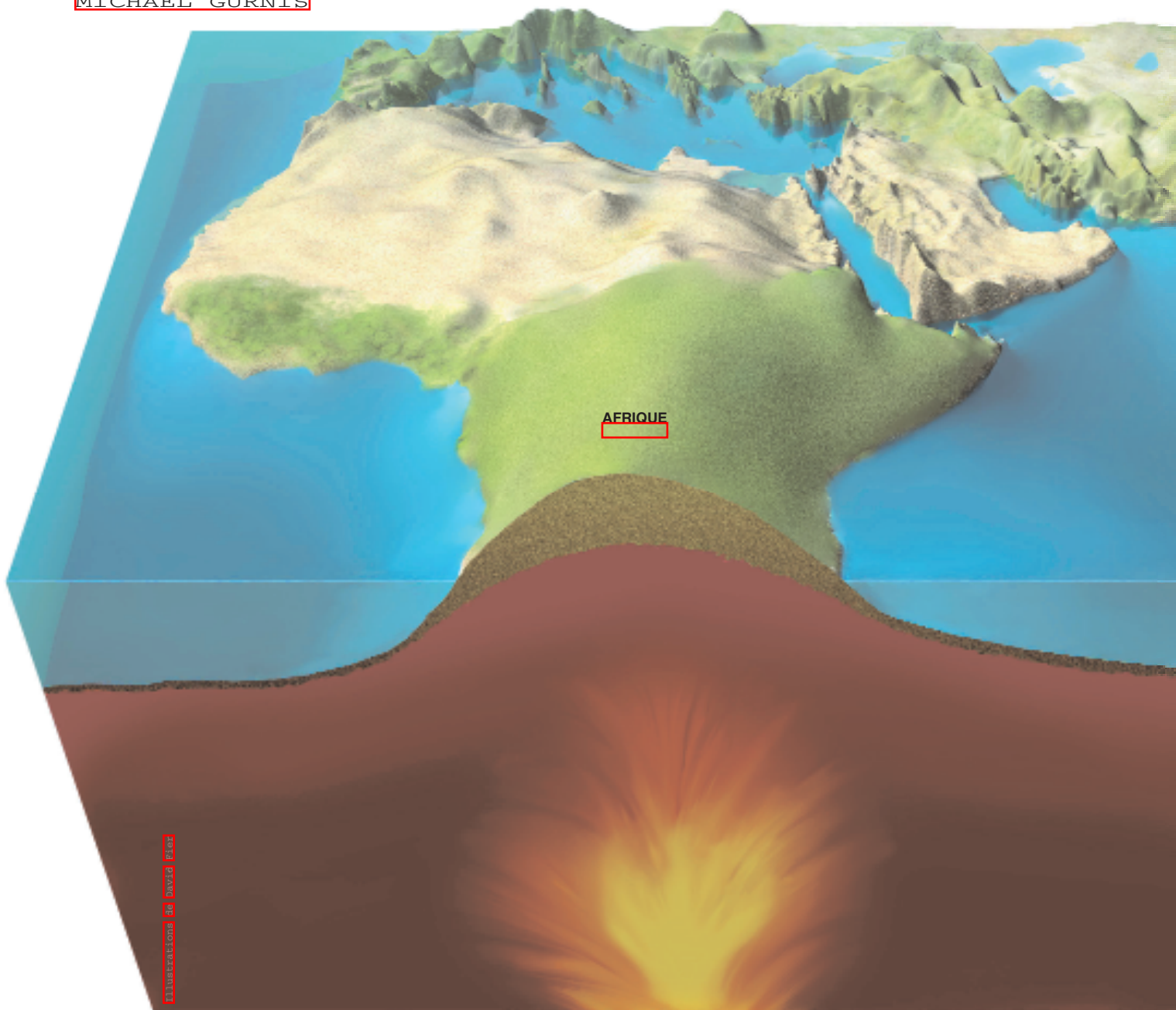
direction de George Paxinos, Academic Press, 1990.

David SMITH et Stephen ST. JOHN, *Neural Coding of Gustatory Information*, in *Opinion in Neurobiology*, vol. 9, n° 4, pp. 427-435, août 1999.

I. GILBERTSON, S. DAMAK et R. MARGOLSKEE, *The Molecular Physiology of Taste Transduction*, in *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 10, n° 4, pp. 519-527, août 2000.

La sculpture des reliefs terrestres

MICHAEL GURNIS



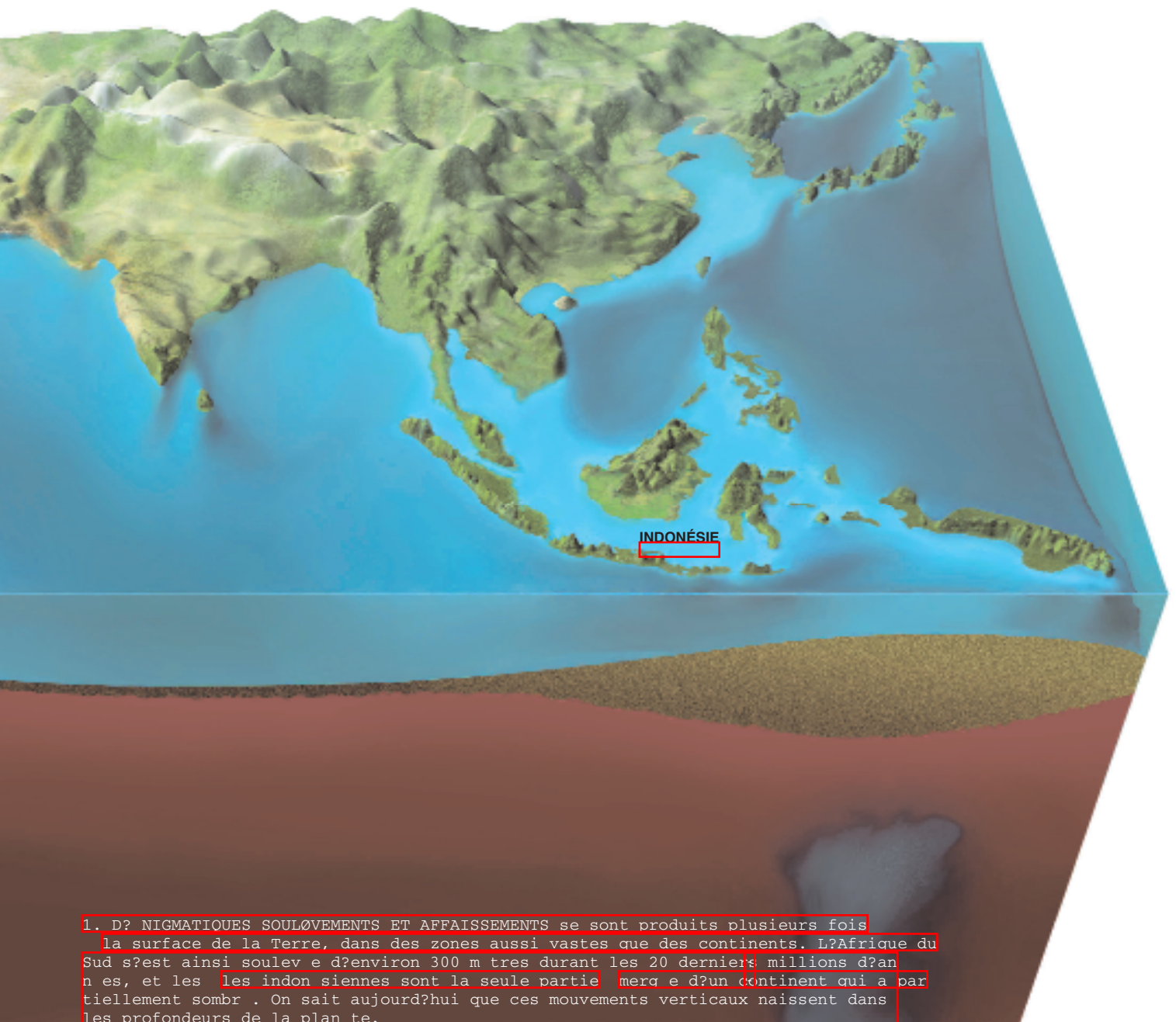
ILLUSTRATIONS DE DAVID FINE

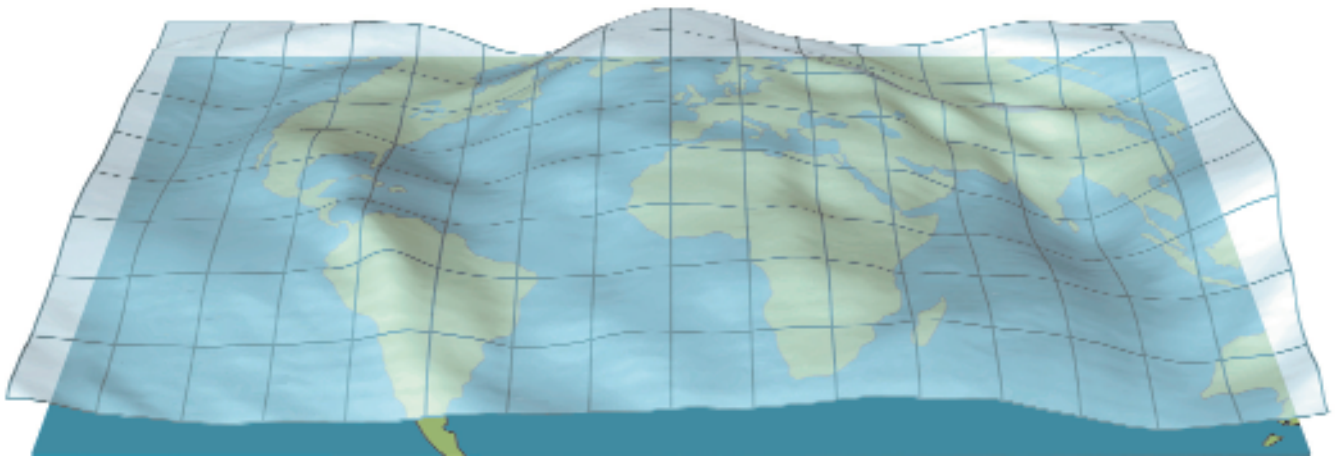
Le relief de la surface de la Terre est façonné par les violentes collisions entre les plaques tectoniques, des fragments mobiles de la croûte terrestre. La chaîne de l'Himalaya, par exemple, résulte de la collision de l'Inde et de l'Asie, et les Andes de l'enfoncement de la plaque océanique de l'océan Pacifique qui plonge sous l'Amérique du Sud. Cependant, les mouvements des plaques tectoniques n'expliquent pas tous les reliefs terrestres.

Ainsi, l'Afrique du Sud est couverte de plateaux, parmi les plus vastes du monde, qui s'étendent sur

plus de 1 500 kilomètres à plus de 1 500 mètres d'altitude. Des études géologiques ont montré que l'Afrique du Sud et le plancher océanique qui l'entoure s'élèvent lentement depuis plus de 20 millions d'années, bien qu'il n'y ait eu aucune collision tectonique depuis près de 400 millions d'années dans cette zone. Cette région, le «super-bombement» africain, subit un mouvement vertical notable, de même qu'une grande partie de la surface terrestre. Dans le passé, de vastes régions de l'Australie et de l'Amérique du Nord se sont affaissées de plusieurs centaines de mètres, pour resurgir par la suite.

Les géophysiciens pensent depuis longtemps que l'activité des profondeurs de la Terre est la cause de ces mouvements verticaux. Ils en ont cherché des preuves dans le manteau, cette couche composée de roches brûlantes qui se trouve juste sous la croûte terrestre et qui s'étend sur près de 3 000 kilomètres de profondeur, jusqu'au noyau de fer, au centre de la Terre. Le manteau est soumis à d'énormes variations de température et de pression ; elles provoquent un écoulement lent (sur des milliers d'années) de la roche solide, qui se comporte comme une mélasse. Cependant, les géophysiciens ne trouvèrent pas





2. LES VARIATIONS NATURELLES DU CHAMP DE GRAVITATION répondent aux régions où il y a une faible densité de matière dans le manteau. Une bande de la Terre sont représentées par la surface transparente, qui est un déficit de matière dans le manteau. Une bande recouvre la carte du monde. Les points les plus hauts de la gravitation relie la côte Est de l'Amérique, la gravité est supérieure à la normale, due à une masse, puis l'Antarctique. Ces variations de la force de gravitation excitent l'intérieur de la Terre. Les zones en question indiquent la localisation des principales h t rog n

d'emblée comment naissent les vastes mouvements verticaux. Aujourd'hui, des modèles informatiques, qui combinent des photographies du manteau actuel et des images reconstruites du manteau passé, expliquent pourquoi certaines régions de la surface de la Terre subissent de tels mouvements ascendants et descendants.

Les géophysiciens élucidèrent d'abord le mystère du super-bombement africain. Depuis la première moitié du XX^e siècle, ils savent que le manteau n'est pas seulement animé d'un lent mouvement de glissement, mais qu'il est malaxé et qu'il mijote comme une soupe épaisse sur le point de bouillir. Les roches les plus chaudes sont les moins denses : elles remontent lentement à la surface. Au contraire, les roches plus froides et plus denses s'enfoncent, jusqu'à ce que la chaleur qui s'échappe du noyau en fusion les chauffe suffisamment pour les faire remonter à nouveau. Ces mouvements de convection sont à l'origine du déplacement horizontal des plaques tectoniques, mais peu de géophysiciens pensaient que les forces engendrées suffisaient à soulever la surface de la planète. Des images de l'intérieur de la Terre finirent pourtant par leur donner raison.

Il y a une vingtaine d'années, des physiciens ont obtenu les premières vues en trois dimensions du manteau en mesurant les vitesses des ondes engendrées par les séismes qui se produisent à proximité de la surface du globe. Ces vitesses dépendent de la composition chimique, de la température et de la pression des roches tra-

versées. Dans les roches chaudes, de faible densité, les ondes sismiques ralentissent, et elles accélèrent dans les régions plus froides et plus denses. Les physiciens enregistrent le temps mis par ces ondes pour se déplacer de l'épicentre d'un séisme jusqu'à une station d'enregistrement. Ils en déduisent les températures et les densités à l'intérieur du globe. Région après région, ils ont ainsi cartographié les températures et les densités dans l'ensemble du manteau grâce aux vitesses sismiques enregistrées lors de milliers de tremblements de terre.

Ces cartographies, de plus en plus détaillées, ont révélé la présence de quelques formations gigantesques dans les parties les plus profondes du manteau. La plus grande d'entre elles se situe juste sous la pointe Sud de l'Afrique. Il y a environ deux ans, des sismologues ont calculé que cette énorme masse en forme de champignon se trouve à environ 1 400 kilomètres du noyau et s'étend sur plusieurs milliers de kilomètres (voir la figure 3). Ce champignon, nommé superpanache, est-il capable de repousser l'Afrique vers le haut ? Dans cette région du manteau, les ondes sismiques sont lentes : les sismologues en ont déduit qu'elle est plus chaude. Toutefois, les mesures ne fournissent la forme et la position du panache qu'à un moment donné. Si sa composition diffère de celle des roches environnantes, il pourrait être plus chaud sans remonter pour autant. Nous avons réalisé un «film» de l'évolution de ce champignon, à partir d'une simulation des phénomènes de

convection dans le manteau. Ce modèle prend en compte la forme et la densité actuelles du superpanache et la date du début de l'élévation de l'Afrique du Sud. Nous avons ainsi déterminé, en 2000, que ce champignon a une flottabilité suffisante pour remonter lentement dans le manteau et pour soulever l'Afrique.

Les géophysiciens ont élucidé le mystère du super-bombement africain assez facilement grâce à des images sismiques et à des modèles informatiques, mais les mouvements ascendants et descendants de l'Amérique du Nord et de l'Australie ont été plus difficiles à expliquer. Les géophysiciens se préoccupent de l'aspect actuel du manteau, sans chercher à expliquer comment il sculpte la surface de la Terre. Pour ce faire, ils doivent s'inspirer de la méthode des géologues, qui étudient comment la surface de la Terre a évolué au cours du temps.

Les fant mes du pass

Les géophysiciens ont commencé à comprendre le soulèvement de certaines parties de l'Amérique du Nord et de l'Australie grâce à l'étude d'un sujet apparemment sans relation : l'influence de la densité du manteau sur le champ gravitationnel de la Terre. Dans les années 1960, on pensait que la gravité serait supérieure au-dessus des régions composées de roches froides, plus denses, dont la masse est plus élevée. Or, lorsque les géophysiciens établirent la première cartographie des variations du champ

de gravitation de la Terre, ils ne trouvèrent pas que la gravité est liée à la température du manteau, du moins pas de la façon à laquelle ils s'attendaient (voir la figure 2).

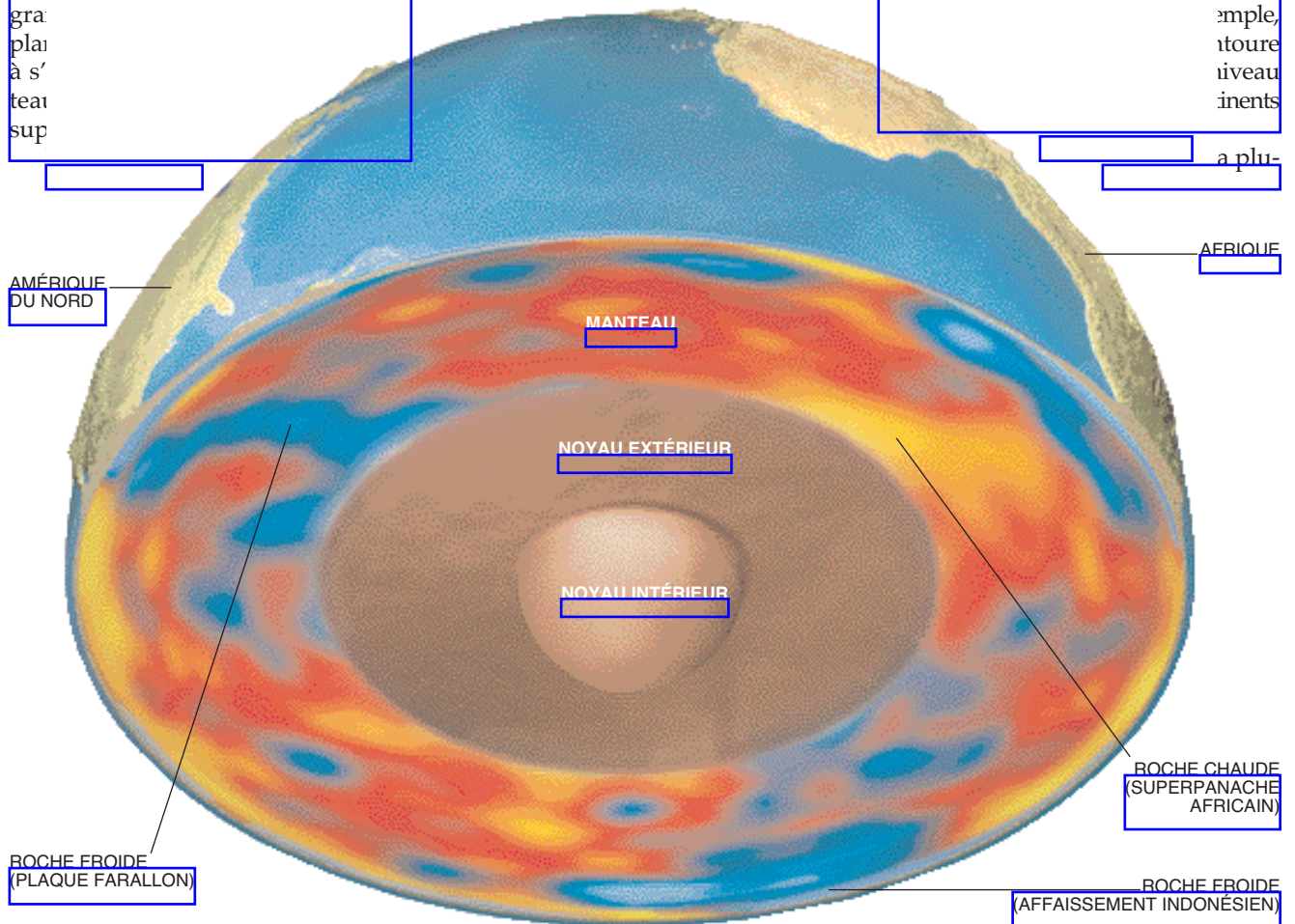
À la fin des années 1970, Clement Chase, de l'Université de l'Arizona, découvrit, au contraire, que la force de gravitation est la plus élevée, non pas au-dessus des régions froides du manteau, mais au-dessus de «points chauds», c'est-à-dire de zones volcaniques isolées. Plus surprenant encore : il observa une longue bande qui s'étend de l'Est du Canada, passe par le pôle Nord, la Sibérie et l'Inde, pour descendre jusqu'à l'Antarctique, et où la gravité est faible. Il montra que cette bande de faible gravité regroupe plusieurs zones de subduction, c'est-à-dire des zones où les plaques tectoniques océaniques replongent dans le manteau, vieilles de 125 millions d'années. Les fantômes de ces anciennes zones de subduction semblaient abaisser la force de gravitation. Pourtant, là où de

des années 1980, Bradford Hager, de l'Institut de technologie du Massachusetts, résolut ce paradoxe. Il montra que la température n'est pas l'unique facteur qui modifie la densité du manteau. En effet, le manteau, considéré sur une longue échelle de temps, est un fluide en mouvement : lorsqu'un fluide de faible densité remonte, ce qui est le cas des parties chaudes du manteau, le fluide de densité supérieure situé au-dessus de lui est repoussé vers le haut. Sous l'effet de ce lent soulèvement, des roches s'accumulent près de la surface terrestre, de sorte que la force de gravitation augmente. De même, lorsque la matière froide dense s'enfonce, elle attire vers le bas des roches qui se trouvaient auparavant près de la surface : au-dessus de cette région, la force de gravitation diminue. C'est pourquoi les fantômes des zones de subduction ont engendré une bande de faible gravité : une partie du plancher océanique froid continue de s'en-

foncer dans le manteau en attirant la surface vers le centre de la Terre. Si cette hypothèse est correcte, le manteau n'est pas simplement animé de lents mouvements horizontaux de glissement, près de la croûte terrestre, mais aussi de mouvements ascendants et descendants qui atteignent la surface : des zones qui remontent repoussent vers le haut les roches situées au-dessus et celles qui s'enfoncent entraînent vers le bas.

Les mouvements verticaux des continents

Au moment où ce mécanisme fut mis en évidence, des géologues montrèrent que les continents avaient bien subi de tels mouvements verticaux. Le niveau de la mer a changé au fil du temps, et ces fluctuations auraient dû toucher tous les continents de la même façon, mais des géologues ont montré que les variations les plus importantes seraient liées aux mouvements verticaux des continents : exemple, l'élévation du niveau de la mer autour de l'Indonésie.



3. LA CARTE DU MANTEAU a été établie grâce aux mesures sismiques qui ont parcouru la planète, après des milliers d'années. Les régions où les ondes se déplacent lentement indiquent la présence de roches chaudes, moins compactes. Sous l'Atlantique Sud et sous l'Afrique du Sud se trouve une zone de roches chaudes, un 'champignon' flottant de roches chaudes nommé 'superpanache africain'. La carte révèle également la présence de matière froide qui s'enfonce en entraînant avec elle des roches chaudes.

part des géologues continuèrent à douter que les continents se déplacent verticalement, même lorsqu'on découvrit, au début des années 1970, les premiers indices du curieux soulèvement de l'Australie. Le géologue John Veevers, de l'Université Macquarie, à Sydney, examina des affleurements de roches anciennes, à l'Est de l'Australie, et découvrit qu'au cours du Crétacé inférieur (il y a environ 130 millions d'années) une mer peu profonde avait rapidement recouvert la moitié de l'Australie, alors que d'autres continents avaient été submergés beaucoup plus lentement. Autour de ces continents, la mer a atteint son niveau maximal au Crétacé supérieur (il y a environ 70 millions d'années), mais, au même moment, l'océan se retirait déjà des

côtes australiennes. La moitié orientale de l'Australie se serait effondrée de plusieurs centaines de mètres par rapport à d'autres continents, puis se serait soulevée à nouveau avant que le niveau de la mer ait recommencé à baisser. Cette instabilité d'un continent qui s'affaisse, puis se soulève n'est qu'un épisode de l'histoire énigmatique de l'Australie. Il fut suivi d'événements encore plus étranges. Après le Crétacé, l'Australie s'affaissa de nouveau, cette fois de 180 mètres. Aucune interprétation raisonnable fondée sur le mouvement des plaques tectoniques ne semblait expliquer ces mouvements verticaux de grande ampleur.

À la fin des années 1980, l'étude d'une autre région, celle de Denver, dans le Colorado, allait apporter des

éléments pour comprendre la géophysique de l'Australie. Bien que la ville soit située à plus de 1 500 mètres d'altitude, elle est établie sur un socle rocheux plat de sédiments marins déposés au fond d'une mer peu profonde au cours du Crétacé. De vastes océans recouvraient alors la plupart des continents, et le niveau de la mer était plus élevé qu'aujourd'hui d'environ 120 mètres. L'océan n'a jamais pénétré assez loin à l'intérieur des terres pour atteindre la région de Denver, à moins que ce site ne se soit effondré de plusieurs centaines de mètres, de sorte que les eaux auraient alors pu l'envahir.

À partir de la position du littoral de l'Amérique du Nord durant le Crétacé, les géologues ont estimé que cet

COMMENT LE MANTEAU TERRESTRE SCULPTE LA SURFACE DE LA TERRE

LE CONTINENT S'ENFONCE

Le niveau de la mer monte

ZONE DE SUBDUCTION
une plaque tectonique
plonge sous une autre.

UN FRAGMENT DE
PLAQUE TECTO-
NIQUE PLONGE

MANTEAU

Sous les plaques tectoniques,
le manteau est constitué de
roches brûlantes.

M CANISMES D'AFFAISSEMENT
DES CONTINENTS

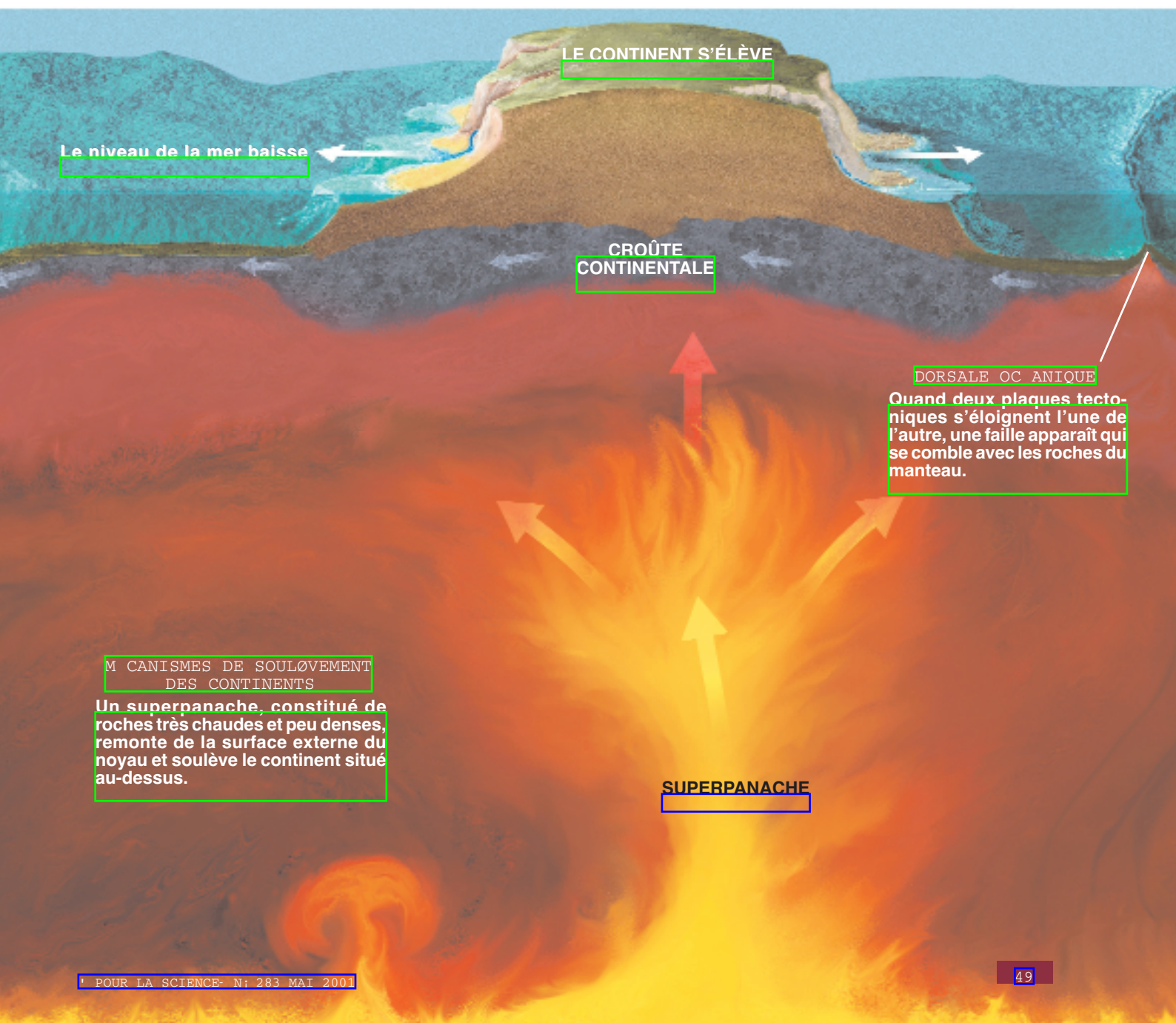
Un fragment d'une plaque tectonique en subduction commence à s'enfoncer dans le manteau, mais reste trop froid et dense pour se mélanger aux roches environnantes. À mesure que la plaque s'enfonce, un écoulement descendant de matière se crée dans son sillage et entraîne vers le bas

affaissement, puis le soulèvement qui l'a suivi auraient touché une zone de près de 1 000 kilomètres de largeur. Les tenants de la théorie de la tectonique des plaques avaient des difficultés à justifier une telle étendue : la largeur des zones concernées par les mouvements des plaques tectoniques ne dépasse pas quelque 150 kilomètres à partir de leur bord, où la plaque est assez mince pour se courber sous l'effet de la collision. Or, dans la région de Denver, le mouvement vertical s'est déroulé à plusieurs centaines de kilomètres à l'intérieur des terres, très loin de l'influence des collisions de plaques. Un mécanisme totalement différent devait en être responsable.

Une subduction de l'ancien plancher océanique dans le manteau Nord-

américain pouvait-il avoir causé l'affaissement de la région de Denver? Les géologues trouvèrent que l'effondrement de l'Amérique du Nord durant le Crétacé aurait été causé par une ancienne plaque nommée Farallon, lorsqu'elle plongea dans le manteau sous la côte Ouest. Ils montrèrent, sur une simulation numérique, que l'ancienne plaque s'enfonçait dans le manteau presque horizontalement. Lorsqu'elle commença à s'enfoncer, elle aspira, dans son sillage, l'Amérique du Nord assez profondément pour que l'océan s'y déverse. À mesure que la plaque Farallon s'enfonçait, la force d'aspiration faiblissait. La tendance du continent à flotter finit par l'emporter et l'Amérique du Nord refit surface.

La plaque Farallon a depuis longtemps disparu dans le manteau, et l'on ne disposait que d'indices géologiques de son existence, gravés dans le fond de l'océan Pacifique. À la fin des années 1980, les images sismiques n'avaient pas une résolution suffisante pour que l'on puisse détecter un petit fragment de plancher océanique qui s'enfonçait dans le manteau. En 1996, de nouvelles images du manteau ont tout changé. Deux images, obtenues grâce à des mesures sismiques différentes, révélèrent des structures quasi identiques, notamment la plaque Farallon : elle apparaissait nettement sous la forme d'un bloc arqué à quelque 1 500 kilomètres sous la côte Est des États-Unis. Elle se trouve dans la bande de faible gravité observée



LE CONTINENT S'ÉLÈVE

Le niveau de la mer baisse

CROÛTE
CONTINENTALE

DORSALE OCÉANIQUE

Quand deux plaques tectoniques s'éloignent l'une de l'autre, une faille apparaît qui se comble avec les roches du manteau.

MÉCANISMES DE SOULÈVEMENT
DES CONTINENTS

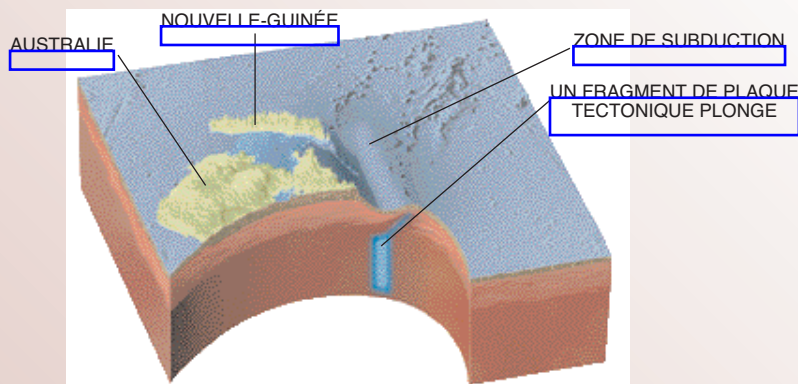
Un superpanache, constitué de roches très chaudes et peu denses, remonte de la surface externe du noyau et soulève le continent situé au-dessus.

SUPERPANACHE

Les mouvements ascendants et descendants de l'Australie

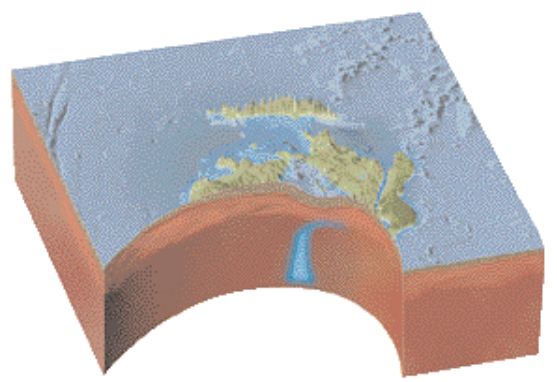
Un modèle informatique r v le comment

Le fant me d'une ancienne zone de subduction a aspiré un continent.



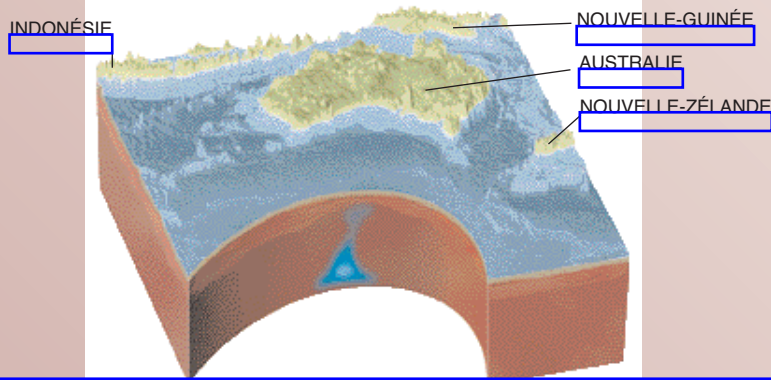
Il y a 100 millions d'années

L'Australie est bordée par une zone de subduction, une profonde tranche où les plaques tectoniques, l'Est, plongent dans le manteau. La plaque qui s'enfonce entraîne avec elle le bord oriental de l'Australie et le manteau dans son sillage. Puis la subduction s'arrête et le



Il y a 100 millions d'années

Lorsque l'Australie, qui dirige vers l'Est, passe au-dessus de la plaque tectonique qui s'enfonce, toute la partie orientale de l'Australie s'arrête d'environ 1000 mètres au-dessous du niveau de l'océan. Environ 20 millions d'années plus tard, l'aspiration vers le bas de la plaque tectonique mesure qu'elle descend plus profondément dans le manteau et



Aujourd'hui

L'Australie se situe au Nord de sa position initiale. Elle a par les déplacements des plaques tectoniques adjacentes qui ont commencé il y a environ 100 millions d'années. Le continent entier s'est déplacé par rapport son altitude maximale, entraînant vers le bas par le manteau situé sous l'Indonésie, qui, elle aussi, s'enfonce.

20 ans auparavant entre le Canada, la Sibérie, l'Inde et l'Antarctique.

Les mouvements de l'Australie

Les mouvements verticaux de l'Amérique du Nord ont résulté des phénomènes d'aspiration qu'a provoqués la subduction du plancher océanique et qui ont permis à l'océan d'envahir le fossé d'effondrement. Ces mécanismes s'appliquent-ils aux énigmatiques mouvements continentaux de l'Australie? D'après les modèles informatiques établis depuis une quinzaine d'années, le manteau est capable de soulever la surface de plusieurs centaines de mètres, ce qui suffit à causer une baisse apparente du niveau de la mer. Nous avons alors cherché dans l'histoire des plaques tectoniques des éléments qui auraient provoqué les mouvements verticaux de l'Australie. Pendant le Crétacé, l'Australie, l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Inde, l'Antarctique et la Nouvelle-Zélande étaient rassemblées en un vaste supercontinent, nommé le Gondwana, qui a existé pendant plus de 400 millions d'années, avant de se fragmenter et de former les masses continentales actuelles. Pendant presque toute cette période, une gigantesque zone de subduction où des plaques océaniques froides plongeaient dans le manteau entourait le Gondwana. Nous avons alors émis l'hypothèse que cette zone de subduction, qui entoura le Gondwana pendant des centaines de millions d'années, aurait provoqué les mouvements ascendants et descendants de l'Australie.

Pour comprendre comment la plaque froide s'est comportée dans le manteau lorsque le Gondwana s'est disloqué sur une période de plusieurs millions d'années, nous avons simulé l'influence du manteau sur l'Australie au fil du temps. Nous connaissions la position initiale de l'ancienne zone de subduction, l'histoire des mouvements horizontaux des plaques dans cette région et les propriétés du manteau sous-jacent, notamment une estimation de sa viscosité. Nous avons ainsi élaboré un scénario des mouvements de l'Australie qui correspond bien aux observations (voir le schéma ci-contre).

La simulation commençait il y a 130 millions d'années, avec la sub-

duction du plancher océanique sous l'Est de l'Australie. Lorsque cette dernière se détacha du Gondwana, elle passa au-dessus de la plaque froide en subduction, qui aspira la plaque australienne vers le bas. Le continent remonta lorsqu'il poursuivit sa migration vers l'Est en s'écartant de la plaque. Nous avons résolu l'énigme du mouvement de l'Australie durant le Crétacé, et nous avons, à l'aide d'un autre modèle, confirmé que l'Australie s'était bien déplacée vers le Nord en direction de l'Indonésie après le Crétacé, et qu'elle s'est affaissée d'environ 180 mètres. D'après ce modèle, l'Indonésie est aujourd'hui aspirée vers les profondeurs plus que toute autre région du monde, parce qu'elle se situe à l'intersection d'énormes systèmes de subduction dans les océans Pacifique et Indien. À mesure que l'Indonésie s'enfonce, elle entraîne l'Australie avec elle. L'Indonésie est un vaste continent submergé, dont seuls les pics montagneux les plus élevés émergent.

L'Indonésie et l'Afrique sont dans des situations opposées : l'Indonésie est tirée vers le bas, tandis que l'Afrique est repoussée vers le haut. Ces mouvements proviennent de modifications qui se produisent dans le manteau depuis quelques centaines de millions d'années et qui sont liés à l'existence passée du Gondwana. L'immense bande de faible gravité découverte il y a une trentaine d'années résulte de la subduction (qui se poursuit) des plaques tectoniques de la vaste zone qui entourait le continent originel. Au centre du Gondwana se trouvait l'Afrique du Sud. Cette région n'a pas subi le refroidissement lié aux plaques qui plongeaient dans le manteau, car elle en était trop éloignée. Ce phénomène expliquerait pourquoi le superpanache chaud remonte aujourd'hui des profondeurs du manteau à cet endroit.

En conclusion, les mouvements du manteau sculptent la surface de la pla-

nète de différentes façons. Ils contribuent au mouvement horizontal des plaques tectoniques, mais ils provoquent également le soulèvement ou l'affaissement des continents. On a découvert que l'écoulement dans le manteau profond se poursuit très longtemps après le mouvement horizontal des plaques tectoniques. Les positions d'anciennes lisières de plaques exercent encore, des millions d'années après leurs déplacements, un effet sur la façon dont la surface est sculptée.

La convection dans le manteau et les mouvements des plaques tectoniques sont sans cesse mieux décrits. Lorsque la convection du manteau change, le champ gravitationnel se modifie, et nous tentons de suivre ces changements. La détection des variations temporelles du champ gravitationnel de la Terre fait partie d'une mission spatiale germano-américaine nommée GRACE, dont le lancement est prévu en juin. Deux vaisseaux en orbite vont cartographier les variations du champ de gravitation terrestre tous les 15 jours, et nous espérons en déduire les lents mouvements verticaux associés à la convection dans le manteau. Un autre projet, nommé USArray devrait nous fournir bientôt des images sismiques de haute résolution : 400 sismographes itinérants fourniront des images de l'intérieur du manteau, sur les premiers milliers de kilomètres sous les États-Unis, et avec une résolution de 80 kilomètres.

À mesure que ces projets donne-ront des images et des informations précises sur le manteau, et que les ordinateurs disponibles seront de plus en plus puissants, nous comprendrons de mieux en mieux la dynamique de l'intérieur de la Terre. D'ores et déjà, en considérant la plus vaste région de la planète, c'est-à-dire le manteau, comme un gros morceau de roche qui a sa propre histoire, les géologues ont élu-

Michael GURNIS est géophysicien à l'Institut de technologie de Californie.

M. GURNIS et al, *Dynamics of Cretaceous Vertical Motion of Australia and the Australian-Antarctic Discordance*, in *Science*, vol. 279, p. 1499, 1998.

G. DAVIES, *Dynamics Earth : Plates, Plumes and Mantle Convection*. Cambridge university press, 2000.

M. GURNIS et al, *Constraining Mantle Density Structure Using Geological Evidence of Surface Uplift Rates : the Case of the African Superplume*, in *Geochimistry, Geophysics, Geosystems*, vol.1, N° 1999GC000035, 2000.

Site web du groupe de recherche de M. GURNIS : www.gps.caltech.edu/~gurnis/geodynamics.html.

cidé l'origine de certains bouleversements géologiques qui modèlent la surface de la Terre.

Une histoire de lézards

JONATHAN LOSOS

Sur quelques îles des Caraïbes, l'évolution a répété plusieurs fois la même histoire.

Dans les forêts de Cuba, de Haïti, de la République dominicaine, de Porto-Rico et de la Jamaïque, dont l'ensemble forme les Grandes Antilles, les anoles, des petits lézards du genre *Anolis*, sont omniprésents : courts ou longs, à reflets bleus, bruns, verts ou gris, trapus ou minces, bons ou piètres sauteurs, effrontés ou prudents, on les trouve à la cime des arbres, sur les troncs, dans les feuilles mortes, jusque sur les barrières, dans les fleurs... L'incroyable diversité de ces lézards fait d'eux un objet d'étude fascinant. Cette infinité de formes et d'habitats est peut-être la clé d'une énigme biologique : pourquoi l'évolution prend-elle une direction plutôt qu'une autre ?

Tout visiteur de ces îles constate que les espèces des anoles n'ont pas le même habitat. Par exemple, une espèce n'est présente que dans l'herbe, une autre, seulement dans les buissons, une troisième, à la base des troncs d'arbres. Ces trois espèces n'ont pas la même morphologie. Le lézard des herbes est élancé, avec une longue queue, celui des buissons est mince, mais avec des pattes épaisses, et le lézard des arbres est trapu avec de longues pattes.

Il était plusieurs fois...

Toutefois, le caractère exceptionnel des anoles ne tient ni à la coexistence d'espèces morphologiquement distinctes, ni à leur habitat, car les pinsons des îles Galapagos, chers à Darwin, et les lémuriers de Madagascar sont d'autres animaux qui se sont adaptés à différentes niches écologiques disponibles. La caractéristique de ces lézards tient plutôt à la présence, sur chacune des îles, des mêmes types de lézards adaptés à un habitat particulier. L'espèce qui vit sur les buissons de Porto Rico est identique et se comporte de la même façon que celle qui occupe le même type d'habitat sur chacune des autres îles. Sur les quatre îles, on trouve une espèce de lézards qui colonise la base des arbres, une espèce de lézards arboricoles et une espèce géante habituée à la canopée, c'est-à-dire la cime des arbres. Par ailleurs, les lézards inféodés à l'herbe vivent sur trois des îles, et les lézards inféodés aux troncs, dont le corps est plus plat et la queue plus courte que chez les lézards de la base des arbres, sur deux des îles.

Les zoologistes connaissent d'autres espèces qui vivent dans des niches écologiques similaires et dans différentes parties du monde : le chat marsupial et le loup marsupial d'Australie





Anolis garmani

Anolis allison

Anolis distichus

Anolis valencienni

1. LES ANOLES DES ILES CARAIBES forment un groupe varié. Environ 110 espèces habitent dans les Grandes Antilles : chacune occupe sa propre niche écologique, de la canopée avec ses lézards géants jusqu'aux herbes qui abritent l'anole à longue queue.

sont, morphologiquement et écologiquement, proches de leurs homologues félins et canins des autres continents. En revanche, l'existence de communautés composées du même assortiment de spécialistes écologiques est sans équivalent.

L'existence de telles communautés indique qu'un «élément» a guidé l'évolution des lézards pour qu'elle suive en plusieurs endroits la même voie : un processus déterministe a imposé l'évolution pour qu'elle se reproduise plusieurs fois, identique à elle-même. Nous avons testé cette idée, et particulièrement les trois hypothèses sur lesquelles elle est fondée : les lézards spécialisés ont-ils eu une évolution indépendante sur chaque île ? Si oui, quels sont leurs ancêtres ? Les lézards sont-ils adaptés à leurs niches écologiques ? Des processus écologiques et évolutifs analogues existent-ils sur chacune des îles ? Au cours des 20 dernières années, la panoplie des outils mis à la disposition des biologistes de l'évolution s'est accrue : ainsi, par le biais de séquençages de certaines fractions d'ADN, de collectes de fossiles et d'observations sur le terrain, nous avons répondu à ces questions et, aujourd'hui, l'histoire des anoles des Grandes Antilles est mieux connue.

De l'ADN, des arbres et des fossiles

Plusieurs hypothèses expliquent la présence d'espèces analogues sur des îles différentes (voir la figure 3). Une espèce ancienne s'est peut-être adaptée à une niche écologique particulière sur une île, puis se serait propagée, transportée par les flots ou par un ouragan, et aurait ainsi colonisé d'autres îles. Ou bien, cet ancêtre spécialisé aurait évolué à une époque où les îles étaient reliées, comme ont pu l'être certaines des îles Caraïbes : après la séparation des îles, les populations de lézards, alors isolées, seraient devenues des espèces distinctes, mais auraient conservé les caractères de leurs ancêtres. Dans ces deux histoires, une seule spécialisation s'est produite dans chaque niche. Toutefois, chaque espèce spécialiste d'un habitat a pu apparaître indépendamment, ou de façon convergente, sur chacune des îles des Grandes Antilles.

Pour découvrir quelle est la bonne option, nous avons examiné l'arbre

phylogénétique des anoles des Caraïbes, établi après avoir comparé certaines séquences d'ADN chez les différentes espèces. Dans l'hypothèse d'une évolution unique, les spécialistes analogues présents sur les différentes îles seraient étroitement apparentés. Dans le cas de plusieurs évolutions indépendantes et convergentes ayant eu lieu sur les différentes îles, des spécialistes analogues ne seraient pas étroitement apparentés : sur une même île, une espèce spécialisée aurait davantage de liens de parenté avec les autres types de lézards de cette île (quelle que soit leur niche écologique) qu'avec des utilisateurs de niches analogues sur d'autres îles. Par exemple, un lézard des buissons de la Jamaïque aurait plus de points communs génétiques avec des lézards jamaïcains de la canopée ou de la base des arbres qu'il n'en aurait avec un lézard des buissons de Cuba.

Malgré quelques controverses, les biologistes s'accordent à dire que deux espèces sont d'autant plus proches que leurs ADN ont plus d'analogies. Par exemple, l'ancêtre commun des hommes et des chimpanzés, dont des génomes se ressemblent beaucoup, est beaucoup moins vieux que l'ancêtre commun des hommes et des babouins, dont les ADN présentent moins d'analogies.

Ainsi, des gènes de plus de 50 espèces d'anolés ont été séquencés. Les résultats sont sans équi-

voque : les spécialistes d'un habitat sur une île ne sont pas étroitement apparentés aux autres spécialistes du même habitat sur les autres îles. Ainsi, les espèces spécialistes sont apparues indépendamment sur chaque île, et des communautés analogues se sont développées indépendamment sur les différentes îles.

L'analyse des fossiles apporte souvent des preuves de ce résultat, mais, à l'exception des spécimens relativement récents (quelques milliers d'années seulement), les fossiles d'anolés sont très rares : il en existe peut-être une dizaine, tous inclus dans de l'ambre. Ces lézards se sont probablement englués dans la résine suintant des arbres, lesquels ont fini par tomber sur le sol et par s'y fossiliser. Bien que la plupart des fossiles pris dans l'ambre soient commercialisés et qu'ils ne soient plus accessibles aux évolutionnistes, nous avons trouvé deux spécimens sur Hispaniola (la réunion d'Haïti et de la République dominicaine), qui datent du miocène, soit il y a environ 20 millions d'années. Ils ressemblent beaucoup aux



COURTESY OF THE AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY

2. SUR CHAQUE ÎLE DES GRANDES ANTILLES (Cuba, Porto-Rico, la Jamaïque et Hispaniola, qui associe Haïti et la République dominicaine), vit un anole qui s'est adapté à la vie dans les buissons.



espèces spécialistes actuelles de la canopée : la spécialisation des anoles selon l'habitat est ancienne.

Une telle évolution convergente indique que les mêmes caractères sont apparus parce que les animaux étaient confrontés aux mêmes contraintes environnementales. Il s'agit de comprendre pourquoi un caractère donné peut être privilégié en certaines circonstances. Prenons, par exemple, la longueur de la patte.

Souvent patte varie...

Les anoles qui vivent dans les buissons ont des pattes très courtes, tandis que ceux de la base des troncs d'arbres sont pourvus de pattes très longues. Comment la longueur des pattes des lézards a-t-elle évolué pour s'adapter aux surfaces de déplacement ? Pour répondre à cette question, nous devons, d'une part, déterminer les conséquences de la différence de la

longueur des pattes sur leur fonction et, d'autre part, établir comment ces différences sont liées au comportement et au choix de l'habitat.

Pour obtenir ces informations, des travaux en laboratoire et sur le terrain étaient nécessaires. En laboratoire, nous avons étudié les performances des pattes en mesurant notamment la rapidité d'un lézard à la course et ses aptitudes à s'agripper et à sauter.

Pour enregistrer la vitesse d'un lézard, nous avons construit une piste étroite de deux mètres de longueur et équipée tous les 25 centimètres de faisceaux infrarouges et de détecteurs. Placé à une extrémité de la piste, le lézard se précipite vers le sac qui lui sert de refuge et que l'on place à l'autre extrémité. Pour déterminer l'aptitude à s'agripper, nous avons placé des lézards sur une plaque verticale munie de capteurs qui enregistrent la force que le lézard déploie sur chaque coussinet des doigts pour se maintenir en place quand un expérimentateur tire l'animal vers le bas. Pour évaluer la capacité de saut, on place les lézards sur une plaque située à 30 centimètres du sol et on les fait sauter en leur tapant sur la queue : nous mesurons alors la longueur du saut.

Ces travaux ont confirmé que l'aptitude des lézards à courir ou à sauter dépend de la longueur relative de leurs membres postérieurs : les lézards à longues pattes font de plus grandes enjambées et atteignent des

vitesse supérieures au moment du saut. En outre, de plus larges coussinets sous les doigts améliorent la capacité de s'agripper.

Toutefois, ces travaux ont aussi ménagé quelques surprises ; notamment, la longueur des membres postérieurs n'est pas le seul facteur qui influe sur la vitesse, mais la surface sur laquelle l'animal court intervient également. L'avantage conféré par les longues pattes diminue quand la surface est étroite, par exemple quand l'animal court sur des brindilles : sur des surfaces planes, *Anolis gundlachi*, le lézard portoricain à longues pattes, spécialiste de la base des troncs, court deux fois plus vite qu'*Anolis valencienni*, le lézard jamaïcain à courtes pattes, spécialiste des buissons. Cependant, la vitesse d'*Anolis gundlachi* décroît rapidement à mesure que la surface devient étroite. Sur des supports étroits (dont le diamètre est de l'ordre du centimètre), l'espèce la plus rapide sur surface plane ne court pas plus vite que l'autre, malgré la différence de la longueur des pattes. Tandis que l'anoles des buissons a le pied très sûr sur toutes les surfaces quelle que soit leur largeur, l'espèce à longues pattes trébuche ou tombe fréquemment sur des surfaces étroites.

Ces résultats confirment que les différences de morphologie résultent d'une adaptation à des niches écologiques distinctes. Que deviennent ces capacités, observées en laboratoire, dans le milieu naturel ? Confèrent-elles un réel avantage ? En observant les anoles dans la nature, on a montré que leurs sauts y sont toujours nettement plus courts qu'en laboratoire. Aussi, l'allongement des pattes n'a-t-il probablement pas constitué une réponse à un processus qui aurait sélectionné l'aptitude à sauter.

En revanche, les anoles courent souvent à leur vitesse maximale, surtout face à leurs prédateurs. Les espèces qui courent le plus souvent sont celles qui ont les plus grandes pattes. Les espèces à pattes courtes courent rarement et ont adopté une autre stratégie de défense : quand elles sont en chasse ou, au contraire, qu'elles sont traquées par un prédateur, elles se déplacent furtivement pour éviter d'être repérées. Une telle lenteur requiert un pied assuré, car un lézard qui trébuche attirerait davantage l'attention et, une fois repéré, s'échapperait difficilement.



Plasticité et sélection naturelle

L'évolution se produit le plus souvent sur une échelle de temps trop longue pour que l'homme l'observe. Pourtant, à la fin des années 1970, nous avons eu un aperçu de la sélection naturelle à l'œuvre, c'est-à-dire que nous avons observé une créature s'adapter à un nouvel habitat et développer une spécialisation, par exemple l'acquisition d'une sûreté du pas sur de courtes pattes. L'*Anolis sagrei*, l'anole brun, a alors été introduit sur 20 très petites îles de l'archipel des Bahamas, où les anoles étaient absents. Contrairement à ce que prévoyaient les expérimentateurs, les populations introduites ont survécu et ont même prospéré sur toutes les îles, à l'exception des plus petites. On pensait alors que les lézards étaient absents de ces petites îles à cause d'un ouragan qui y aurait détruit toutes les populations de lézards.

En 1991, nous avons constaté que les lézards introduits s'étaient adaptés aux différents types de végétations (sur certaines îles, les gros arbres prédominent, sur d'autres ce sont plutôt des buissons rabougris). En accord avec nos études sur les anoles des Grandes Antilles, nous avons constaté que les anoles des îles qui disposaient de surfaces larges pour se déplacer avaient acquis des pattes plus longues de plusieurs millimètres que les lézards des îles dont les supports étaient étroits.

Ainsi, ces populations s'étaient rapidement adaptées aux différents environnements.

Toutefois, on pouvait expliquer autrement l'allongement supérieur des pattes lorsque les lézards marchent sur des surfaces larges. Ce phénomène, nommé plasticité phénotypique, explique pourquoi des individus génétiquement identiques ont parfois des morphologies différentes. Des études menées chez des mammifères et des oiseaux ont montré que des pressions et des contraintes modifient le développement des os. Par exemple, chez les joueurs de tennis professionnels, le bras «joueur» est plus long que l'autre. L'intense activité – dissymétrique – de ces joueurs, notamment pendant leur jeunesse, impose des différences de croissance des bras.

Afin de vérifier si l'environnement peut modifier la longueur des pattes des lézards, nous avons élevé de jeunes lézards *Anolis sagrei* dans deux environnements : certains vivaient sur des brindilles de bois de moins de un centimètre de largeur, d'autres sur des planches de huit centimètres de largeur. Nous avons constaté avec étonnement que les pattes des lézards élevés sur les planches larges étaient plus longues que celles des lézards qui avaient grandi sur les brindilles étroites. Toutefois, ces différences n'étaient pas aussi marquées qu'entre les lézards des buissons et ceux de la base des troncs qui vivent sur les Grandes Antilles.

Ainsi, les différences observées au sein des populations introduites aux Bahamas résulteraient d'une plasticité phénotypique. Pour le confirmer, nous devrions élever dans des conditions strictement identiques des lézards issus de populations dotées de membres de longueurs différentes : si les différences observées dans la nature n'apparaissent pas chez ces individus captifs élevés dans des conditions identiques, la plasticité phénotypique ne devrait pas se manifester.

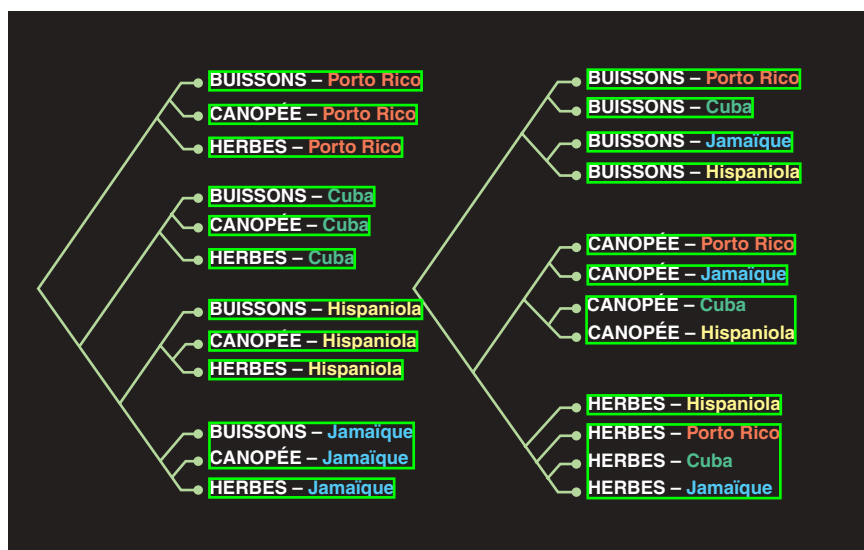
Récemment, les biologistes ont commencé à admettre que la plasticité phénotypique participerait à l'évolution. En «produisant» des morphologies adaptées à des environnements différents, la plasticité phénotypique autorise une population à s'adapter à un habitat où, sans cet atout, elle n'aurait pas survécu.

Ces différences n'ont pas une origine génétique et ne résultent pas de mécanismes évolutifs, mais des mutations aléatoires renforcent parfois l'adaptation des individus à ce nouvel habitat. Sur une période de temps suffisante, ces mutations, d'origine génétique, et la sélection naturelle produiront des espèces nettement différentes et mieux adaptées que la forme ancestrale. Dans ce contexte, la plasticité phénotypique serait un élément favorable à l'apparition de nouvelles espèces. Cette hypothèse, émise dans les années 1950, mérite sans doute d'être approfondie.

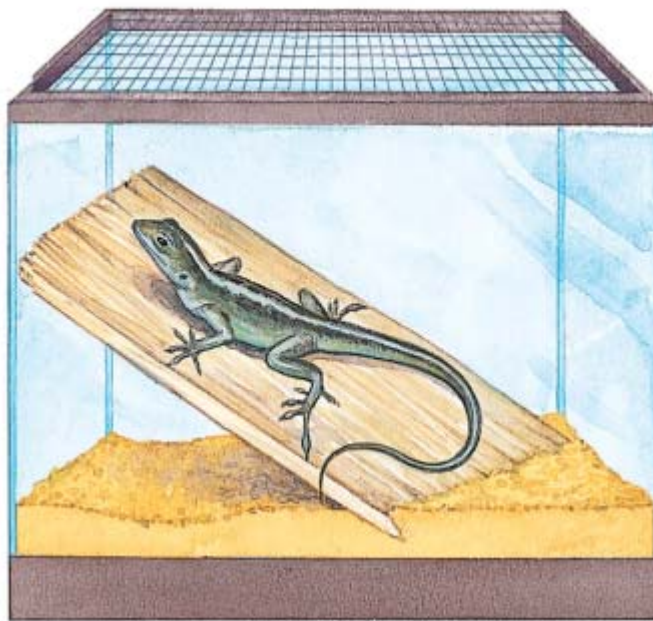
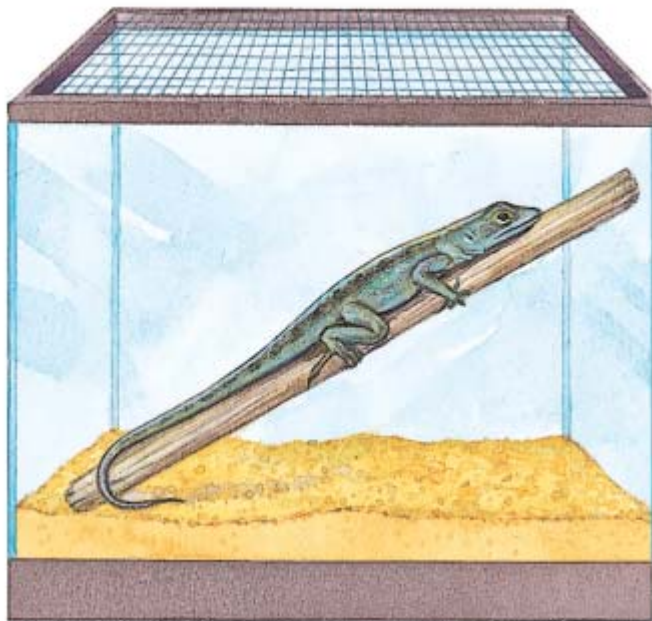
Une île est une île

Pour parfaire l'histoire des lézards des Grandes Antilles, il reste à se demander pour quelles raisons les spécialisations ont eu autant d'importance. Selon une première explication, deux espèces ancestrales non spécialisées vivent à proximité l'une de l'autre, peut-être car l'une d'elles a colonisé l'île alors que l'autre était déjà installée. Ces deux espèces étaient sans doute en concurrence, car la plupart des espèces d'anoles sont omnivores : les lézards mangent des insectes, des fruits et des petits vertébrés. En se spécialisant dans des habitats distincts et en mangeant des proies différentes, elles ont limité la compétition. Puis, la sélection naturelle a privilégié des caractéristiques qui ont amélioré l'adaptation de chaque espèce à son propre habitat.

S'il est impossible de mettre en évidence une compétition entre des anoles



3. CES DEUX ARBRES PHYLOGENETIQUES expliquent chacun la proximité génétique des anoles. Selon le premier (à gauche), chaque type d'espèce spécialisée est le fruit d'évolutions répétées, sur les différentes îles. Selon le second (à droite), chaque espèce spécialisée n'a évolué qu'une fois pour l'ensemble des diverses îles. Des analyses d'ADN indiquent que la première hypothèse est la plus vraisemblable.



4. LA PLASTICITE PHENOTYPIQUE explique les différentes morphologies des lézards *Anolis sagrei* selon les supports sur lesquels ils se développent. Avec des perchoirs étroits, les pattes postérieures

des lézards sont plus courtes de quelques millimètres que celles des lézards qui se déplacent sur de larges planches (les dessins ne sont pas à la même échelle).

ancestraux qui aurait abouti à la spécialisation, on peut montrer qu'une telle concurrence existe entre les espèces actuelles. La comparaison de populations d'anoles bruns aux Bahamas montre que, dans les zones où cette espèce est la seule présente, elle se perche plus haut et occupe un nombre de sites plus importants que dans les zones où elle coexiste avec d'autres espèces d'anoles. La concurrence avec d'autres espèces, plus arboricoles, contraint peut-être l'anolé brun à réduire son habitat, mais on ne peut exclure que l'habitat lui-même diffère.

Des expériences sur le terrain nous ont aidé à répondre à cette question. Dans la forêt portoricaine humide, nous avons capturé et retiré de trois parcelles carrées de 20 mètres de côté tous les individus de l'espèce *Anolis gundlachi*, les lézards à longues pattes qui vivent à la base des arbres. Puis, nous avons mesuré la densité de population d'une seconde espèce, *Anolis evermanni*, l'anolé d'Evermann, spécialiste de la canopée. Après huit semaines, la densité de population d'*Anolis evermanni* était supérieure dans les parcelles d'où nous avons retiré *Anolis gundlachi* que dans les parcelles témoins où *Anolis gundlachi* avait été laissé.

Nous avons obtenu des résultats comparables en introduisant dans quelques îles minuscules des Bahamas sans lézards des populations d'*Anolis carolinensis*, l'anolé vert, qui vit dans la canopée. Nous avons alors comparé

son comportement, seul, par rapport à celui qu'il a dans les îles où il coexiste avec l'anolé brun : l'anolé vert se reproduit davantage quand il n'est pas en concurrence avec l'anolé brun. Tous les résultats confirment que les espèces qui vivent à proximité l'une de l'autre se nuisent.

Bien que d'autres mécanismes soient plausibles pour expliquer la spécialisation de l'habitat (par exemple, une espèce d'anoles pourrait être un prédateur pour une autre espèce), l'hypothèse la plus vraisemblable est que la concurrence pour les ressources alimentaires aboutit à la spécialisation de l'habitat (plus les interactions, telle la rivalité pour la nourriture, entre espèces sont fortes, plus ces espèces sont, écologiquement et morphologiquement, semblables).

À l'instar d'une enquête policière, les indices qui nous aident à percer les secrets de l'évolution existent, mais

aucun n'est décisif. En outre, dans le cas de lézards des Caraïbes, nous restons confrontés à une question : pourquoi diverses espèces se ressemblent-elles à ce point ? La pauvreté de ces îles – la biodiversité y est inférieure à celle des régions toutes proches d'Amérique centrale – est peut-être un élément de réponse. Les anoles se sont répandus dans des écosystèmes où les prédateurs et les compétiteurs étaient peu nombreux. Les environnements étant quasi identiques sur les différentes îles et les influences extérieures réduites, l'évolution a sans doute suivi les mêmes chemins en plusieurs endroits. C'est également le cas du groupe des poissons cichlidés dans les lacs de l'Afrique de l'Est.

Cependant, une telle convergence évolutive, en différents endroits, reste l'exception. Ce mystère de l'histoire naturelle reste... presque entier.

Jonathan LOSOS est professeur de biologie à l'Université de Washington

Jonathan LOSOS, Kenneth WARHEIT et Thomas SCHOENER, *Adaptive Differentiation Following Experimental Island Colonization in Anolis Lizards*, in *Nature*, vol. 387, pp. 70-73, mai 1997.

Duncan IRSCHICK et Jonathan LOSOS, *A Comparative Analysis of Ecological Significance of Maximal Locomotor Performance in Caribbean Anolis Lizards*, in *Evolution*, vol. 52, n° 1, pp. 219-226, février 1998.

Jonathan LOSOS, Todd JACKMAN, Allan LARSON, Kevin de QUEIROZ et Lourdes RODRÍGUEZ SHETTINO, *Contingency and Determinism in Replicated Adaptive Radiations of Island Lizards*, in *Science*, vol. 279, pp. 2115-2118, mars 1998.

Manuel LEAL, Javier RODRÍGUEZ-ROBLES et Jonathan LOSOS, *An Experimental Study of Interspecific Competition between two Puerto Rican Anolis Lizards*, in *Oecologia*, vol. 117, n° 1/2, pp. 273-278, novembre 1998. <http://biosg.wustl.edu/~lososlab/>

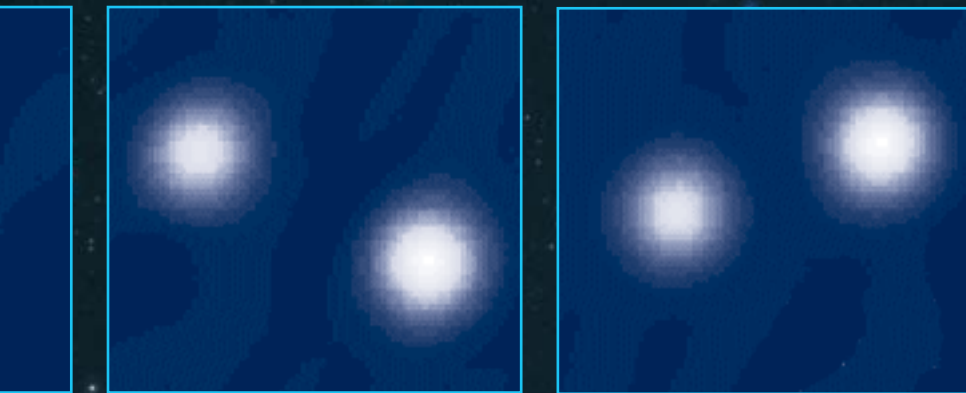
La détection des étoiles



Malgré les turbulences atmosphériques, les nouveaux interféromètres optiques au sol révèlent cent fois plus de détails que le télescope spatial Hubble.

par interférométrie

ARSEN HAJIAN • THOMAS ARMSTRONG



1. Le premier système double jamais observé par un télescope classique fut Mizar, l'étoile du milieu de la queue de la Grande Ourse. Bien que les deux compagnes qui composent Mizar (Mizar A et Mizar B) soient séparées de moins de 0,004 degré sur la voûte céleste, chacune d'elles est aussi un système double. En 1996, le nouvel interféromètre optique NPOI a mis en évidence les deux étoiles qui constituent Mizar A, produisant à cette occasion une image dont la résolution dépassait tout ce qui avait été obtenu en astronomie optique jusqu'alors. Ces quatre images montrent Mizar Aa et Mizar Ab qui décrivent une demi-orbite autour de leur centre de gravité commun.

Christian A. Hume, USNO, NRAO, Optical Interferometer Project

Observées à l'œil nu, les étoiles sont des points scintillants, et elles restent tout aussi petites quand on les observe à la jumelle. Même si certains astres géants pourraient englober le Système solaire d'un seul coup, aucune étoile n'est assez proche pour que nous la voyions autrement que sous la forme d'un point lumineux.

Aujourd'hui, grâce à l'interférométrie, une technique proposée il y a 130 ans, la résolution a été notablement améliorée, puisqu'à la place d'un point, on distingue un disque. Plutôt que d'observer le ciel avec des jumelles ou même avec un télescope, on a recours à un écran d'ordinateur relié à un dispositif nommé interféromètre optique. Depuis une cinquantaine d'années, les astronomes emploient avec succès ce type de dispositif dans le domaine des ondes radio ; ils ont ainsi mis en évidence la structure des galaxies lointaines et celle des quasars. Dans le domaine des longueurs d'onde visibles et infrarouges, il n'y a qu'une quinzaine d'années que les progrès techniques nécessaires ont été réalisés. Certes, le télescope spatial Hubble n'a pas son pareil pour photographier un objet peu lumineux, mais si l'étoile est brillante, les nouveaux interféromètres optiques au sol révèlent cent fois plus de détails que lui.

Aujourd'hui, l'interférométrie optique passe du rang de technique de laboratoire à celui de technique d'observation. Les interféromètres de dernière génération fourniront des images des systèmes à étoiles multiples, de la surface des étoiles, des enveloppes ou disques de matière en orbite autour d'étoiles, et même de l'ombre des planètes qui passent devant une étoile. D'ici peu, les astronomes disposeront d'un riche catalogue d'images d'un nouveau type, notamment des films où l'on verra des étoiles en rotation qui exhibent des taches stellaires (l'équivalent des taches solaires). Ainsi, nous comprendrons mieux la naissance des étoiles, leur structure, leur activité, leur évolution et leur mort.

Dans un interféromètre, deux signaux optiques presque identiques sont combinés pour produire des interférences, qui fournissent des informations inaccessibles avec un seul des

deux signaux. Ainsi, quand on combine les signaux reçus d'un même astre par deux télescopes distincts, on observe des franges sombres et brillantes. Les astronomes déduisent la structure spatiale de l'objet observé de l'espacement de ces franges et de la façon dont elles évoluent quand les télescopes sont déplacés. Ils obtiennent ainsi une bien meilleure résolution angulaire qu'avec une image unique de l'objet. Cette technique de cartographie d'un objet céleste est nommée interférométrie spatiale. Il existe d'autres types d'interférométrie, grâce auxquels les astronomes déterminent, par exemple, des caractéristiques comme le spectre lumineux d'un astre.

L'interférométrie spatiale dans le visible est une méthode de mesure complexe, qui nécessite des techniques de pointe, notamment sur le plan informatique. Tout d'abord, examinons comment fonctionnent les interféromètres, quels ont été les obstacles à surmonter pour les mettre au point, et quelles sont les observations que cette méthode rend aujourd'hui possibles.

L'atmosphère, une difficulté technique

Tout astronome désireux d'obtenir la photographie détaillée d'une étoile est confronté à deux difficultés : la taille limitée de son télescope et la turbulence de l'atmosphère terrestre. Considérons la question la plus élémentaire de l'astronomie : quelle est la taille apparente d'une étoile c'est-à-dire la dimension du disque qu'elle forme sur la voûte céleste ?

Lorsqu'elle est au plus près de la Terre, Vénus présente un diamètre apparent d'une minute d'angle, soit un soixantième de degré. Or, même pour l'œil humain le plus perçant, un tel disque ressemble à un point. En revanche, un télescope équipé d'un miroir de 15 centimètres est 60 fois plus efficace que l'œil nu, car son ouverture est bien supérieure à celle de la pupille. Dans un tel télescope, une étoile apparaît sous la forme d'un disque que le passage

de la lumière à travers l'ouverture a rendu flou ; son diamètre apparent est toujours de l'ordre de une seconde d'angle, quelle que soit sa taille réelle.

Pour concevoir les angles en jeu lorsque nous observons la voûte céleste, imaginons-nous qu'une seconde d'angle est à peu près l'angle sous lequel le gardien d'une équipe de football distingue un moucheron posé sur l'épaule du gardien de l'équipe adverse, ou encore l'angle

sous lequel nous observons le plus gros des satellites de Jupiter. À l'exception du Soleil, Bételgeuse est l'étoile dont le diamètre apparent est le plus grand dans le ciel. Comme ce dernier n'excède pas 60 millièmes de seconde d'angle, les diamètres apparents des autres étoiles ne mesurent, au mieux, que quelques millièmes de seconde.

Le pouvoir séparateur d'un télescope – sa capacité à distinguer deux

détails proches – augmente proportionnellement à son ouverture. C'est pourquoi les astronomes bâtissent des télescopes toujours plus grands. Ainsi, d'après les lois de l'optique, un télescope de 15 centimètres de diamètre permet l'observation d'un disque d'une seconde d'angle, et un télescope de 2,5 mètres celle de Bételgeuse. Les télescopes Keck de dix mètres installés au sommet du mont Mauna Kéa à Hawaïi devraient nous révéler les détails de la

Les contributions de l'interférométrie optique à l'astronomie

L'interférométrie optique a maintenant dépassé le stade de curiosité de laboratoire. Une vingtaine d'interféromètres optiques sont déjà en exploitation, certains depuis longtemps. Voilà quelques-uns des résultats obtenus.

L'étude des diamètres stellaires



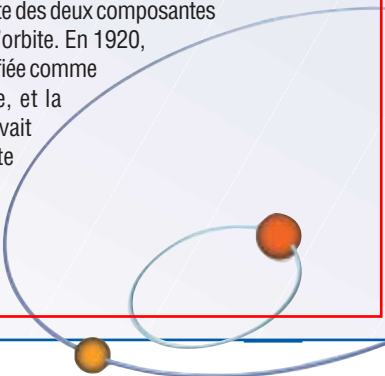
Les premiers diamètres stellaires ont été mesurés dans les années 1920 par Albert Michelson et Francis Pease. Ces deux pionniers ont évalué le diamètre de Bételgeuse ainsi que celui de cinq autres étoiles géantes dont le diamètre est compris entre 20 et

50 millisecondes d'angle. Si l'œil humain était doté d'un tel pouvoir séparateur, nous pourrions distinguer les atomes qui constituent un objet tenu à bout de bras !

Environ 50 ans plus tard, l'Australien Robert Hanbury Brown et son équipe ont mesuré, à l'aide de la technique de l'interférométrie d'intensité, 32 étoiles brillantes, dont le diamètre était compris entre 0,4 à 5,5 millisecondes d'angle. Aujourd'hui, les astronomes ont déterminé le diamètre de plus d'une centaine d'étoiles, avec une précision atteignant un pour cent dans le meilleur des cas. Seules quelques étoiles ont pu être mesurées par d'autres techniques, comme celle de l'occultation lunaire, c'est-à-dire d'après les informations tirées du passage de la Lune devant elles.

L'étude des orbites d'étoiles multiples

Plus de la moitié des systèmes stellaires sont constituées de deux étoiles (voire davantage) en orbite autour de leur centre de gravité commun. L'observation des orbites de ces étoiles doubles ou multiples est la seule façon de déterminer leur masse. En 1920, John Anderson de l'Observatoire du Mont Wilson, en Californie, a observé l'étoile binaire Capella à l'aide d'un interféromètre de Michelson de six mètres, et a mesuré la distance apparente des deux composantes stellaires en six points de l'orbite. En 1920, Capella était déjà bien identifiée comme étant un système binaire, et la vitesse des deux étoiles avait été mesurée sur leur orbite respective d'après des décalages Doppler mesurés dans leur spectre. Combinant ses résultats avec ces données spectroscopiques,



Anderson en a déduit l'inclinaison relative de l'orbite des deux étoiles composant Capella par rapport à notre ligne de visée ; il estima ainsi leurs masses et leur éloignement.

Les astronomes ont continué à mesurer des orbites binaires à l'aide d'interféromètres, et obtiennent une précision et une résolution toujours meilleures. La meilleure séparation jamais obtenue entre les deux étoiles d'un système binaire est d'environ deux milli-secondes d'angle. Ce record est détenu par l'équipe de Christopher Koresko sur l'étoile TZ du Triangle, à l'aide de l'interféromètre prototype du Mont Palomar (PTI). Aujourd'hui, l'interférométrie optique est si précise que, souvent, ce ne sont plus les données interférométriques, mais les données spectroscopiques qui limitent notre connaissance des masses stellaires.

L'étude de la surface des étoiles

La mesure du diamètre d'une étoile est certes difficile, mais l'étude de sa surface l'est bien plus encore. La résolution, mais aussi la sensibilité doivent être excellentes, car les variations de la surface d'une étoile se traduisent par de faibles variations d'intensité.



Les «assombrissements centre-bord» en sont un exemple : parfois, le bord d'un disque stellaire, ce que les astronomes nomment le limbe, n'est pas aussi brillant que le centre. La lumière qui parvient du centre d'une étoile a traversé toute la profondeur de l'atmosphère, là où le gaz est particulièrement chaud et brillant. Au contraire, celle qui provient du limbe a traversé une couche de gaz plus froide et moins lumineuse. Les astronomes ont observé un assombrissement centre-bord sur le Soleil, et le phénomène existe sans doute sur toutes les étoiles, où il doit être plus ou moins important en fonction de leur spectre d'émission. Grâce à l'interférométrie optique, ils distinguent un disque uniforme d'un disque qui présente un assombrissement centre-bord. Grâce à l'étude de ce phénomène d'assombrissement, les astronomes testent leurs modèles d'atmosphère stellaire.

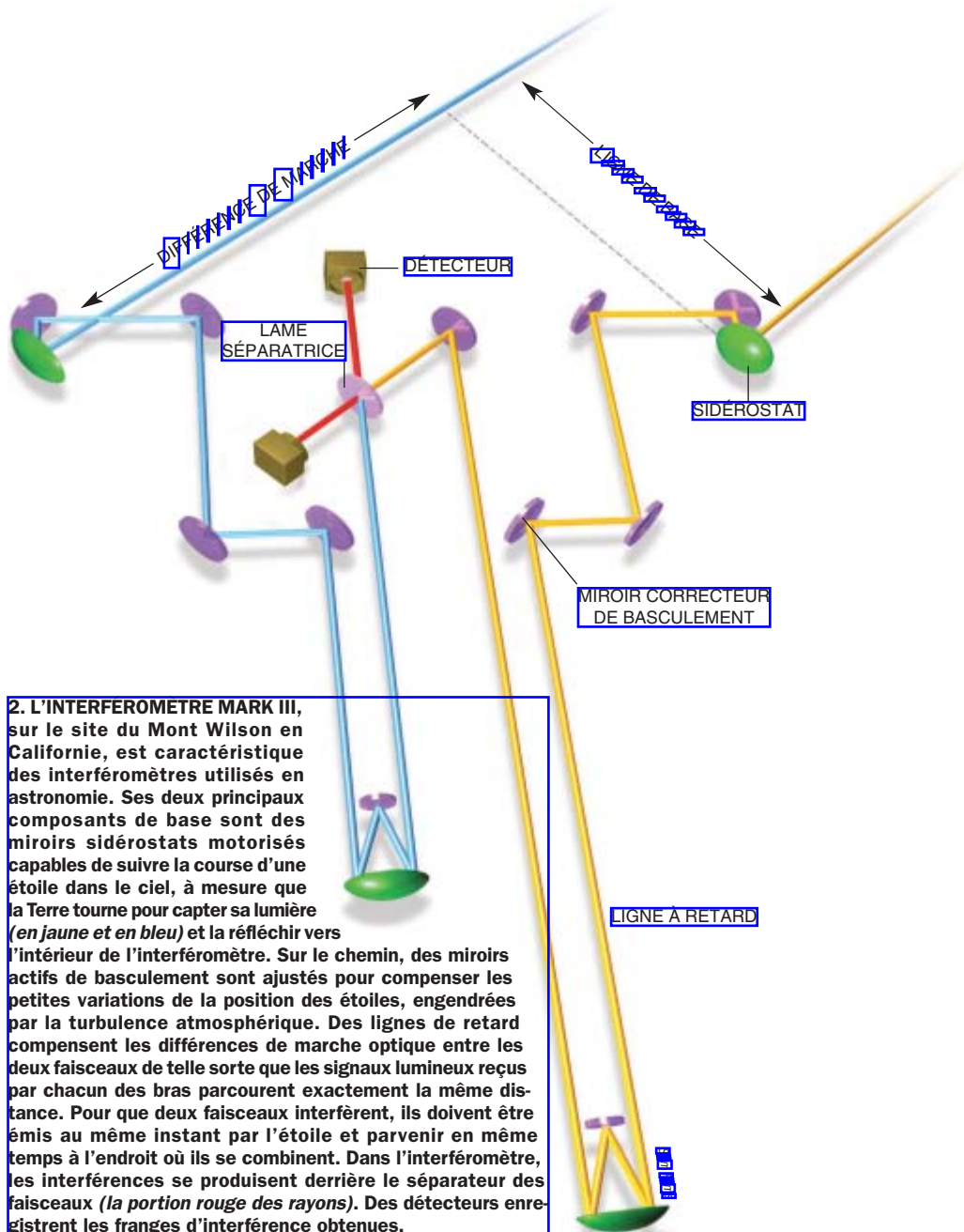
surface de Bételgeuse, et distinguer de nombreuses autres étoiles brillantes. En pratique, il n'en est rien à cause de la turbulence de l'atmosphère.

En fait, les astronomes sont dans la situation de quelqu'un qui tenterait de lire un message inscrit au fond d'une piscine. Quand la surface est parfaitement calme, on lit facilement le message. En revanche, quand le vent ride la surface, on ne peut déchiffrer les ondes lumineuses distordues qui parviennent du fond.

Dans l'espace, au-dessus de l'atmosphère, les ondes lumineuses issues des étoiles se propagent en ligne droite. Les fronts d'onde, c'est-à-dire les surfaces pour lesquelles l'onde a parcouru une distance identique depuis la source, sont perpendiculaires à la direction de propagation. Le défilement de l'onde équivaut à celui d'une liasse de feuilles de papier immaculées. Malheureusement, ces pages, où sont inscrits des fragments de l'histoire de l'Univers, sont froissées dès qu'elles pénètrent dans l'atmosphère. Les turbulences de l'atmosphère déforment les ondes à la façon d'une feuille de papier chiffonnée que l'on aurait tenté de défroisser avec la paume de la main.

Une fois que l'onde a traversé l'atmosphère, tout se passe comme si celle-ci était constituée d'un ensemble de facettes planes inclinées dans diverses directions. Dans le domaine des longueurs d'onde visibles, ces surfaces ont une taille comprise entre 5 et 20 centimètres suivant le temps et le vent, de sorte qu'un télescope de 10 mètres en reçoit quelques milliers. Les sections qui ont la même inclinaison se combinent en une même tache de l'étoile observée, nommée tavelure. Le résultat est une image mouchetée, dont les taches – les tavelures – bougent en permanence en fonction des modifications incessantes de l'atmosphère. Quand le temps de pose est supérieur à une fraction de seconde, l'image d'une étoile devient floue. L'effet de la turbulence est si important, que même dans des conditions atmosphériques très calmes, l'image que livre un télescope de 10 mètres est presque aussi floue que celle d'un télescope de 15 centimètres.

Les astronomes s'affranchissent de la turbulence atmosphérique grâce à l'«interférométrie des tavelures» ; cette technique consiste à réduire les temps de pose à moins d'un centième de seconde, de façon à figer les tave-



2. L'INTERFEROMETRE MARK III, sur le site du Mont Wilson en Californie, est caractéristique des interféromètres utilisés en astronomie. Ses deux principaux composants de base sont des miroirs sidérostats motorisés capables de suivre la course d'une étoile dans le ciel, à mesure que la Terre tourne pour capter sa lumière (en jaune et en bleu) et la réfléchir vers l'intérieur de l'interféromètre. Sur le chemin, des miroirs actifs de basculement sont ajustés pour compenser les petites variations de la position des étoiles, engendrées par la turbulence atmosphérique. Des lignes de retard compensent les différences de marche optique entre les deux faisceaux de telle sorte que les signaux lumineux reçus par chacun des bras parcourent exactement la même distance. Pour que deux faisceaux interfèrent, ils doivent être émis au même instant par l'étoile et parvenir en même temps à l'endroit où ils se combinent. Dans l'interféromètre, les interférences se produisent derrière le séparateur des faisceaux (la portion rouge des rayons). Des détecteurs enregistrent les franges d'interférence obtenues.

lures. Les astronomes ont ainsi réussi à mesurer des orbites d'étoiles binaires. Toutefois, l'obtention de bonnes images reste en pratique d'une grande difficulté.

Une autre technique, l'optique adaptative, nécessite des capteurs qui mesurent les distorsions de l'onde incidente et les transmettent à un ordinateur. Ce dernier calcule les distorsions qui compensent au mieux celles de l'onde, puis transmet les ordres nécessaires au miroir déformable. Le miroir déformable est réajusté environ toutes les millisecondes. Ce procédé est très performant, car il crée des images nettes dont la résolution est proche de la limite théorique fixée par l'ouverture du télescope.

Toutefois, ces performances sont insuffisantes pour que l'on mesure la

taille d'une étoile à partir de son image prise au télescope. Même si l'on parvenait à compenser parfaitement l'effet de la turbulence atmosphérique, un télescope de 10 mètres de diamètre ne distinguerait que quelques dizaines d'étoiles, celles dont le diamètre est de l'ordre de quelques centièmes de secondes d'angle. Pour évaluer le diamètre des seules étoiles visibles à l'œil nu (les plus proches ou les plus grosses), nous devrions construire un télescope dont le miroir aurait un diamètre de 500 mètres. Un tel miroir géant, construit avec une précision d'une fraction de micromètre, porté par une structure qui ne déformerait pas le miroir et qui orienterait le télescope vers l'étoile étudiée, n'est envisageable ni sur le plan technique ni sur le plan financier !

Par chance, grâce à l'interférométrie, la construction d'un miroir de 500 mètres de diamètre n'est pas indispensable : on place deux télescopes beaucoup plus petits à 500 mètres de distance, puis on combine leurs signaux lumineux en un point central, après avoir corrigé les effets de la turbulence atmosphérique.

Le principe de l'interférométrie optique

L'interférométrie optique est apparue en trois étapes : jusqu'au milieu du XIX^e siècle, les astronomes ne savaient utiliser que des télescopes classiques ; puis ils apprirent à créer des interférences à partir des faisceaux recueillis par ces instruments ; finalement, ils tirèrent de cette technique le principe de l'interférométrie moderne. Comparons les instruments associés à chacune de ces étapes, afin de comprendre comment fonctionne un interféromètre : le premier est tout simple-

ment le télescope classique, avec son unique miroir primaire ; le second est le même télescope, mais son miroir primaire est entièrement masqué, à l'exception de deux petits segments ; le troisième instrument est un interféromètre, c'est-à-dire un ensemble de deux petits télescopes et d'un système optique conçu pour acheminer les faisceaux collectés vers un capteur. Chacun de ces instruments reçoit de la lumière et la transmet à son détecteur d'une façon différente. Ainsi, dans le premier instrument, le télescope classique, le miroir primaire fait converger vers le foyer des ondes ayant parcouru la même distance depuis qu'elle ont quitté l'étoile observée. Le deuxième télescope, partiellement masqué, fonctionne de la même façon, mais seuls les deux segments découverts recueillent de la lumière et la renvoient vers le foyer. Chacun de ces télescopes produit une image sur un détecteur placé au foyer. Celle du télescope partiellement masqué est de qualité infé-

rieure dans la mesure où seuls des fragments du miroir primaire sont utilisés.

L'interféromètre fonctionne un peu sur le principe du télescope partiellement masqué, dans la mesure où deux petits miroirs réfléchissent la lumière. Toutefois, ce troisième instrument se distingue par plusieurs aspects. Les deux miroirs primaires d'un interféromètre ne sont pas solidaires, c'est-à-dire qu'ils ne font pas partie d'une même structure rigide orientée vers l'étoile. Dans l'interféromètre, une telle autonomie est possible, parce que les miroirs collectent les rayons lumineux émis par l'étoile, mais n'assurent pas la recombinaison des faisceaux recueillis.

La deuxième différence tient à la façon dont un interféromètre combine de façon synchrone les deux faisceaux qu'il reçoit. En général, les deux miroirs primaires ne sont pas rigoureusement à la même distance de l'étoile, de sorte que le front d'onde atteint le miroir le plus proche avant l'autre. C'est pour-

Histoire de l'interférométrie

1868 : Le physicien français Armand Hippolyte Louis Fizeau a une idée : masquer l'ouverture d'un télescope pour faire de l'interférométrie. Il propose de mesurer la taille des étoiles en plaçant un masque percé de deux trous sur un télescope, et d'observer les interférences qui en résultent.

1876 : Édouard Stephan applique la technique de Fizeau sur le télescope de 80 centimètres de Marseille, mais les deux trous du masque ne sont séparés que de 65 centimètres, ce qui est insuffisant pour mesurer le diamètre des étoiles. Stephan observe en fait deux images de grande taille et qui se recouvrent partiellement. Des franges d'interférences strient la zone de recouvrement. Stephan met au point une méthode pour mesurer la taille d'une étoile : il fait varier la distance qui sépare les deux trous jusqu'à ce que les franges d'interférences disparaissent. La taille de l'étoile se déduit de l'intervalle ainsi couvert. Plus les trous doivent être écartés, plus l'étoile est petite. Toutefois, les performances du dispositif de Stephan sont limitées par la taille du miroir qu'il utilise. Il en conclut que toutes les étoiles qu'il observe sont plus petites que seize centièmes de seconde d'angle.

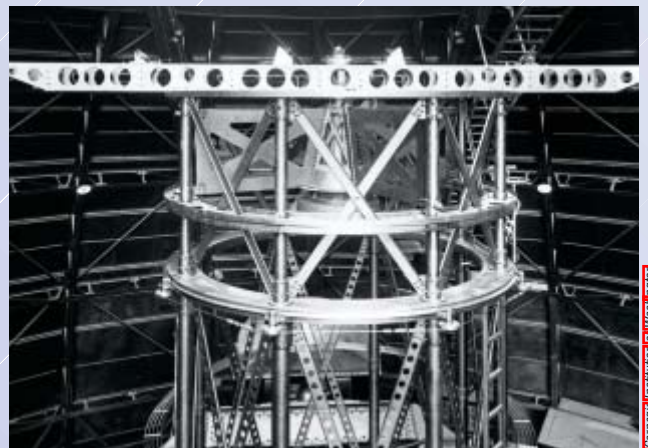
1891 : Apparemment sans avoir eu vent des travaux de Fizeau et de Stéphane, Albert Michelson applique la même technique à l'observation des satellites de Jupiter. Il parvient à mesurer leur diamètre, notablement supérieur à celui d'une étoile, puisqu'il est compris entre une et deux secondes d'angle.

1920 : Pour mesurer le diamètre des étoiles, Michelson place au sommet du télescope Hooker de 2,50 mètres du Mont Wilson, en Californie, une poutre d'acier de six mètres supportant un miroir à chaque extrémité. Au cours des années 1930, son collègue Francis Pease tente de construire un interféromètre dont les miroirs sont séparés de 15 mètres. Toutefois, il échoue, sans doute parce que la structure qui supportait ses miroirs n'était pas assez rigide.

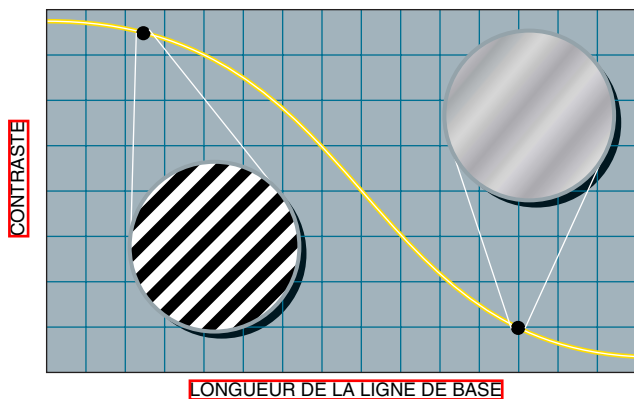
Années 1950 et 1960 : Les observations astronomiques progressent notablement grâce à l'interférométrie dans le domaine des

ondes radio. L'interférométrie radio est plus simple que l'interférométrie optique, car les longueurs d'onde des ondes radio sont des milliers de fois plus grandes que celles des ondes visibles, de sorte qu'elles sont moins sensibles à la turbulence atmosphérique, et que la précision nécessaire pour l'obtention d'interférences est inférieure. Les ondes radio ont aussi l'avantage de pouvoir être électroniquement amplifiées ou enregistrées avant d'être combinées.

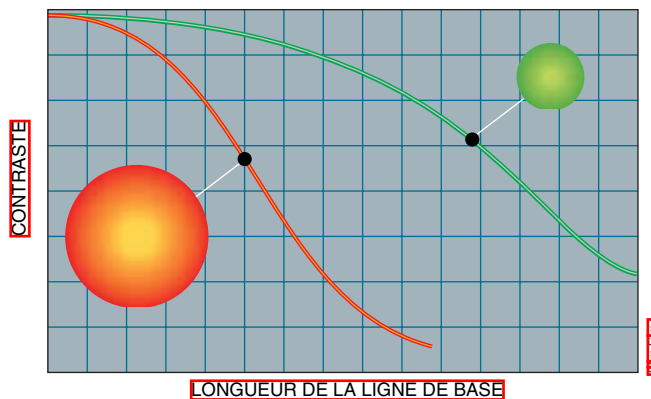
1958-1976 : La construction de l'interféromètre implanté à Narrabri, en Australie, par Robert Brown, Richard Twiss et leurs collègues fait progresser la technique. D'abord, ils utilisent, pour la première fois, deux télescopes séparés au lieu de deux miroirs installés sur une même grande structure. Les deux télescopes de 6,50 mètres d'ouverture qu'ils utilisent peuvent être séparés d'une distance qui varie entre 10 et 188 mètres, un record qui reste encore à battre aujourd'hui ! Ensuite, ils sont les premiers à utiliser des dispositifs électroniques de détection et d'enregistrement des données, tandis que les astronomes, avant eux, avaient toujours utilisé leurs propres yeux.



Centre National de la Recherche Scientifique



3. LES FRANGES D'INTERFÉRENCE formées par une étoile isolée (à gauche) sont plus contrastées quand les deux télescopes utilisés sont peu éloignés. Le diamètre apparent de l'étoile, c'est-à-dire l'angle sous lequel on l'observe, se déduit du contraste des franges (à droite).



Quand l'éloignement entre les télescopes augmente, le contraste des franges d'interférence des étoiles de grande taille (en rouge) diminue plus vite que celui des étoiles de petites tailles (en vert). L'étude des petites étoiles nécessite des télescopes très éloignés.

quoï les interféromètres sont équipés de «lignes de retard», c'est-à-dire de miroirs intermédiaires montés sur des chariots mobiles ; leur rôle est de compenser les différences de chemin optique entre les deux «bras» de l'interféromètre (les parcours des deux faisceaux recueillis).

Un interféromètre se différencie aussi en ceci qu'il forme non pas une image de l'étoile étudiée, mais l'interférence de deux faisceaux. Lorsque les sommets des ondes qui proviennent du premier miroir coïncident avec ceux des ondes qui proviennent du second miroir, les ondes sont en phase, et les

interférences sont constructives : l'intensité est maximale. Au contraire, dans le cas d'interférences destructives, les ondes, en opposition de phase et les sommets des ondes du premier miroir coïncident avec les creux des ondes issues du second miroir, et l'intensité est minimale. Cette alternance de zones

Brown et Twiss innoveront aussi en détectant individuellement les photons sur chaque télescope et en corrélant leur instant d'arrivée (les photons suffisamment proches contribuent à la même image). La méthode est d'une grande simplicité, puisque les faisceaux lumineux n'ont pas à être combinés, mais la sensibilité est médiocre. Même au bout de 100 heures d'observation, les astronomes ne peuvent étudier que des étoiles assez brillantes (celles dont la magnitude est inférieure à 2,5, ce qui correspond à la luminosité des étoiles de la ceinture d'Orion).

1974 : Deux équipes utilisent des télescopes séparés et des techniques de détection plus sensibles. Antoine Labeyrie et ses collègues de l'Observatoire de la Côte d'Azur sont les premiers à appliquer la technique de Michelson dans le domaine visible. Ils créent des interférences avec deux faisceaux distants de 12 mètres et observent l'étoile Véga. À Kitt Peak, dans l'Arizona, l'équipe de Charles Townes applique une technique de radioastronomie pour observer Mercure dans l'infrarouge moyen avec un interféromètre de 5,5 mètres de ligne de base. La méthode consiste à convertir un signal à hautes fréquences en un signal à fréquences inférieures, comme un poste de radio convertit les signaux des ondes à modulation de fréquences qu'il reçoit à 100 mégahertz en ondes sonores adaptées au domaine perçu par l'oreille humaine.

1980 : Un interféromètre radio de grandes dimensions, le VLA (Very Large Array), entre en service à Socorro, au Nouveau-Mexique. Il fournit des milliers de résultats importants.

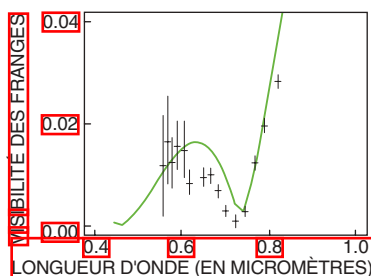
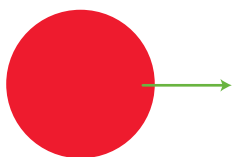
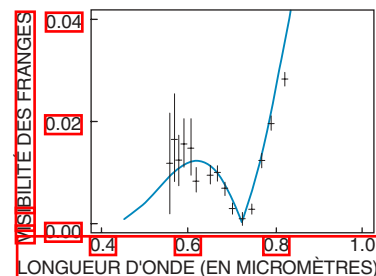
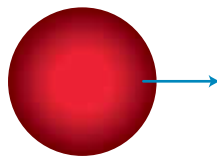
Années 1980 et 1990 : Après les progrès réalisés par A. Labeyrie et Ch. Townes, les recherches sur l'interférométrie optique se sont intensifiées. Ch. Townes a poursuivi les travaux entrepris au début des années 1970 dans le domaine de l'infrarouge moyen. Son équipe utilise aujourd'hui un interféromètre constitué de deux télescopes de 1,60 mètre qui peuvent être séparés de 32 mètres au maximum. Ces astronomes étudient les poussières qui entourent les étoiles à la fin de leur vie. Un troisième télescope sera



bientôt disponible, qui fournira une ligne de base supplémentaire de 75 mètres.

Depuis 1974, les astronomes ont construit une dizaine d'interféromètres opérant dans le visible et dans le proche infrarouge : huit sont en service, et cinq en construction. Tous reprennent l'architecture utilisée par A. Labeyrie, à quelques différences près : la ligne de base est supérieure et peut atteindre 80 mètres, comme c'est le cas, par exemple, à l'interféromètre stellaire SUSI de l'Université de Sydney, en Australie ; l'ouverture maximale a augmenté et atteint 1,5 mètre dans le télescope GI2T de l'observatoire de la Côte d'Azur, à Nice ; plusieurs télescopes sont utilisés simultanément (quatre dans l'interféromètre *Optical Aperture Synthesis Array* de Cambridge, ce qui est un record) ; la gamme des longueurs d'onde s'est élargie. Ainsi, celle du prototype américain *Navy Prototype Optical Interferometer*, situé à Anderson Mesa, aux États-Unis, s'étend de 450 à 850 nanomètres.

DISQUE UNIFORME

DISQUE ASSOMBRÉ
AU BORD

Source VLT

4. L'ASSOMBRISSEMENT du bord d'une étoile peut être évalué à l'aide d'un interféromètre. Les données obtenues pour Alpha de Cassiopée (les croix) ne s'accordent pas bien avec celles que prévoit la théorie quand on considère cette étoile comme un disque d'intensité uniforme (en haut). En revanche, les données théoriques et experi-

mentales coïncident mieux quand on postule que le limbe d'Alpha de Cassiopée est assombri. De tels résultats fournissent des informations précieuses sur l'atmosphère des étoiles, mais nécessitent de grandes lignes de base pour atteindre une résolution angulaire plus fine que le diamètre apparent de l'étoile.

brillantes et de zones sombres constituent les franges d'interférence.

Les astronomes mesurent le contraste entre les franges, qu'ils nomment la «visibilité des franges». La visibilité varie en fonction des caractéristiques de la source lumineuse, la taille d'une étoile, par exemple, ou encore la distance entre les deux compagnons d'un système binaire ; le contraste varie aussi pour un objet donné en fonction de la longueur et de l'orientation de la ligne qui relie les deux miroirs primaires, nommée

ligne de base. Une façon simple de faire varier la longueur et l'orientation de cette ligne est de se servir de la rotation de la Terre. Les astronomes attendent que celle-ci introduise un retard, puis ils le compensent à l'aide d'une ligne de retard. Par ailleurs, la plupart des interféromètres de nouvelle génération utilisent plus de deux télescopes, dont certains peuvent être déplacés sur des rails.

Quel que soit le type d'interféromètre employé, il faut traiter les

signaux recueillis. À l'aide d'algorithmes fondés sur la transformée de Fourier, les astronomes convertissent les franges mesurées en une image de l'astre étudié. Le résultat est identique à l'image imparfaite que l'on obtiendrait avec un télescope partiellement masqué dont le diamètre serait égal à la ligne de base de l'interféromètre. La résolution de cette image est très bonne, mais l'image est incomplète, car elle ne contient qu'une partie des informations

L'interférométrie, une technique européenne

J'aime être aux commandes d'un interféromètre pointé vers l'un de mes astres préférés. Pendant que j'attends qu'un signal sonore m'indique que les franges sont là, j'imagine que deux des photons qui les forment ont quitté en même temps l'étoile que j'étudie. Ils ont traversé l'espace immense pendant 500 ans, avant d'être capturés par mes deux énormes télescopes. Après une course dans un dédale de miroirs, ils ont fini par atteindre au même moment le lieu de leur rendez-vous : celui des interférences. Et si des franges sont là, cela signifie qu'à un millième de millimètre près ils ont parcouru exactement la même distance !

Ce plaisir de l'interférométrie, les astronomes européens ont été les premiers à le découvrir. Non sans difficultés, tant la technique est complexe, ardue, voire ingrate. Tout récemment, de premières franges ont été obtenues au VLTI, à l'Observatoire européen installé sur le mont Paranal, au Chili. Ce premier test passé avec succès démontre la maturité technique atteinte par l'interférométrie européenne, car le VLTI est le premier et le seul grand interféromètre conçu pour que tous les astronomes puissent l'utiliser. L'interférométrie optique cesse enfin d'être affaire de spécialistes !

Avant d'en arriver là, les astronomes européens ont accumulé des dizaines d'années d'expérience et multiplié les «premières» dans tous les domaines de longueur d'onde. Ainsi, en 1974, le Français Antoine Labeyrie est le premier à obtenir des franges dans le domaine des longueurs d'onde visibles à partir de télescopes séparés. En 1973, Jean Gay observe des franges par détection hétérodyne, une technique qui consiste à mélanger au signal à haute fréquence de l'astre observé le signal issu d'un laser afin d'obtenir un signal de fréquence moyenne beaucoup plus facile à traiter. Jean Gay a appliqué cette technique au Soleil dans la gamme de longueur d'onde des dix micromètres (infrarouge). L'Italien Paolo Di Benedetto est le premier à utiliser un

détecteur pour mesurer directement des franges formées dans le domaine de l'infrarouge proche. Quatre ans plus tard, l'équipe d'Antoine Labeyrie mène les premières observations dans le domaine visible à partir des deux grands télescopes de 1,50 mètres du G12T de l'Observatoire de la Côte d'Azur. John Baldwin de l'Université de Cambridge est le premier à reconstruire une image à partir de mesures interférométriques en 1996.

Outre ces percées, les astronomes européens sont à la source de nombreuses innovations techniques. Ainsi, l'interféromètre G12T de l'Observatoire de la Côte d'Azur est le seul au monde à intégrer un spectrographe à haute résolution en son foyer. Cet instrument analyse le spectre de la lumière qui provient des étoiles, ce qui permet de distinguer où se trouvent les différents composants chimiques de l'atmosphère de l'étoile.

C'est aussi en Europe qu'est née l'idée de construire un interféromètre avec des fibres optiques, astuce qui rend envisageable les très grandes lignes de base. Lancée par Claude Froehly de Limoges en 1981, cette solution fut ensuite appliquée avec succès par le groupe de Jean-Marie Mariotti, de l'Observatoire de Paris, en 1991. Comme l'utilisation de fibres facilite le suivi des fluctuations de l'atmosphère, cette méthode a conduit aux résultats les plus précis dont disposent les astronomes aujourd'hui. C'est pourquoi, en 1996, des astronomes de l'Observatoire de Grenoble ont proposé d'augmenter encore sa puissance en remplaçant les optiques qui composent l'instrument par un seul composant d'optique intégrée issue des techniques mises au point pour Internet.

Le VLTI qui vient de rentrer en fonctionnement concentre tout le savoir-faire accumulé en Europe en trente ans. La possibilité de transformer l'installation en interféromètre avait été prévue dès l'origine, en 1976. Le projet poursuivi à l'époque était celui d'un gigantesque télescope dont le miroir monolithique aurait mesuré 16 mètres.

émises par la source. L'astronome regarde à travers un interféromètre comme quelqu'un qui observerait une maison dissimulée derrière une palissade ajourée. Il verrait une image partielle de la maison, mais, en se déplaçant à bicyclette devant la palissade, la maison défilerait entre les planches de la clôture. De même, les astronomes combinent plusieurs lignes de base, de sorte que les images sont plus précises.

Difficultés de mise en œuvre

Un interféromètre optique évite les difficultés de construction et les coûts exorbitants des télescopes géants, mais pose des difficultés spécifiques. Ainsi, les faisceaux lumineux de chaque télescope sont convoyés sur des dizaines, voire sur des centaines de mètres jusqu'au laboratoire où ils interfèrent. Or, des ondes lumineuses de différentes longueurs d'onde ne se propagent pas à la même vitesse dans l'air. Pour préserver les

interférences, les faisceaux sont donc convoyés dans le vide. Ces difficultés impliquent que le coût de l'infrastructure d'un interféromètre augmente rapidement avec la longueur de sa ligne de base et le nombre de ses composants.

Un interféromètre de plus de deux télescopes engendre des images plus précises de l'objet étudié, car il produit des franges pour plusieurs lignes de base simultanément. Toutefois, la multiplication des télescopes a aussi sa limite. Ainsi, dans un interféromètre à dix télescopes, chaque faisceau devrait être séparé en neuf sous-faisceaux que l'on combinerait avec les sous-faisceaux des autres télescopes. Ces séparations successives diminuent la sensibilité de l'interféromètre, car chaque groupe de franges est produit avec un nombre réduit de photons. Pour cette raison, le nombre maximum de télescopes utilisables est compris entre 5 et 20. Par ailleurs, la complexité du système optique nécessaire pour combiner tous ces faisceaux croît rapidement,

car le nombre de lignes de base disponibles augmente très vite avec le nombre de télescopes. Ainsi, deux télescopes ont une seule ligne de base, mais 10 en ont 45 possibles. Notons en outre que, sur chaque trajet lumineux, chacun des nombreux miroirs absorbe environ un pour cent des photons qu'il reçoit...

Si la turbulence atmosphérique est la plaie des grands télescopes, elle est aussi celle des interféromètres. Son effet est de faire trembloter les étoiles dans le ciel, introduisant ainsi une fluctuation constante des positions stellaires. Le recouvrement des paires de faisceaux est alors imparfait, voire insuffisant. Pour cette raison, les astronomes placent sur le chemin de chaque faisceau des miroirs qui corrigent l'orientation en fonction de la mesure que des capteurs font de la turbulence. Ces corrections ressemblent à celles qu'utilise l'optique adaptative, mais sont loin de résoudre tous les problèmes. La turbulence atmosphérique crée un autre obstacle : elle retarde chaque faisceau d'une façon

Comme la réalisation d'un tel instrument s'est heurtée à des obstacles quasi insurmontables, les astronomes ont opté à partir de 1987 pour un ensemble de quatre télescopes de 8 mètres de diamètre : le VLT. Un tel dispositif est tout aussi sensible qu'un télescope de 16 mètres de diamètre, puisque sa surface collectrice est la même. En outre, sa conception marie l'exploitation conventionnelle des télescopes avec une utilisation sur le mode interférométrique. Quand il est utilisé ainsi, le VLT devient le VLTI et constitue l'interféromètre optique le plus sensible du monde. Sa résolution équivaut à celle d'un télescope géant de 130 mètres de diamètre !

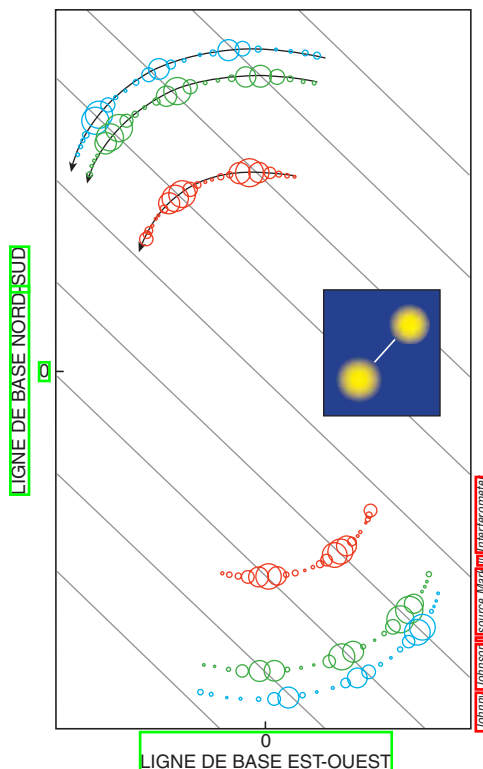
Les astronomes européens ont décidé de rendre le VLTI encore plus performant en lui adjoignant trois télescopes de 1,80 mètre mobiles sur une base de 200 mètres de long. Ainsi, le VLTI exploitera sept télescopes, dont quatre géants. Toute l'installation sera automatique, et il suffira aux astronomes de programmer leurs séquences de mesure pour l'exploiter. Le VLT vient de subir un premier test de fonctionnement à partir de deux sidérostats. Les astronomes ont mesuré le diamètre apparent de l'étoile de Sirius et trouvé $0,00929 \pm 0,00017$ seconde d'angle, un résultat en parfait accord avec la valeur du diamètre de l'étoile géante.

Aujourd'hui, les astronomes s'intéressent à l'interférométrie de très près, car c'est la seule méthode disponible pour rechercher et étudier les planètes extra-solaires de type terrestre. La NASA en a fait la pierre angulaire de son programme *Origins*, consacré à la recherche de la vie en dehors du Système solaire. Dans ce cadre, ses efforts en interférométrie au sol portent principalement sur l'interféromètre *Keck*. L'Agence spatiale prépare aussi pour la fin de la décennie le satellite *Space Interferometry Mission*. Il tentera de détecter de façon indirecte des planètes de type terrestre depuis l'espace, grâce à son interféromètre embarqué. Pour sa part, l'Agence spatiale européenne prépare la mission *DARWIN* de recherche de vie extrasolaire pour 2020. L'idée est de créer simultanément des interférences à partir de la lumière des astres lumineux du voisi-



nage solaire et à partir d'un autre signal beaucoup plus faible. Normalement indécélables dans le bruit de fond, les franges d'un objet peu lumineux deviendront visibles si elles sont placées à l'intérieur des franges sombres d'un astre lumineux, qui normalement nous aveugle. Grâce à cette astuce, les astronomes espèrent percevoir des signaux environ un million de fois plus faibles que les signaux stellaires habituels, ce qui devrait rendre les exoplanètes directement observables. Si une éventuelle exo-Terre était observée ainsi, son spectre serait analysé dans l'espoir d'y détecter la raie de l'ozone, la signature de la présence d'une forme de vie utilisant le carbone et l'oxygène.

Fabien MALBET, CNRS, Observatoire de Grenoble est responsable scientifique du projet AMBER.



5. L'ÉTOILE BINAIRE CAPELLA de la constellation du Cocher produit ce type de franges obtenues par l'Interféromètre Mark III. À mesure que la Terre tourne, la ligne de base de l'interféromètre décrit un arc d'ellipse. La taille des cercles indique l'intensité des franges d'interférence observées pour trois longueurs d'onde (les trois couleurs). Les positions où la visibilité est maximale sont situées sur des lignes régulièrement espacées. Les deux étoiles de Capella sont orientées perpendiculairement à ces lignes et sont séparées d'une distance qui varie en sens inverse de la distance entre les lignes.

non seulement aléatoire, mais très variable, car les télescopes reçoivent des ondes qui ont traversé des zones de turbulence différentes. La qualité des interférences et des franges est dégradée. Cet effet doit être éliminé aussi bien que possible, tout particulièrement lorsqu'on scrute des étoiles peu brillantes ou si l'on veut améliorer la précision.

Toutes ces indispensables corrections limitent la sensibilité des interféromètres, et l'augmentation de la taille des télescopes ou des temps de pose n'y fait rien. L'information nécessaire aux corrections est mesurée sur le signal émis par l'objet étudié ou par un de ses tout proches voisins. Les ouvertures des télescopes utilisés pour cette mesure doivent ne pas excéder 20 centimètres, ce qui permet de suivre une seule tavelure à la fois ; de plus, l'information doit être obtenue en moins de 10 millisecondes, de

sorte que la turbulence atmosphérique n'ait pas le temps de faire bouger notablement les franges ni les tavelures. L'image des franges doit être enregistrée en quelques millisecondes, là encore pour éviter que la turbulence atmosphérique ne brouille les franges.

Au final, l'interférométrie optique nécessite la maîtrise de techniques complexes et nombreuses. Elles vont de l'emploi de photo-détecteurs ultrarapides à celui d'ordinateurs capables d'enregistrer plusieurs gigaoctets par nuit, en passant par l'utilisation de lasers à fréquences stabilisées pour le contrôle des lignes de retard une fois par milliseconde. Ces diverses techniques sont progressivement devenues disponibles au cours des vingt dernières années, mais les astronomes ne savent les utiliser de façon optimale que depuis peu.

Quelles perspectives pour l'interférométrie optique ?

Cette complexité technique confère aux interféromètres optiques actuels une limite incontournable : ils sont peu sensibles. En fait, ils le sont à peine plus que l'œil nu, malgré leur excellente résolution angulaire ! Même si cet état de fait limite les observations à quelques milliers d'étoiles parmi les plus brillantes, les interféromètres procurent aux astronomes des données si intéressantes qu'elles justifient à elles seules les efforts déployés. Heureusement, ces limites seront dépassées dès que des dispositifs d'optique adaptative plus performants seront disponibles sur les groupes de télescopes géants.

Les interféromètres optiques et infrarouges que les astronomes sont en train de construire sont déjà plus perfectionnés. Ainsi, des interféromètres à plusieurs télescopes devraient bientôt fonctionner. C'est le cas, par exemple, du NPOI (Navy Pro-

TOTYPE Optical Interferometer) construit en Arizona, avec six télescopes et 15 lignes de base disponibles. S'ils disposent de suffisamment de données, les astronomes pourraient, en principe, dès aujourd'hui cartographier la surface d'une étoile, s'ils employaient des méthodes inspirées de celles de l'interférométrie radio. Dans la pratique, l'interférométrie optique ne s'applique pour le moment qu'aux objets qui ont la structure la plus simple : les étoiles binaires. Cependant, les astrophysiciens mettent déjà au point les algorithmes nécessaires à la cartographie d'étoiles elliptiques, d'étoiles tachées, d'étoiles qui éjectent de la matière, etc. Un long chemin doit néanmoins être encore parcouru avant que les interféromètres optiques n'atteignent l'efficacité de leurs cousins opérant aux grandes longueurs d'onde du domaine radio.

Deux interféromètres équipés d'optiques adaptatives de pointe rendront possible d'ici peu l'observation d'objets de faible luminosité avec une résolution angulaire exceptionnelle. Il s'agit du VLT (le Very Large Telescope de l'Observatoire européen austral, au Chili) qui exploite un réseau de quatre télescopes de huit mètres, et de l'Interféromètre Keck composé de deux télescopes de dix mètres espacés de 85 mètres. Ces installations seront bientôt complétées à l'aide de petits télescopes plus espacés. On pense aussi utiliser des interféromètres satellisés, ce qui éviterait les difficultés liées à la turbulence atmosphérique. Trois projets sont en cours : *Space Interferometer Mission*, *Terrestrial Planet Finder* et *MicroArcsecond X-ray Imaging Mission*, qui visent à doter l'astrométrie, c'est-à-dire la branche de l'astronomie qui mesure les positions des étoiles, d'une précision de l'ordre du millionième de seconde d'angle, laquelle est nécessaire à la détection des exoplanètes.

Arsen Hajian est astronome à l'Observatoire naval des États-Unis, et a rejoint le groupe du NPOI en 1995. Thomas Armstrong est astronome au Laboratoire de recherche navale de Washington. Il est l'un des concepteurs du NPOI. Pierre LÉNA, *Méthode de physique de l'Observation*, éditions du CNRS, 1996. John W. Hardy, *L'optique adaptative*, in *Pour la Science*, n° 202, août 1994.

M. SHAO et COLAVITA, *Long-Baseline Optical and Infrared Stellar Interferometry*, in *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, vol. 30, pp. 457-498, 1992.

Thomas ARMSTRONG, Donald HUTTER, Kenneth JOHNSTON et David MOZURKEWICH, *Stellar Optical Interferometry in the 1990s*, in *Physics Today*, vol. 48, n° 5, pp. 42-49, mai 1995.

L'Hôpital Laennec

400 ans d'histoire de la médecine

ALAIN DAUPHIN • CHRISTINE MAZIN-DESLANDES

L'un des principaux hôpitaux parisiens a été fermé il y a quelques mois. Si les contraintes économiques ont menacé plusieurs fois sa survie, elles n'ont jamais été assez fortes pour le faire disparaître. La relecture de son histoire évitera peut-être que les exigences actuelles n'aient raison de la médecine d'excellence française.

La dernière réforme des hôpitaux publics et le souci légitime de moderniser les structures de soins auront eu pour conséquence la fermeture de l'Hôpital Laennec, établissement hospitalo-universitaire au service des Parisiens depuis 366 ans. Le personnel et les équipements de cet hôpital, qui appartient à l'Assistance publique-Hôpitaux de Paris, viennent, avec ceux des hôpitaux Boucicaut et Broussais, d'être regroupés sur le nouveau site de l'Hôpital Georges Pompidou, dernière construction hospitalière parisienne du XX^e siècle.

C'est la plus grande restructuration jamais réalisée par l'Assistance publique qui a fêté son cent cinquantième en 1999. Situé à la limite du sixième et du septième arrondissement de Paris, l'Hôpital Laennec était le dernier survivant de ces structures hospitalières charitables, fruit d'une initiative et d'un engagement de particuliers, implantées au cœur d'une capitale européenne. Il aura occupé, au cours des siècles, une place variable dans le système de soins pour atteindre finalement une renommée internationale par la qualité de ses traitements, le rayonnement de son enseignement et sa contribution à l'innovation (la maladie de Berger fut la dernière entité décrite par un médecin de l'Hôpital Laennec).

Successivement Hôpital des Incurables, puis Maison de la tuberculose, il aura triomphé des pathologies auxquelles il était consacré. À l'aube du troisième millénaire et de l'Union européenne, il finit à la pointe du progrès médical, chirurgical et pharmaceutique dans de nombreux domaines, tels la pneumologie, la chirurgie, la greffe cardiaque ou le traitement des cancers, tout en maintenant une tradition d'hospitalité et de secours auprès des plus vulnérables.

Son histoire a duré près de quatre siècles ; elle est riche d'enseignements sur l'évolution des structures hospitalières, des professions médicales et soignantes, et sur celle des techniques médico-chirurgicales et des traitements. Elle retrace une période très active des hôpitaux publics nés de la charité et stimulés par le devoir légal d'assistance, mais aujourd'hui menacés par le devoir de rentabilité ; cette histoire a été marquée par une extraordinaire adaptation aux besoins et par une prodigieuse contribution à l'« obligation » de santé, grâce à l'évolution des structures (des urgences à la réanimation), des

traitements (des élixirs aux médicaments obtenus par génie génétique, des prothèses à la chirurgie par endoscopie) et de la recherche (du diagnostic à la prévention).

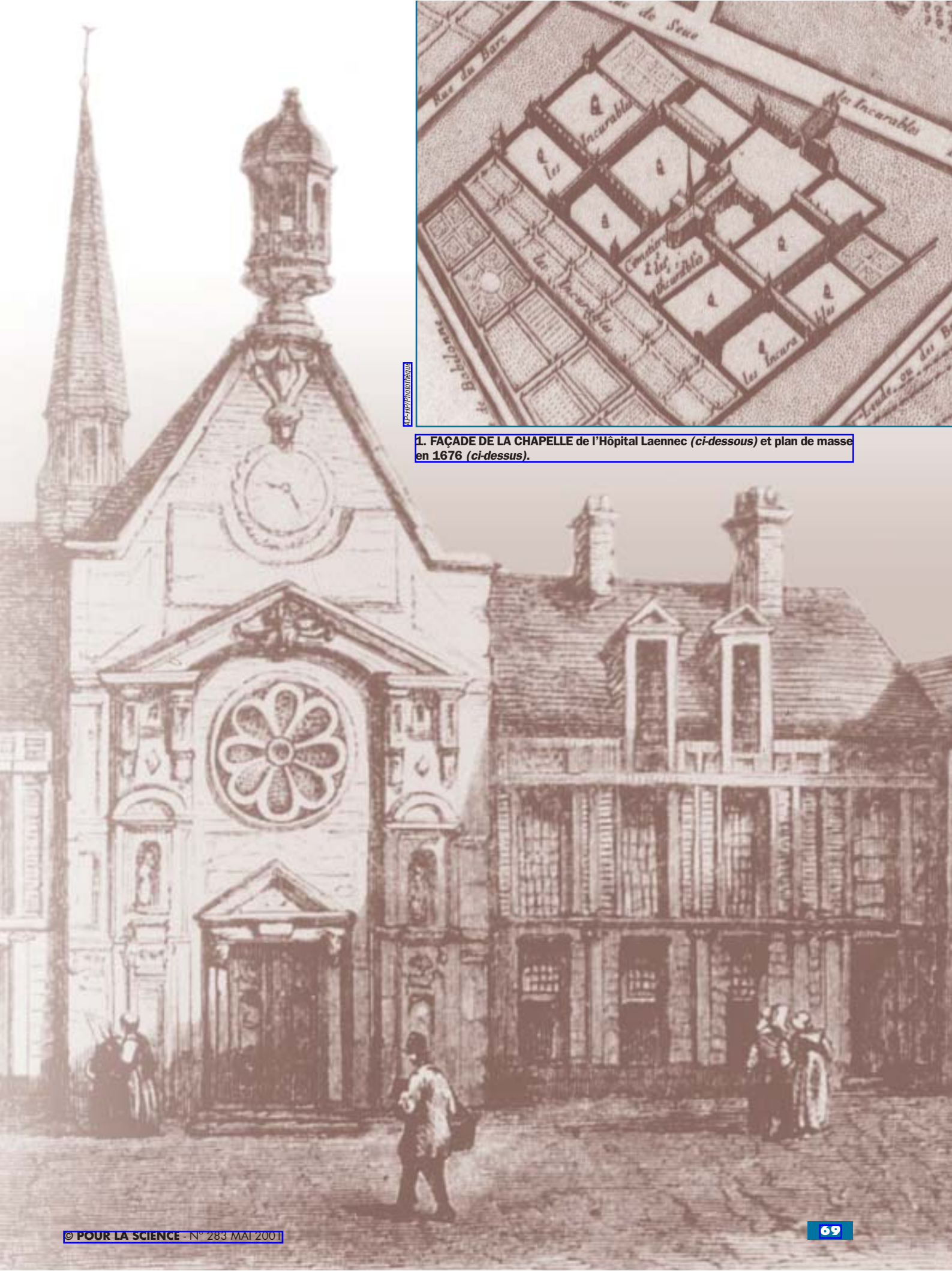
Cette histoire rappelle aussi l'activité de milliers de professionnels qui se sont consacrés, laïcs et religieux, bénévoles et salariés, chirurgiens et praticiens, chercheurs et étudiants, à quelques millions de patients venus d'horizons divers – parisiens ou provinciaux, aisés ou démunis, émeutiers ou soldats – confier leur souffrance et leur détresse. Tout commence alors que la France de Richelieu s'engage dans la guerre religieuse et politique de Trente ans.

L'hôpital des Incurables

En 1634, à la demande du cardinal François de La Rochefoucauld, l'Hôtel-Dieu cède dix arpents de terre « au terroir de Saint Germain des prés en la Grande rue sur le chemin qui conduit à Sèvres » pour y construire ce qu'aucune institution charitable n'avait osé entreprendre : un hôpital et une maison pour les pauvres affligés de maux incurables. Encore plus extraordinaire, ce cardinal, grand aumônier de France, abbé de Sainte-Geneviève, qui dirige l'entreprise, est un vieillard de 76 ans.

Il veut concrétiser le souhait de deux généreux donateurs de l'Hôtel-Dieu, François Joulet, prêtre et seigneur de Châtillon, et Marguerite Rouillé, épouse de Jacques le Bret, conseiller au Châtelet. L'abbé Joulet, ancien aumônier et prédicateur ordinaire du roi Henri IV, avait légué toute sa fortune à ces « Messieurs les Maîtres, gouverneurs et administrateurs dudit grand Hôtel-Dieu de Paris » pour commencer un hôpital de « maladies incurables ». À sa mort en 1627, il laisse une fortune mobilière de près de 40 000 livres et quelque 20 000 livres de rente que François de La Rochefoucauld, sept ans plus tard, soustrait au patrimoine de l'Hôtel-Dieu pour mener à bien son projet. Les premiers bâtiments édifiés sont ceux qui longent la rue de Sèvres et ceux qui encadrent l'église, cette dernière étant consacrée le 11 mars 1640.

La salle Notre-Dame et la salle Saint-Charles sont les deux premières achevées. Leur disposition en croix est conforme aux plans d'origine de Christophe Gamard, voyer de l'abbaye



1. FAÇADE DE LA CHAPELLE de l'Hôpital Laennec (ci-dessous) et plan de masse en 1676 (ci-dessus).



2. ENTREE DE L'HOPITAL, rue de Sèvres, vers 1920.

de Saint-Germain et maître d'œuvre de la ville. L'extension du bâtiment se fait à mesure des besoins et des ressources pécuniaires apportées par de nouveaux fondateurs et des pensionnaires «payants», tels que l'évêque de Belley, le duc de Vantadour et Madame de La Sablière, la protectrice de Jean de La Fontaine, qui se retira aux Incurables en 1678 (la totalité de l'édifice ne sera réalisée qu'un siècle plus tard).

Les quatre bâtiments sont conçus sur le même plan : un vaste rez-de-chaussée voûté, très élevé (huit mètres environ), pour les malades ; un premier étage, bas de plafond, pour le personnel et les services ; enfin un grenier dont la magnifique charpente est encore intacte.

Pour résister à la poussée des voûtes, les murs, en pierre de taille, sont soutenus par d'épais contreforts découpés en arceau à leur base. Ces contreforts, reliés à l'extérieur par un mur, et couverts d'un toit, forment, de chaque côté des salles, un couloir. Les fenêtres repoussées au-dessus des contreforts, à trois mètres environ au-dessus du sol, n'offrent qu'une faible clarté et une aération insuffisante.

Le centre, où convergent les quatre branches de la croix, est occupé par un autel où l'on célèbre chaque jour la messe. Chaque croix (une pour les femmes et une pour les hommes) délimite quatre cours particulières, creusées en leur centre d'un puits qui ne sert pas longtemps, car l'eau n'est pas potable, sans doute en raison d'infiltrations provenant des latrines, du cimetière tout proche et de la Seine périodiquement en crue. Conformément aux vœux de ses fondateurs, l'Hôpital des Incurables

accueille, à partir de 1637, de plus en plus de «pauvres» atteints de ces maladies «qui sont naturellement incapables de guérison». Ces maux incurables «reconnus par les médecins et chirurgiens dudit hospital doivent rendre les personnes tellement invalides qu'elles ne puissent gagner leur vie par aucun travail».

Le 14 février 1645, le cardinal de La Rochefoucauld meurt après avoir obtenu du roi lettres patentes, privilèges, franchises, exemptions de droits et autorisations de l'abbé de Saint-Germain et de l'évêque de Paris. En avril 1689, l'établissement compte 220 malades et 33 personnes pour en prendre soin : «Cinq ecclésiastiques, un receveur, un commis écrivain, un médecin, un chirurgien, un apothicaire, deux tapissiers, un dépensier, un sommelier et un sous-sommelier, deux boulangers, trois cuisiniers, un boucher, un menuisier, un maçon, deux jardiniers, deux portiers, un garçon sacristain et six garçons de salle.»

Première menace de faillite

Cette année 1689 est bien sombre pour la jeune institution, qui est au bord de la faillite. La toute-puissante intervention du roi la sauve de ses créanciers, et des mesures drastiques rétablissent l'équilibre entre les revenus et les dépenses : le personnel, laïc jusqu'alors, est remplacé par quatre sœurs de la Charité ; le médecin et l'apothicaire sont renvoyés, le nombre des malades est réduit, une partie des immeubles est vendue et le prix de fondation d'un lit passe de 2 000 livres à 10 000.

La nouvelle gestion améliore la situation. Soixante ans plus tard, l'hôpital

compte 360 lits, grâce à 188 fondateurs. Jacques Tenon en compte 370, en 1788, dans son *Mémoire sur les hôpitaux de Paris* : «On compte aux Incurables 74 personnes de service : à savoir, quatre ecclésiastiques, quatre officiers, 43 sœurs de la Charité, 22 domestiques. C'est une personne secourable par 5 malades ou à peu près». On achète la viande et les médicaments à l'Hôtel-Dieu.

Chaque admis doit respecter le règlement de l'hôpital, lequel précise les horaires de chaque événement de la journée, qui commence à cinq heures pour se terminer à «huit heures trois quarts, [où] toutes les chandelles seront éteintes, tous les malades couchés et les portes des salles fermées à clef et seront les dites clefs gardées par les sœurs». La vie de l'institution traduit la volonté de s'attacher autant aux soins des âmes qu'à celui des corps. Elle est rythmée par les prières, la messe dite sur l'autel, les soins du matin et du soir, et le travail de huit heures et demie jusqu'à dix heures. Ce travail est «quelqu'ouvrage utile pour la maison».

Si la période troublée de la Révolution entraîne, en 1789, l'abolition du règlement intérieur, elle n'apporte pas de moyens supplémentaires pour l'entretien des locaux malgré la loi du 2 juillet 1794, édictée par la Convention, qui nationalise les biens des établissements de charité. En 1801, le Conseil général des hospices est créé pour organiser l'activité des hôpitaux parisiens.

La situation est dramatique. Les toitures ne «garantissent plus contre les ravages de la pluie. Les portes ou les fenêtres [sont] chancelantes ou brisées, les plâtres se détachent des murs, les locaux [sont] humides et malsains», résultat d'une longue dégradation. Des réparations sont engagées d'urgence ; les restructurations hospitalières réservent aux Incurables la prise en charge des femmes. L'hôpital prend le nom d'Hôpital des Incurables-Femmes, tandis que les hommes sont transférés à l'ancien Couvent des Récollets, connu plus tard sous le nom d'Hôpital militaire Saint-Martin, puis d'Hôpital Villemin.

Reconnue d'utilité publique, la communauté des Filles de la Charité est rappelée en 1810 par le Conseil des Hospices pour remplacer en partie le personnel laïc. Les sœurs de la Charité, dont le noviciat est rue du Bac, s'installent aux Incurables. Elles sont 32, aidées de 26 garçons ou filles de service, à s'occuper de 686 femmes malades. Toutefois, en 1869, l'Administration

générale de l'Assistance publique, instituée le 10 janvier 1849 et qui regroupe la plupart des hôpitaux civils parisiens, dont les Incurables, décide de transférer les malades à l'Hôpital d'Ivry, et l'Hôpital des Incurables-femmes est fermé.

Rouvert en 1870, à cause de la guerre, par cette même administration, l'Hôpital des Incurables est à nouveau fermé en juillet 1871, puis reprend du service sous le nom d'Hôpital Temporaire, en 1874, avant de prendre le 14 février 1879, par arrêté du préfet de la Seine, le nom du célèbre médecin de l'Hôpital Necker, Théophile René Yacinthe Laennec (1781-1826), qui avait défini la nature infectieuse de la tuberculose et en avait décrit les lésions anatomo-pathologiques. Il fut le premier à utiliser un tube creux (l'ancêtre du stéthoscope) pour écouter les crépitements des poumons et un cylindre de bois pour écouter le cœur. L'hôpital commence à accueillir les malades aigus, qu'ils soient adultes ou enfants (et non plus seulement les incurables).

L'Hôpital Laennec

Le pouvoir politique décide le recrutement d'infirmières laïques pour répondre aux besoins toujours croissants de la population hospitalière, principalement constituée d'indigents. De nombreuses améliorations voient le jour, et les structures hospitalières sont modifiées : on crée une consultation externe avec délivrance gratuite des médicaments en 1879, une salle de cours et des services médicaux et pharmaceutiques en 1881, des laboratoires en 1882 ; on améliore le chauffage et l'éclairage au gaz, on construit un service de bains

en 1883. L'Hôpital Laennec compte 520 lits répartis en quatre services de médecine, un service de chirurgie, ainsi qu'un service de pharmacie, qui réalise les analyses biologiques. Parmi les 126 personnes qui y travaillent, 92 sont affectées au service des malades qui viennent à l'hôpital pour des soins et des examens sans admission ou pour des séjours de courte durée. L'hébergement n'est plus synonyme d'internement, les notions de convalescence et de transfert vers d'autres structures de soins apparaissent ; les traitements deviennent de plus en plus spécialisés.

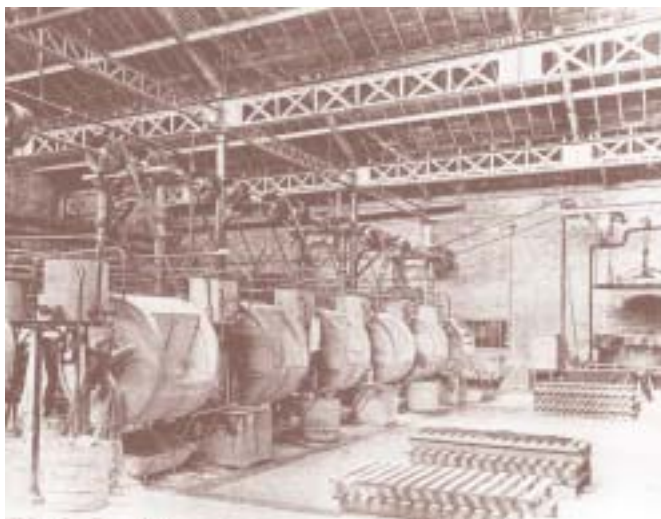
Tuer les germes ou les éviter : antiseptie contre aseptie

Lors de l'éclosion de la chirurgie, l'Hôpital Laennec prend une place prépondérante du fait de la qualité de ses « patrons », dont le premier fut Félix Terrier. Lors de ses voyages à Londres, en 1871, il avait vu opérer des collègues britanniques, notamment Joseph Lister, qui introduisit l'antiseptie : conscient des dommages que pouvaient engendrer les micro-organismes pathogènes, il pulvérisait sur l'opéré une solution antiseptique, l'huile phéniquée. Il avait aussi remarqué deux chirurgiens, qui ne pratiquaient pas l'antiseptie, mais prêtaient une attention toute particulière à la propreté et obtenaient d'assez bons résultats. Jusqu'à la fin des années 1880, les interventions chirurgicales avaient lieu en public, dans les amphithéâtres où les chirurgiens opéraient en habit ou revêtus d'une tenue souillée par le sang ou par le pus des jours précédents.

Après avoir utilisé les méthodes antiseptiques prônées par Lister, il tente une

« aseptie partielle » en opérant, dans les murs de l'Hôpital Temporaire, entre 1874 et 1876, 11 kystes de l'ovaire. Il opère ces onze malades dans une pièce située sous les toits, après avoir fait passer les parois à la chaux. Il refuse d'opérer dans les salles de l'hôpital où avaient défilé pendant des années des suppurations virulentes. Il demande à ses aides de faire un séjour de quelques jours à la campagne, avant la date de l'opération ; lui-même, pendant ce temps, s'impose de ne pas toucher de plaies virulentes et de ne pas faire de pansements. Ses instruments sont neufs. Il utilise de l'eau qui a été bouillie. Les compresses de toile et le coton sont préparés à son domicile par sa femme et par sa mère. Sur onze opérés, il y eut neuf succès et deux décès. Ces deux morts survenues dans le futur Hôpital Laennec le conduisent à revenir temporairement à l'antiseptie avant d'aller travailler dans le petit laboratoire de Louis Pasteur et Émile Roux, où il se prépare à l'aseptie avec son élève Poupinel. Ainsi, la chirurgie « propre » fait ses premiers pas à l'Hôpital Temporaire, avant même la chirurgie aseptique.

La notion de salle d'opération et de dépendances spécifiques met plus de dix ans à s'imposer. Vers la fin des années 1880, la direction de l'administration générale de l'Assistance publique accepte de créer dans les jardins un pavillon de 20 mètres sur 14 comportant une salle d'opération et cinq lits d'hospitalisation réservés aux grandes opérations faites à l'Hôpital Laennec. Il prendra en 1888 le nom de pavillon Récamier.



3. LES COMMUNS DE L'HOPITAL LAENNEC, vers 1910 : les tonneaux laveurs de la blanchisserie (à gauche) et la cuisine (à droite). Des tisanières (en haut) servaient à la préparation par la pharmacie de la boisson du petit déjeuner.

Parce que la chirurgie évolue, que le droit à l'assistance et au progrès médical (l'assistance médicale gratuite est créée en 1893) s'étend et que la III^e République veut moderniser le patrimoine hospitalier, le nombre de lits d'hospitalisation ne cesse de croître. Ainsi, en 1898, l'Hôpital Laennec assure 7 267 consultations de médecine et 7 870 de chirurgie ; on y dénombre 633 lits réglementaires, attribués à la médecine ou à la chirurgie (318 pour les hommes, 295 pour les femmes et 20 berceaux).

«Au 1^{er} janvier 1896, on constatait la présence à l'hôpital de 709 malades ; pendant cette année, il en est entré 4 302 et sorti 3 730. Le nombre des morts a été de 533. Le chiffre des malades restants au 31 décembre 1896 était de 748. Pour cette année 1896, le nombre de journées de malades a été de 266 979. La mortalité, calculée d'après le nombre des individus sortis par guérison ou par décès divisé par le nombre des morts, a été de 1 sur 7 en médecine et de 1 sur 14 en chirurgie. La durée du séjour, calculée d'après le nombre des journées divisé par le nombre des individus sortis par guérison ou par décès, a été de 69,45 en médecine et de 43,63 en chirurgie.»

C'est à ce moment que l'Hôpital Laennec devient la Maison de la tuberculose et du poulmon.

La Maison de la tuberculose et du poulmon

Depuis 1878 de nombreux tuberculeux pauvres étaient déjà hospitalisés à l'Hôpital Laennec, dans les salles communes. Les instructions administratives sur les admissions recommandent de ne recevoir «les phtisiques que lorsqu'ils sont arrivés au dernier degré de l'épuisement, lorsque, sans asile convenable, sans ressources régulières, ils viennent réclamer l'humble lit de repos et de mort que l'humanité leur doit».

En 1891, la tuberculose, responsable de 20 pour cent des décès en France, devient une préoccupation des politiques, mais les décisions tardent. En 1900, 148 lits sont finalement réservés aux tuberculeux dans les hôpitaux parisiens, les incurables étant dirigés vers l'Hôpital de Brévannes à partir de 1907. En 1905, un service de 250 lits est ouvert à l'Hôpital Laennec, ainsi que deux services similaires à l'Hôpital Tenon et à l'Hôpital Saint-Antoine. Le choix de l'Hôpital Laennec n'est pas lié au hasard : depuis 1890, Louis Landouzy (1845-1917) y exerce et a créé – à ses

frais – un laboratoire de bactériologie. Grâce aux nombreux travaux réalisés notamment, en Allemagne, par Robert Koch, qui a découvert le bacille de la tuberculose en 1882 et le vibron du choléra en 1883, et, en France, par Louis Pasteur, il est convaincu de la nécessité «des contrôles bactérioscopiques» pour le diagnostic des maladies infectieuses, souvent impossible d'après le seul examen clinique.

Il s'intéresse surtout à la tuberculose. Depuis longtemps, la «phtisie pulmonaire» a été définie comme une entité clinique, et le crachat est suspecté d'être un élément possible de la transmission de la maladie. La mise en évidence du bacille de Koch sur divers milieux de culture rendra indispensable au diagnostic la recherche du bacille dans les crachats ; dès lors, on utilise des crachoirs pour évaluer l'évolution des lésions pulmonaires ou bronchiques. Puis, à partir de 1896, la radiologie est utilisée pour préciser l'étendue des épanchements pleuraux et pour diagnostiquer la tuberculose pulmonaire. Sur le plan thérapeutique, les médecins sont démunis : en dehors de la cure de repos en sanatorium (les premiers sont fondés en Allemagne vers 1880 et en France, à Bligny, en 1895), on tente quelques traitements, vite abandonnés en raison de leur inefficacité ou parce qu'ils déclenchent des poussées évolutives ; seul le pneumothorax thérapeutique, qui se développe au début du XX^e siècle, est efficace : on insuffle de l'air dans la cavité pleurale (entre les poulmons et l'enveloppe qui les recouvre) des malades tuberculeux, afin de provoquer un «effondrement» du poulmon, qui est mis au repos (les alvéoles infectées finissent par se cicatriser). Des recherches pour améliorer cette technique sont menées à l'Hôpital Laennec d'après les travaux de l'Italien C. Forlanini : le premier pneumothorax artificiel y est réalisé en 1912.

Le sénateur Léon Bourgeois (1851-1925), indigné de l'encombrement des salles réservées aux tuberculeux dans les hôpitaux de Paris, fait adopter un projet de construction d'un groupe de services pour la lutte contre la tuberculose dans une partie de l'Hôpital Laennec et de l'Hospice de Brévannes.

Cette organisation comprend plusieurs établissements en liaison les uns avec les autres : un service hospitalier urbain pour les tuberculeux «en évolution morbide» ; un hospice-sanatorium

pour les tuberculeux pouvant bénéficier d'une cure de repos à la campagne ; un dispensaire pouvant fournir à certains malades une cure de repos sans hospitalisation. Ainsi, selon l'avancement de la maladie, les tuberculeux sont répartis entre ces différents lieux de cure.

Le dispensaire antituberculeux

Le dispensaire antituberculeux de Laennec, qui prendra le nom de Léon Bourgeois, ouvre ses portes le 1^{er} décembre 1910. Les services consacrés aux tuberculeux comprennent 228 lits et sont constitués des services de Louis Landouzy, d'Édouard Rist et de Léon Bernard. Le dispensaire comporte salle d'attente, cabinets de consultation, bureau, laboratoire, postes de radioscopie, lieu de cure de repos, salle de bains, réfectoire, cuisine, lingerie, bibliothèque, salle de conférence.

Le premier bilan du dispensaire établi par Bernard en 1913 indique qu'entre le 1^{er} décembre 1910 et le 30 juin 1913, 19 550 malades ont été examinés, 25 432 journées de présence à la «cure du dispensaire» ont été notées. Le montant des secours accordés aux malades de la cure s'élève à 33 309 francs et 4 996 visites à domicile ont été effectuées.

La loi Léon Bourgeois du 15 avril 1916 consacre officiellement la formule du dispensaire avec des infirmières visiteuses. Bourgeois devient président de la Chambre des députés, puis président du Sénat. Il est l'un des promoteurs de la Société des Nations qu'il préside en 1919. Il reçoit le prix Nobel de la paix en 1920 pour l'ensemble de son œuvre sociale. Après la guerre, Rist, chef du service des tuberculeux, se consacre à l'étude approfondie de la tuberculose avec ses élèves. Il remarque que la fréquence de la tuberculose est élevée parmi les élèves infirmières qui terminent leur stage dans les hôpitaux ; il en déduit que la contagion existe bel et bien et, dès 1920, lorsque le BCG devient disponible, il préconise la vaccination du personnel hospitalier.

Les premiers essais d'un antibiotique différent de la pénicilline, la streptomycine, ont lieu avec Charles Mattei dans le service de Bernard, en même temps que dans le service de Robert Debré, à l'Hôpital des Enfants malades, et de Pierre Mollaret, à l'Hôpital Claude Bernard. En 1944, l'Américain Selman Abraham Waksman, ingénieur agro-

La purification des crachoirs

La question qui se présentait la première, la réforme qu'il était urgent d'introduire, c'était la désinfection des crachats.

La commission avait indiqué le modèle de crachoir indiqué par M. Duguet à Lariboisière comme type du crachoir individuel. J'ai recherché si le crachoir était capable de supporter les hautes températures nécessitées par la désinfection. J'ai reconnu que les crachoirs en verre teinté supportaient beaucoup mieux que les crachoirs en verre blanc ces hautes températures.

La commission de la tuberculose n'avait indiqué aucun appareil de désinfection pour les crachoirs et au cours des diverses discussions qui eurent lieu sur ce sujet, tant au sein de la commission plénière que de la première sous-commission, il a été reconnu que les divers appareils connus actuellement étaient tous défectueux. J'ai donc dû chercher à créer un appareil simple, relativement peu coûteux, installable dans les offices, et de maniement très facile, et j'en ai réalisé un après d'assez nombreux tâtonnements, qui s'expliquent facilement, avec le concours de M. Legueux, le constructeur bien connu. L'appareil que nous avons imaginé consiste en une grande marmite en cuivre, à couvercle non rivé, qui se chauffe au gaz. Il peut recevoir dans des paniers superposés 21 crachoirs Duguet, dont le contenu est porté à la température de 101 °C en une demi heure environ. En laissant cette température agir pendant 20 minutes encore, on obtient une désinfection absolue des crachats ; je m'en suis assuré par nombre d'essais bactériologiques. L'appareil, d'un maniement extrêmement simple, pourra être mis, sans aucun danger, entre les mains les plus ignorantes.

En possession d'un bon modèle de crachoir individuel et d'un appareil que l'avenir perfectionnera certainement encore, mais qui, dès maintenant, assure la désinfection des crachats d'une manière satisfaisante, nous avons fait l'application du fonctionnement complet et pratique du système dans une des salles de l'hôpital, la Salle Broca, que M. le docteur Landouzy a bien voulu mettre à notre disposition. Depuis un mois déjà, toutes les malades de cette salle ont

reçu le crachoir Duguet, et la désinfection de ces crachoirs se fait tous les jours par mes soins dans mon laboratoire : le service marche d'une façon très régulière et n'a donné lieu à aucune observation.

La question du crachoir individuel, de sa désinfection et de l'établissement pratique du service me paraît résolue : il ne reste plus qu'à en étendre l'application. M. Legueux doit livrer incessamment deux appareils qui seront placés dans les deux offices du service des femmes (médecine) au rez-de-chaussée, et dans quelques jours le service sera ainsi assuré pour une partie de l'hôpital. Nous le généraliserons rapidement, au fur et à mesure que nous serons en possession des nouveaux appareils, et sous peu tous les malades de Laennec seront donc pourvus de crachoirs, et tous ces crachoirs seront méthodiquement et efficacement désinfectés.



Un crachoir collectif est placé au centre de cette salle de malades, vers 1900. Il était régulièrement stérilisé dans un autoclave.



Fig. 42

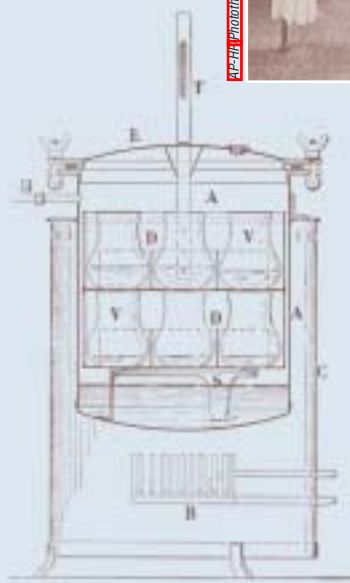


Fig. 43

Les crachoirs individuels étaient stérilisés pendant une vingtaine de minutes à une température qui dépassait légèrement 100 °C et qui détruisait les micro-organismes responsables de la tuberculose. On introduisait dans la chaudière deux paniers de sept crachoirs. Le thermomètre (T) plongeait dans un des crachoirs et indiquait la température. Le stérilisateur était placé dans les salles de malades.

À côté de la question du crachoir individuel, la commission a soulevé la question non moins importante du crachoir collectif (couloirs, salles de réunion, fumoir, etc.). Après de longs tâtonnements, nous avons, avec M. Nielly, adopté un type qui nous a paru satisfaisant : c'est une sorte de seau monté sur un trépied, et élevé de 80 centimètres environ au-dessus du sol. Nous avons muni ce récipient d'un couvercle [...]. Le modèle de crachoir trouvé, il fallait imaginer un appareil de désinfection approprié. L'appareil en usage pour le crachoir individuel était de dimensions impropres, trop restreintes, d'autre part agrandir ses dimensions de façon à le rendre propre au double usage de désinfection du crachoir individuel et du crachoir collectif était impossible, car l'appareil n'aurait pu être disposé dans les offices. Nous avons songé à utiliser...

Extrait du Compte rendu du conseil de surveillance de l'AP-HP du 28 août 1897

nome, avait constaté que le bacille de la tuberculose était détruit lorsqu'il était enfoui sous terre. Il recherchait alors, dans des cultures de bactéries du sol, un principe bactéricide et découvrit la streptomycine, ainsi dénommée parce qu'elle était extraite de bactéries du genre *Streptomyces*. Cette molécule allait constituer l'un de meilleurs médicaments contre la tuberculose.

À l'Hôpital Laennec, la première injection intramusculaire est faite à un jeune patient, le 15 janvier 1947. La première méningite tuberculeuse guérie en France le fut dans cet hôpital.

Avec la streptomycine et l'isoniazide (1952), la mortalité de la tuberculose passe en France de 33 699 à 15 692 cas entre 1946 et 1953. Selon Jean-Émile Courtois, chef du service de pharmacie de 1957 à 1979, «lorsque j'arrivai à Brévannes en 1932, plusieurs salles étaient combles de tuberculeux répartis par l'Hôpital Laennec. À partir de 1958, à Laennec, j'assistai à l'emploi des antibiotiques [...]. Les malades que l'on me recommanda à Laennec le quittèrent convalescents, tandis que j'avais vu dépérir et mourir ceux que l'on m'avait recommandé à Brévannes».

Laennec, centre hospitalo-universitaire

Au début du XX^e siècle, l'activité chirurgicale prend son essor, stimulée par de nouvelles disciplines, l'anesthésie et la bactériologie. Devenue une thérapeutique efficace, la chirurgie bénéficie de la demande massive d'accès aux soins médicaux de la population à laquelle l'hôpital public répond par la loi de la réforme hospitalière du 21 décembre 1941 ; la tendance sera encore amplifiée par la création du régime de Sécurité sociale pour les travailleurs, en 1945.

En 1926, le pavillon Récamier est remplacé par un pavillon de chirurgie moderne avec salle d'hospitalisation (230 lits et brancards) et quatre salles d'opérations, les sous-sols abritant le service de pharmacie et de biologie, et un stérilisateur à vapeur.

Cette construction donne à l'Hôpital Laennec l'outil indispensable aux traite-

ments chirurgicaux rendus possibles par la dextérité des chirurgiens, les techniques d'asepsie et de stérilisation, l'anesthésie et la radiologie. Les services d'ophtalmologie et d'oto-rhino-laryngologie en bénéficiaient déjà depuis 1906 pour le premier et 1911 pour le second. Ces deux dernières spécialités seront ensuite regroupées en 1936 avec la stomatologie dans un nouveau pavillon, le pavillon des spécialités. L'Hôpital Laennec comptera presque 200 lits de chirurgie sur un total de 631 lits. Ainsi, cet hôpital prend une place prépondérante en chirurgie thyroïdienne, gynécologique, digestive, mais surtout en chirurgie oto-rhino-laryngologique et thoraco-pulmonaire – du traitement de la tuberculose à celui des anomalies congénitales cardiaques.

Avec André Bloch, Louis Baldenweck et Jacques Ramadier, le service d'oto-rhino-laryngologie de l'Hôpital Laennec acquiert un tel rayonnement qu'il devient, en 1961, avec Paul André le centre de l'École de cancérologie et de chirurgie de la face et du cou, centre qui se développera durant toute la seconde moitié du XX^e siècle.

De nombreuses premières françaises et même mondiales, tant techniques que thérapeutiques, sont à mettre à l'actif de la chirurgie thoraco-pulmonaire : en 1935, amélioration de la technique du pneumothorax ; première intervention à cœur ouvert pour supprimer une communication entre les deux oreillettes du cœur, par

Jean Mathey, en 1957 ; première intervention cardiaque sous hypothermie profonde, pratiquée en France, par le même chirurgien, en 1959 ; première transplantation cardiaque chez le nourrisson (âgé de un mois), en 1987 ; début, en France, de la chirurgie endoscopique thoracique, en 1990. Lors d'une intervention endoscopique thoracique, on introduit dans le poumon du patient une sonde pourvue d'une minuscule caméra, de sorte que le chirurgien observe sur l'écran d'un ordinateur l'intérieur des poumons pendant qu'il actionne de minuscules bistouris télécommandés situés à l'extrémité de la sonde : il opère «sur ordinateur».

Médecins-administration : une discorde de longue date

Si l'on excepte les années de convulsions de la Première Guerre mondiale, dont il existe peu de traces dans les archives, ces progrès sont obtenus, dans un climat de conflit permanent entre les médecins et les chirurgiens de l'hôpital d'un côté, et les administrateurs et le directeur de l'Assistance publique de l'autre : «À l'exception des locaux remis en état à l'intention des tuberculeux, l'Hôpital Laennec ne renferme que des bâtiments en ruine, installations imparfaites, organisations défectueuses. Il est

probable que les mêmes remarques pourraient s'étendre encore à d'assez nombreux hôpitaux de telle sorte que la conclusion serait celle-ci : à l'heure actuelle, faute d'avoir en mains un outillage hospitalier convenable et suffisant, les médecins ne font plus tout ce qu'ils pourraient faire en faveur des malades ; les lacunes ou les défauts de l'hygiène, de l'éclairage, du chauffage, de l'alimentation, etc., découragent les chefs de service et les attristent. Ils n'ont même plus la fierté nécessaire au bien du service ; ils n'osent plus faire entrer dans l'hôpital un visiteur étranger. Quand l'événement les y contraints, ils guettent avec appréhension le regard d'étonnement ou de pitié que provoque la vue de certaines misères chez le visiteur le plus bienveillant.»



4. LEON BOURGEOIS (debout), Georges Dieulafoy (assis de face) et Louis Landouzy (en médaillon) ont marqué l'histoire de l'Hôpital Laennec.

Les défenseurs de l'administration ripostent : «L'administration a beaucoup à faire ; son excessive centralisation, le défaut presque absolu d'initiatives locales ont compliqué sa tâche à l'excès. Par suite, il doit lui être beaucoup pardonné, et les chefs de service des hôpitaux doivent montrer à son égard, en même temps que de la patience, un peu de ténacité. La patience et la ténacité ne sont malheureusement pas leur fort, la plupart d'entre eux voudraient être satisfaits avant même que d'avoir parlé, ou du moins aussitôt après avoir parlé. Voilà où est l'excès, voilà où est la cause d'une foule de malentendus entre l'administration et le corps médical».

Peu après l'ouverture du pavillon de chirurgie, une campagne de presse attaque très durement la gestion de l'Assistance publique et les conditions de vie dans certains hôpitaux. Par exemple, *L'Humanité* accuse «la mauvaise nourriture dans les hôpitaux, un aveu du directeur de Laennec» ; «À Laennec, les «tubards» meurent de faim». Le même journal fait un état des lieux encore plus grave au début des années 1950 : «Là s'élèvent des baraques de bois d'un aspect répugnant, [...] misère, saleté... Au fond de la baraque, dans un retraits minuscule, deux lavabos, pour trois malades atteints de tuberculose. En tout, cinq robinets. La cuvette est sale, jamais désinfectée...» D'autres journaux, comme *Paris-Soir*, font à peu près le même constat. Mauvais entretien ou imprudence, le 12 janvier 1931, l'Hôpital Laennec subit un spectaculaire incendie heureusement sans victimes. Il sera suivi de beaucoup d'autres, malgré les nombreux crédits affectés à la sécurité incendie. Le plus dramatique aura lieu le 16 février 1991, à 20 heures, faisant un mort et cinq blessés graves.

La réglementation hospitalière évolue progressivement vers une reconnaissance de certains droits aux hospitalisés. Après la liberté de conscience et la possibilité d'exercer ses devoirs religieux, les malades se voient reconnaître le droit au secret, le droit d'exprimer leur satisfaction ou insatisfaction par écrit. L'émergence de ces droits s'accélérent avec l'ouverture progressive de l'hôpital à des catégories autres que les indigents, avec la réforme universitaire de 1958 et surtout avec la politique d'humanisation des hôpitaux et la prise en compte du bien-être des malades.



5. SALLE D'OPÉRATIONS à l'Hôpital Laennec, en 1927.

Les débuts de la modernisation

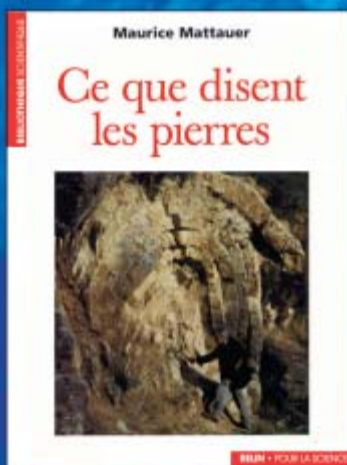
Selon une légende qui courait à Laennec, Simone Weil, alors en charge de la santé au ministère, serait venue rendre visite à l'une de ses amies hospitalisée. Elle en serait sortie bouleversée de ce qu'elle avait vu. C'est de cette époque (1970) que date la politique dite d'«humanisation» des hôpitaux, qui devait aboutir, en quelques années, à la disparition de toutes les salles communes. L'environnement des malades se modifie ; on installe des chambres à quatre lits au maximum, parfois même à un seul lit. Apparaissent également des normes d'hygiène et de sécurité de plus en plus contraignantes, qui défigurent parfois l'architecture plusieurs fois centenaire. Dans le dernier quart du XX^e siècle, l'Hôpital Laennec devient le lieu privilégié d'une médecine de pointe réclamée par des patients informés et qui mettent dans l'hôpital public, financé par l'État, leur espoir de bénéficier du droit à la santé, de l'accroissement incessant du savoir médical et de l'explosion des nouvelles techniques, fruit de la recherche publique et privée.

De nombreux spécialistes, en plus des pneumologues et des chirurgiens, cherchent à offrir aux consultants et aux patients hospitalisés les dernières découvertes et innovations. Dans le domaine des pathologies digestives, le premier coloscope flexible (une caméra

miniaturisée à l'extrémité d'une tube flexible que l'on introduit dans l'intestin par le rectum) est utilisé pour la première fois en 1970, ce qui modifie complètement l'exploration du tube digestif. L'endoscopie interventionnelle et la chirurgie laser renouvellent les traitements des maladies hépatiques et gastro-entérologiques.

À partir de 1952, avec l'arrivée de Georges Tinell, l'Hôpital Laennec renforce les capacités de prise en charge psychiatrique des patients. Cette décision coïncide avec l'augmentation des besoins et l'arrivée des neuroleptiques, puis des antidépresseurs et des tranquillisants. En 1981, la psychiatrie universitaire entre à l'hôpital avec Yves Pélucier et son équipe.

À partir des années 1980, les malades bénéficient des médicaments produits par les biotechnologies (l'insuline, les cytokines, l'érythropoïétine, les facteurs de la coagulation, l'hirudine, l'activateur tissulaire du plasminogène...) pour la plupart réservés à l'usage hospitalier et d'un prix très élevé. Ces dernières innovations et les antirétroviraux nécessaires au traitement du SIDA amènent le ministère de la Santé à confier aux pharmacies hospitalières le soin de distribuer aux malades ambulatoires les médicaments indispensables aux traitements des maladies graves. Ainsi, l'Hôpital Laennec renoue avec la tradition de dispenser gratuitement des médicaments aux malades non hospitalisés, ce qui, dans le passé, avait été



CE QUE DISENT LES PIERRES Maurice Mattauer

Ce livre vous convie à une promenade illustrée dans l'univers des pierres. À partir de l'image, Maurice Mattauer, professeur de géologie à l'Université de Montpellier, reconstitue l'histoire des roches et les grands événements dont elles sont les témoins, et invite à un «retour aux pierres», gage d'une nouvelle compréhension de la nature.

Code 075001 • 100 F
144 pages

Voir bon de commande
page 98

BELIN • POUR LA SCIENCE

source de nombreux conflits avec les apothicaires du voisinage. En ouvrant, le 13 janvier 1997, une unité de préparation des chimiothérapies anticancéreuses dans le Service de pharmacie, l'hôpital améliore la qualité des soins et des traitements tout en assurant la protection du personnels vis-à-vis de médicaments actifs, mais toxiques.

L'ensemble de ces innovations entraîne une augmentation importante de la dépense, qui passe de trois millions et demi de francs au début du XX^e siècle à plus de 37 millions, en 1997. Signalons toutefois que la dépense en médicaments consommés par les patients hospitalisés représentait cinq pour cent des crédits de fonctionnement en 1898 (un peu plus que les dépenses de cave et de blanchissage) et 4,6 pour cent de ceux de 1997. En fait, on doit noter que la dépense a été remarquablement stable, surtout quand on considère l'extraordinaire apport des médicaments à la guérison des maladies, au XX^e siècle. Cette stabilité est vraisemblablement due à l'industrialisation de la production des médicaments, à la bonne gestion des pharmaciens hospitaliers et à l'augmentation du coût des salaires dans les budgets hospitaliers.

En 1689, l'Hôpital des Incurables mettait au service des malades une personne non rémunérée pour sept patients ; l'Hôpital Laennec a fermé avec 1 368 salariés médecins et soignants pour 315 lits, soit 4,3 personnes par malade hospitalisé.

Avec le transfert progressif des malades et du personnel, à partir de juin 2000 dans l'Hôpital Georges Pompidou, l'histoire de cet hôpital, né en 1634 de la volonté de trois généreux

donateurs, prend fin. Les bâtiments classés monuments historiques connaîtront une seconde vie, loin des malades et des souffrances humaines, tandis que les bâtiments récents disparaîtront sous les bulldozers pour laisser place à des logements. Comme dans de nombreuses capitales, le prix des terrains en centre-ville et son corollaire (l'éloignement de la population) auront pour conséquence de reléguer les hôpitaux à la périphérie de l'agglomération urbaine. À travers son histoire, l'Hôpital Laennec illustre les péripéties cycliques de la médecine en France.

Laennec : un plaidoyer pour une médecine de qualité

Cette histoire exceptionnelle par sa durée et par son unité de lieu, d'un établissement de santé au cœur d'une capitale européenne, mériterait d'être méditée au moment où l'hôpital public et les acquis d'une médecine d'excellence sont remis en cause. L'évolution extraordinaire des soins et des traitements a été le fruit de la curiosité tenace et des initiatives audacieuses de praticiens engagés dans une compétition acharnée, et secondés par une administration... parfois dépassée, malgré (ou à cause de) l'accroissement importante de ses effectifs.

La spécialisation médicale est aujourd'hui remise en cause. Pourtant elle n'a pas empêché les reconversions incessantes et rapides liées aux impératifs de santé toujours plus exigeants, aux nouvelles techniques et à un savoir sans cesse plus élaboré, et qu'une mobilisation efficace des équipes soignantes a rendu possibles.

Alain DAUPHIN, dernier chef du Service de pharmacie de l'Hôpital Laennec, dirige le Service de pharmacie et le Laboratoire de toxicologie du Groupe hospitalier Cochin, à Paris. Christine MAZIN-DESLANDES, dernier cadre préparateur de l'Hôpital Laennec, exerce aujourd'hui dans le Service de pharmacie du Groupe hospitalo-universitaire Necker-Enfants malades.

Compte-rendu du Conseil de surveillance, Assistance publique, 1922 à 1955.

Personnel des établissements, Assistance publique, Archives AP-HP, 1871 à 1913, 1918-1929.

P. BOUSSEL, *La pharmacie hospitalière à Paris à travers les siècles. L'Hôpital et l'aide sociale à Paris*, Numéro spécial :

la pharmacie à l'hôpital, vol. 24, pp. 725-734, 1963.

F. CHAST et P. JULIEN, *Cinq siècles de pharmacie hospitalière 1495-1995*, Éditions Hervas, Paris, 1995.

Catalogue de l'exposition du Musée de l'Assistance publique-Hôpitaux de Paris, *Depuis 100 ans, la société, l'hôpital et les pauvres*, éditions de l'AP-HP, 1996.

A. DAUPHIN et C. MAZIN, *Histoire de la pharmacie de l'Hôpital Laennec à Paris*, Paris, 1999.

Ch. DE SINGLY, A. DAUPHIN, M. VOISIN, A.M. MOULIN, A. CONTREPOIS, *De l'Hôpital des Incurables à l'Hôpital Laennec, 1634-2000*, Éditions Hervas, Paris, 2000. (Les illustrations non créditées de l'article sont tirées de cet ouvrage)

Les diodes éclairent le futur

GEORGE CRAFTORD • NICK HOLONYAK • FREDERICK KISH

Les diodes électroluminescentes sont de plus en plus utilisées, et les diodes blanches remplaceront bientôt les ampoules à incandescence découvertes par Edison il y a plus d'un siècle.

En 1995, la Fondation des sciences et de la technologie du Japon a remis, comme chaque année, le prestigieux Prix du Japon à deux scientifiques du monde entier pour leurs découvertes originales en sciences ou en technologies ; Nick Holonyak, inventeur des diodes électroluminescentes, fut récompensé pour ses travaux pionniers sur les semi-conducteurs émetteurs de lumière et sur les lasers. Interrogé sur l'avenir de cette technique, N. Holonyak se contenta de pointer le doigt vers les lampes du plafond et professa : « Tout ceci va disparaître. »

De grands changements sont en cours dans le monde de l'éclairage et de l'électronique, grâce à des dispositifs semi-conducteurs : les diodes électroluminescentes. Ces diodes sont des petites lumières, rouges ou vertes le plus souvent, présentes, par exemple, dans les ordinateurs. Elles remplacent peu à peu les ampoules classiques à incandescence, dont le filament, parcouru par un courant électrique, s'échauffe par effet Joule à plus de 2 500 °C, et émet de la lumière. Pourquoi les diodes électroluminescentes détrônent-elles les ampoules centenaires ? Parce qu'elles convertissent l'électricité en lumière colorée plus efficacement que leurs cousines à incandescence ; pour la lumière rouge, par exemple, l'efficacité est dix fois meilleure. Les diodes sont également plus résistantes : certaines, composées de nitrure de gallium, fonctionnent plus de 100 000 heures, soit dix ans en utilisation régulière, tandis que les ampoules à incan-

descence ont une durée de vie 100 fois plus courte, en moyenne. Parce que leur intensité est aujourd'hui suffisante et que la palette de couleurs qu'elles offrent est large, on utilise les diodes pour fabriquer de grands écrans d'affichage. L'exemple le plus impressionnant est sans doute l'écran géant, haut de huit étages, du Nasdaq, à New York.

Les ingénieurs s'efforcent de réduire les coûts de fabrication, d'améliorer le rendement et d'élargir encore le choix des couleurs disponibles, en y intégrant la couleur blanche. Cette couleur résulte de la somme de toutes les longueurs d'onde et, par conséquent, on ne peut pas la produire directement. Il est déjà possible de combiner les lumières de diodes électroluminescentes rouges, vertes et bleues pour produire une lumière blanche, mais de telles diodes restent onéreuses. Dès qu'elles seront bon marché, elles supplanteront les ampoules à incandescence inventées par Thomas Edison.

70 pour cent des voitures déjà équipées

Les diodes électroluminescentes rouges et orange remplacent déjà les ampoules à incandescence dans de nombreuses applications. Dans l'automobile par exemple, 60 à 70 pour cent des voitures produites en Europe utilisent des diodes électroluminescentes pour les feux de freinage (les États-Unis s'orientent dans la même direction). On utilise des diodes également pour les feux arrière, les cli-

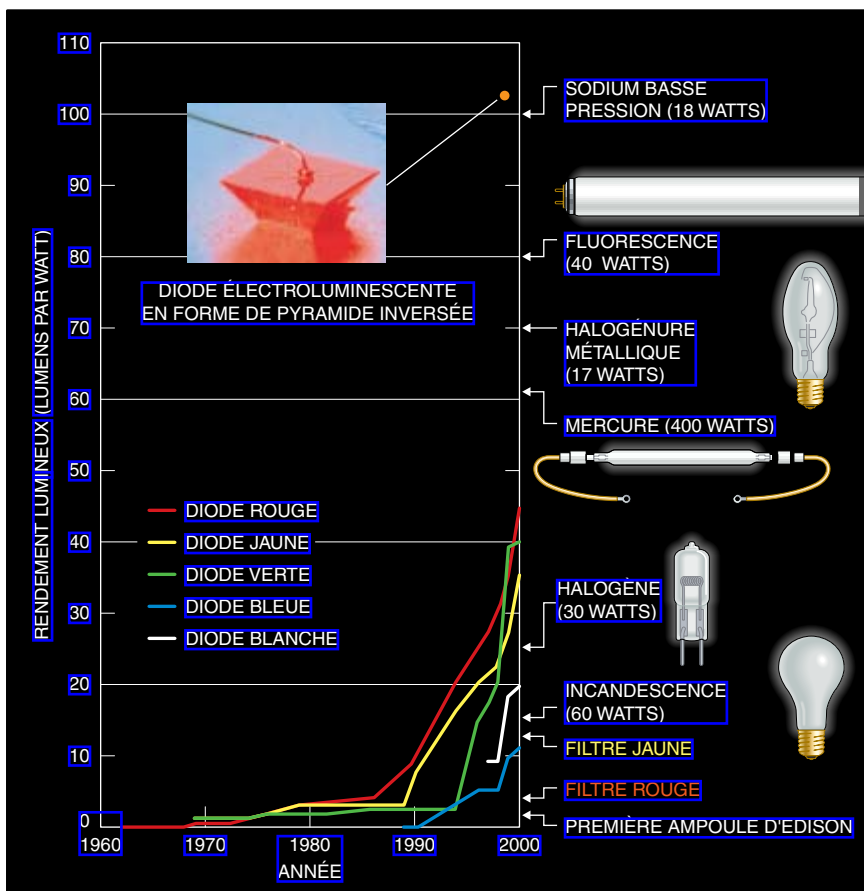
gnotants et les feux latéraux des bus et des poids lourds. D'ici une dizaine d'années, elles seront utilisées pour la plupart des feux extérieurs, rouges et orange, des véhicules. Les feux de signalisation routière en utilisent aussi de plus en plus.

Jusqu'à présent, les feux de signalisation et les autres lampes colorées étaient des ampoules à incandescence recouvertes d'un filtre teinté. Même si les ampoules émettent une lumière qui ne coûte que quelques centimes par lumen (l'unité de mesure du flux lumineux), c'est une façon peu efficace de produire de la lumière. Un filtre rouge, par exemple, bloque environ 80 pour cent de la luminosité, de sorte que la puissance de la lumière émise par l'ampoule passe d'environ 17 à quatre lumens par watt.

Certes, chaque lumen issu d'une diode électroluminescente rouge revient à environ 90 centimes, mais la lumière émise a directement la couleur souhaitée. En outre, ces diodes ne consomment que 10 à 25 watts, tandis qu'une ampoule à incandescence de luminosité comparable consomme entre 50 et 150 watts. Ainsi, l'économie d'énergie compense le surcoût de la diode électroluminescente en un an seulement. Enfin, les coûts d'entretien et de main-d'œuvre des diodes électroluminescentes sont inférieurs à ceux des ampoules.

1. LE PLUS GRAND ECRAN du monde contient quelque 18 677 760 diodes électroluminescentes couvrant une surface de près de 1 000 mètres carrés. Il est placé sur la tour du marché des nouvelles technologies, le Nasdaq, à New York.

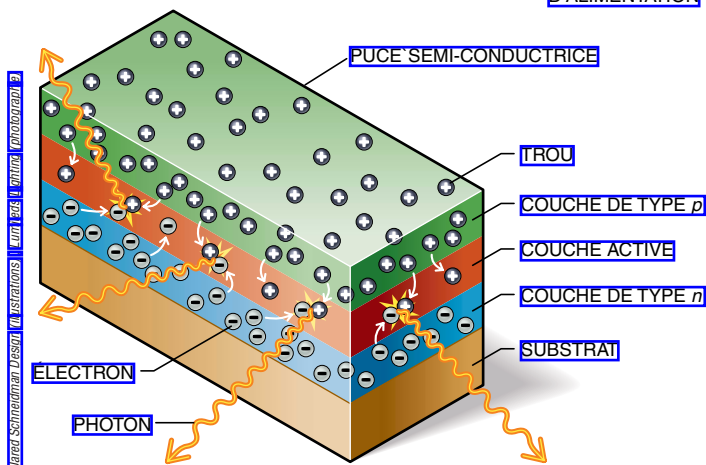
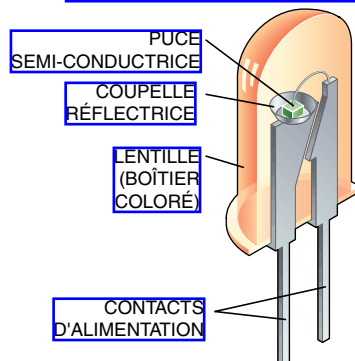




2. LES DIODES ELECTROLUMINESCENTES ont aujourd'hui un meilleur rendement que beaucoup d'autres types de lumière. La plus performante est une diode prototype de couleur rouge-orangée en forme de pyramide inversée.

3. LA PUCE A SEMI-CONDUCTEUR est l'élément principal de la diode électroluminescente. Une différence de potentiel appliquée sur la puce semi-conductrice repousse, vers la couche active, des «trous» (des «charges positives») de la couche de type *p*, et des électrons de la couche de type *n*. Lorsqu'ils se rencontrent, ils libèrent des photons. La «couleur» de ces photons, c'est-à-dire leur longueur d'onde, dépend de la composition chimique des couches, et non des boîtiers colorés dans lesquels les fabricants logent les diodes de manière à les identifier.

DIODE ÉLECTROLUMINESCENTE : VUE DE L'INTÉRIEUR



Les architectes d'intérieur se sont intéressés aux diodes dès l'apparition des premiers modèles à haute luminosité et en couleur, il y a quelques années. Ils combinent des diodes électroluminescentes de différentes teintes, et créent ainsi toute une gamme de couleurs. Par exemple, une lumière blanche composée de diodes électroluminescentes rouges, vertes et bleues devient plus «froide» quand on éteint la plupart des diodes rouges et qu'on allume les bleues.

Cette flexibilité va bouleverser notre utilisation de la lumière. Jusqu'à présent, pour modifier la luminosité dans une pièce, on changeait le papier peint ou l'on repeignait la pièce d'une autre couleur. Aujourd'hui, inutile de sortir les pinceaux : on ajuste la proportion des différentes longueurs d'onde émises, en jouant sur les combinaisons de diodes électroluminescentes. Le Metropolitan Museum of Art à New York, par exemple, a déjà choisi ce type d'éclairage pour illuminer une exposition des costumes des Beatles, en 1999 ; cet éclairage met en valeur les costumes et n'endommage pas les étoffes, car la source ne dégage pas de chaleur. De même, les photographes peuvent désormais contrôler les sources de lumière artificielle sans recourir aux différents filtres placés devant les projecteurs.

La recherche médicale s'intéresse également aux propriétés de ces diodes. Dans la lutte contre le cancer, par exemple, elles facilitent le traitement local des tumeurs, par photochimiothérapie. Cette méthode vise les tumeurs malignes peu volumineuses pour lesquelles les moyens thérapeutiques classiques sont inutilisables ou inefficaces. Tout d'abord, on injecte par voie intraveineuse un agent photosensible. Il est capté préférentiellement par le tissu tumoral, qui l'élimine plus lentement que les tissus normaux. Puis on active cet agent par un rayonnement lumineux dont la longueur d'onde est adaptée ; la substance devient toxique pour les tissus quand elle est activée, de sorte qu'elle détruit les cellules cancéreuses qui ont fixé l'agent photosensible. Grâce à des assemblages de diodes électroluminescentes, on produit ainsi un faisceau uniforme qui stimule les substances photosensibles sans chauffer la peau, car les diodes électroluminescentes ne sont pas des sources lumineuses chaudes.

Au cœur d'une diode

Pour observer en détail les diodes électroluminescentes, prenons par exemple un feu rouge de bicyclette. À l'intérieur se trouvent deux piles reliées à un circuit contenant une série de cylindres transparents et incolores, de quelque huit millimètres de hauteur et cinq millimètres de diamètre : ce sont les diodes électroluminescentes. Appuyez sur le bouton «marche» et elles deviennent rouges, avec une intensité si forte qu'on a du mal à les fixer. Si vous les arrêtez, puis que vous les examinez de près, vous verrez un fil se faufilant à travers le dispositif et une sorte de coupelle miniature à mi-hauteur. Cette coupelle est un réflecteur, où se trouve une puce de la taille d'un grain de sable, le «cœur» de la diode électroluminescente. Cette puce est constituée d'un empilement de couches : la première, déposée sur un support, présente un excès d'électrons ; elle est dite de type n (pour «négatif»). Une autre, située au-dessus de la puce, présente au contraire un déficit d'électrons, ou encore un excès de particules chargées positivement, nommées «trous». Ce matériau est de type p (pour «positif»). À la jonction de ces deux couches n et p se trouve la couche dite active, d'où la lumière est émise. Lorsqu'une tension est appliquée, les électrons et les trous se dirigent vers la couche active, où ils se rencontrent, se «recombinent» et émettent des photons. Schématiquement, les électrons présents dans la couche active se désactivent en «tombant» dans un trou et émettent un photon. La nature et la struc-



4. LES DIODES ELECTROLUMINESCENTES BLANCHES existent, mais il faudra attendre une dizaine d'années avant qu'elles ne deviennent assez puissantes pour éclairer une pièce et assez bon marché pour qu'elles soient compétitives avec les ampoules classiques.

ture atomique des différentes couches déterminent le nombre de photons émis (soit le rendement de la diode électroluminescente), ainsi que leurs longueurs d'onde.

Dans les premières diodes électroluminescentes rouges, fabriquées dans les années 1960 à partir de gallium, d'arsenic et de phosphore, les électrons rencontraient rarement les trous : un seul photon rouge était émis pour 1 000 électrons qui migraient dans la couche active. Une telle diode produisait moins d'un dixième de la lumière produite par une ampoule à incandescence de puissance comparable et pourvue d'un filtre rouge. Peu à peu, le rendement des diodes électroluminescentes augmenta, surtout vers les longueurs d'onde situées dans la zone rouge du spectre visible. Aujourd'hui, le rendement interne des diodes rouges atteint 100 pour cent, c'est-à-dire que chaque électron produit un photon. Cependant, ces photons restent piégés dans la puce, et

l'on doit «extraire» cette lumière. Ainsi, le rendement réel (ou externe) des diodes électroluminescentes rouges est d'environ 25 pour cent.

Les chercheurs ont augmenté le rendement en modifiant la composition des couches. Ils les «dopent» avec des atomes différents, nommés des «impuretés». Ce dopage modifie les caractéristiques des couches. Examinons l'exemple le plus simple, le silicium. Il appartient au groupe IV de la classification périodique des éléments, c'est-à-dire qu'il possède quatre électrons disponibles pour des liaisons avec quatre autres atomes. Dans la forme cristalline du silicium, chaque atome partage ses électrons avec les atomes adjacents. Les électrons sont engagés dans ces liaisons et ne sont pas libres de se déplacer. Lorsqu'un petit nombre d'atomes du groupe III de la classification périodique, ayant trois électrons sur leur niveau d'énergie le plus élevé, par exemple le bore, sont incorporés dans un cristal de silicium, le nombre d'électrons participant aux liaisons entre les atomes est insuffisant, et des déficits d'électrons apparaissent localement, ce qui crée des trous et rend donc ce matériau – du silicium dopé au bore – de type p . Inversement, lorsque le silicium est dopé avec du phosphore (du groupe V du tableau périodique), qui a cinq électrons disponibles, le cristal a un excès d'électrons, ce qui rend le matériau de type n . Les électrons en sur-nombre sont libres de se déplacer. Dans les diodes électroluminescentes, le cristal n'est pas du silicium pur, mais un mélange d'éléments des groupes III et V, tels l'aluminium, le gallium, et

Diodes électroluminescentes et lasers

Quelle est la différence entre les diodes électroluminescentes et les diodes lasers ? Les deux types sont constitués de matériaux semi-conducteurs, mais ce sont des dispositifs très différents.

Les diodes lasers sont composées d'un matériau semi-conducteur placé entre deux miroirs séparés par ce que l'on nomme une «cavité de résonance». Lorsque de l'électricité traverse le semi-conducteur, il y a émission de photons, qui sont réfléchis sur les parois de la cavité dans un sens, puis dans l'autre. Ce faisant, ils excitent des électrons qui émettent, à leur tour, des photons de la même longueur d'onde. L'intensité lumineuse augmente et, parce qu'ils se réfléchissent de conserve sur les miroirs, tous les photons «marchent au pas» : ils sont en phase (on dit aussi qu'ils sont cohérents). L'un des miroirs est



LES LECTEURS DES CODES-BARRES contiennent des lasers à semi-conducteurs.

semi-réfléchissant et permet à quelques photons de s'échapper, tous de même longueur d'onde et de même phase. Ils produisent un faisceau de lumière étroit, monochromatique et intense. Ce faisceau est l'une des principales caractéristiques d'un laser. Acéré comme un scalpel, il est utilisé pour balayer et lire les sillons des disques compacts ou les codes-barres.

Au contraire, dans les diodes électroluminescentes, les photons ne sont pas confinés dans une cavité, entre deux miroirs : ils sont «incohérents». La lumière, sous forme d'un faisceau large et diffus, est composée de plusieurs longueurs d'onde, qui sont pourtant assez proches pour que l'œil les perçoive comme étant de la même couleur.

Que la lumière blanche soit

Les diodes électroluminescentes fabriquées aujourd'hui émettent des longueurs d'onde dans l'ensemble du spectre visible, entre 400 nanomètres et 750 nanomètres. La couleur d'une diode électroluminescente classique dépend du semi-conducteur utilisé : avec les phosphures, on obtient des longueurs d'onde allant du rouge au jaune-vert et, avec les nitrures, du vert au bleu. En revanche, la lumière blanche ne correspond pas à une longueur d'onde précise, mais à un mélange de plusieurs longueurs d'onde. La production de lumière blanche à partir de diodes électroluminescentes nécessite la combinaison de plusieurs couleurs.

Étudions un diagramme de chromaticité : toutes les couleurs visibles sont représentées. Quand on dispose d'une diode rouge (R), d'une verte (V), et d'une bleue (B), on peut les combiner et produire une multitude de couleurs en jouant sur l'intensité de chacune d'elles, et l'on peut même obtenir une lumière blanche. Les diodes blanches sont ainsi souvent constituées d'une diode rouge, d'une bleue et d'une verte. On peut aussi utiliser une diode ultravio-

lette dont les photons excitent un mélange de matériaux dits « convertisseurs du lumière », qui, en se désexcitant, émettent des photons « rouges », « verts » et « bleus », qui forment une lumière blanche. Cette deuxième méthode est moins efficace que la première, car on perd beaucoup de photons par dispersion et par absorption dans le matériau fluorescent.

On peut produire une lumière blanche en combinant trois couleurs, mais aussi deux, le bleu et le jaune, par exemple. En pratique, la puce d'une diode bleue à base de nitrure de gallium est recouverte d'un matériau convertisseur de lumière, qui transforme une partie des photons « bleus » émis par la diode électroluminescente en photons « jaunes », par une succession d'excitations et de désexcitations avec émissions de photons. La proportion de photons bleus convertis dépend de l'épaisseur du matériau convertisseur. En ajustant le nombre de photons bleus et jaunes, on obtient une lumière blanche. Cette troisième solution est moins onéreuse que les précédentes. En revanche, le dépôt du convertisseur nécessite une étape supplémentaire par rapport à l'utilisation directe des diodes de couleur.

Nous avons mis au point une autre solution, qui supprime le dépôt du matériau convertisseur et réduit le coût de fabrication : on produit simultanément les photons bleus et jaunes au cœur même de la puce. Dans cette nouvelle diode blanche, la zone active de la puce (où se recombinent les électrons et les trous) n'est plus constituée d'une seule couche, mais de plusieurs, composées de différents matériaux semi-conducteurs (des nitrures de gallium capables d'émettre d'autres longueurs d'onde que le bleu-vert). Chacune des couches émet des photons d'une longueur d'onde particulière, et les photons de « couleur » différente produits par chacune des couches se combinent en une lumière blanche. Nous cherchons à optimiser le choix des longueurs d'onde et à ajuster le nombre de couches et leurs positions respectives, afin d'obtenir un blanc éclatant.

Nicolas GRANDJEAN, Centre de recherche sur l'hétéroépitaxie et ses applications à Sophia-Antipolis (CNRS)

l'indium et le phosphore par exemple, dopés avec du tellure ou du magnésium. En ajustant avec précision la concentration des éléments constitutifs, les physiciens fabriquent des diodes électroluminescentes qui émettent des longueurs d'onde rouges, orange ou jaunes. Au début des années 1970, la luminosité des diodes rouges contenant du phosphore et de l'arséniure de gallium était suffisante pour les premières calculatrices et pour les horloges à affichage numérique.

Des progrès ont encore été réalisés quand les chercheurs ont découvert que l'empilement de matériaux différents améliorerait le rendement interne de la diode. En effet, les premières diodes électroluminescentes étaient des homojonctions. Elle étaient composées d'une même couche, dopée de façon à être *n* sur une face et *p* sur l'autre, mais ne contenaient pas de couche active. Les diodes de deuxième génération sont des hétérojonctions : une couche de composition différente est introduite entre les couches *n* et *p*. Cette couche active très mince (quelques épaisseurs d'atomes) crée un « puits de potentiel » entre les couches *n* et *p*, où les électrons et les trous se recombinent. Cette couche augmente la probabilité de recombinaison et, par conséquent, le rendement.

Enfin, les cristaux que l'on fabrique aujourd'hui sont quasiment dépourvus de défauts, ce qui augmente le rendement des diodes. Une des techniques utilisées est le dépôt en phase vapeur : des gaz maintenus à haute température sont canalisés au-dessus du substrat ; ils se dégradent à cause de la température élevée, et leurs produits de décomposition se déposent en un film mince. Cette technique a été utilisée pour la première fois pour la fabrication industrielle de diodes électroluminescentes par la société Monsanto, à la fin des années 1960. En 1977, Russell Dupuis, de l'Université du Texas, mit au point un procédé différent de dépôt en phase vapeur utilisant des gaz froids dirigés sur le substrat chaud. Cette technique permet la croissance d'une grande variété de matériaux et a ouvert la porte à la fabrication des diodes de haute qualité. Shuji Nakamura, aujourd'hui à l'Université de Santa Barbara, développe chez Nichia Chemical Industries (Japon) une variante de cette

Toutes les couleurs visibles sont reportées dans ce diagramme de chromaticité. Elles sont représentées par leurs coordonnées chromatiques (*x*, *y*). Les couleurs qui constituent le contour supérieur du lobe sont des couleurs dites pures, car elles correspondent à une longueur d'onde précise (indiquée en nanomètres). Les diodes rouge (R), verte (V) et bleue (B) définissent un triangle, à l'intérieur duquel chaque couleur peut être obtenue en jouant sur l'intensité de chacune des diodes. On obtient ainsi la couleur blanche en ajoutant des photons « verts », « rouges » et « bleus », ou aussi des photons « bleus » et « jaunes » grâce à une diode jaune (J).

technique pour fabriquer, en 1993, un cristal de nitrure de gallium qui émettait de la lumière bleue, la couleur qui manquait à la panoplie des diodes électroluminescentes. En effet, les photons bleus ont une longueur d'onde plus courte, et doivent avoir une énergie supérieure à celle des photons rouges ou orange : ils sont plus difficiles à produire.

Enfin, dans la course au rendement, Michael Krames et ses collègues de la Société *Hewlett-Packard* ont établi un record en 1999 en fabriquant des diodes électroluminescentes rouges qui ont un rendement réel de plus de 55 pour cent. Ils ont enlevé le substrat (une tranche d'arséniure de gallium) originel, l'ont remplacé par une tranche transparente de phos-

phure de gallium, puis ils ont sculpté une diode en forme de pyramide inversée. Cette forme diminue le nombre de réflexions internes et augmente notablement la quantité de lumière qui s'échappe de la puce.

Une autre technologie de diodes électroluminescentes est fondée sur des matériaux organiques. L'électroluminescence des composés organiques a été observée dès les années 1960 sur l'anthracène, puis sur des polymères organiques semi-conducteurs. Depuis les années 1990, les diodes électroluminescentes organiques sont très étudiées, surtout pour la fabrication d'écrans plats flexibles. Ces diodes sont brillantes, bon marché, et disposent d'une large gamme de longueurs d'onde. Cependant, leur

Les diodes électroluminescentes éclairent les profondeurs

Lorsque les biologistes veulent filmer des animaux vivant dans les eaux profondes, tels les cachalots, ils se heurtent à de nombreuses difficultés. Ces mammifères plongent à plusieurs milliers de mètres de profondeur, où il fait nuit noire et où la pression est très élevée. En outre, toute lumière visible modifie le comportement des animaux et de leurs proies, les attire ou, au contraire, les fait fuir. L'éclairage sous-marin classique est inadapté pour les films en profondeur.

En revanche, on peut utiliser des diodes électroluminescentes compactes qui émettent une lumière dont la longueur d'onde est proche de l'infrarouge, visible par une bande vidéo, mais... pas par les animaux. Placées dans un cylindre métallique, les diodes fonctionnent comme des phares invisibles : elles illuminent les animaux présents à deux ou trois mètres de distance, sans modifier leur comportement. Le dispositif contient aussi une caméra automatique et divers équipements, tels des microphones, des capteurs

de profondeur, de température, de direction et de vitesse. Cette «caméra» est assez compacte pour être placée sur le dos d'une baleine, d'un phoque, d'un dauphin, d'un pingouin, d'une otarie, etc. On observe alors les animaux à travers les yeux de leurs congénères. À la fin du tournage, un boîtier se détache automatiquement de la caméra et remonte à la surface.

Cette caméra qui filme dans l'obscurité est le résultat de 14 années d'expérimentation. Lorsque les premières diodes électroluminescentes bleues furent commercialisées, il y a environ quatre ans, elles coûtaient 250 francs pièce, mais elles émettaient une lumière trop visible pour les animaux qui nageaient aux alentours. En revanche, des caméras contenant des diodes électroluminescentes dont la longueur d'onde est proche de l'infrarouge évitent cet écueil, et ont été fixées sur divers animaux marins. Les biologistes ont ainsi découvert des comportements qui n'avaient jamais été observés auparavant, tels des phoques soufflant des bulles ou «chantant» lors de rituels amoureux.



CACHALOTS éclairés par les diodes électroluminescentes d'une caméra sous-marine.



5. LES APPLICATIONS des diodes électroluminescentes se multiplient. Quelques exemples : éclairage de vitrines et d'exposition, par exemple celle des costumes des Beatles, au *Metropolitan*

Museum of Art, à New York (a) ; feux de signalisation routière (b) ; enseignes lumineuses (c) ; tableaux de bord, clignotants et feux arrière d'automobile (d).

durée de vie reste très limitée, en comparaison des diodes électroluminescentes inorganiques.

Le grand espoir blanc

Les physiciens s'attaquent maintenant à la fabrication de diodes électroluminescentes blanches. On trouve déjà des diodes blanches dont l'efficacité est légèrement supérieure à celles des ampoules à incandescence. Certaines sont utilisées pour éclairer les écrans des téléphones cellulaires et les tableaux de bord dans certaines voitures. Leur puissance atteint environ 15 lumens par watt. En revanche, les diodes pour l'éclairage et les illuminations des monuments, par exemple, nécessitent une puissance de 100 lumens par watt. Les bénéfices potentiels d'une lumière blanche produite par des diodes bon marché sont énormes. Le marché mondial de l'éclairage lumineux est en effet estimé à 70 milliards de francs. C'est pourquoi les trois principaux acteurs de l'éclairage – *Philips*, *Osram* *Sylvania* et *General Electric* – investissent autant dans la recherche et dans le développement des diodes électroluminescentes blanches. Au lieu des ampoules de verre fragiles, brûlantes, remplies

de gaz, qui ne durent pas très longtemps et qui gaspillent la plupart de leur énergie sous forme de chaleur, nous pourrions disposer de meilleures sources d'éclairage. Les diodes électroluminescentes d'une automobile, par exemple, dureraient aussi longtemps que la voiture elle-même, et l'énergie de la batterie économisée grâce à ces diodes servirait à l'électronique à bord.

La société tout entière en tirerait profit. L'éclairage représente 20 à 30 pour cent de la consommation d'électricité des pays développés. Les systèmes d'éclairage standard ne convertissent au mieux que 25 pour cent de l'électricité en lumière. Si les diodes électroluminescentes blanches parvenaient à l'efficacité des diodes rouges disponibles aujourd'hui, les besoins en énergie diminueraient, et

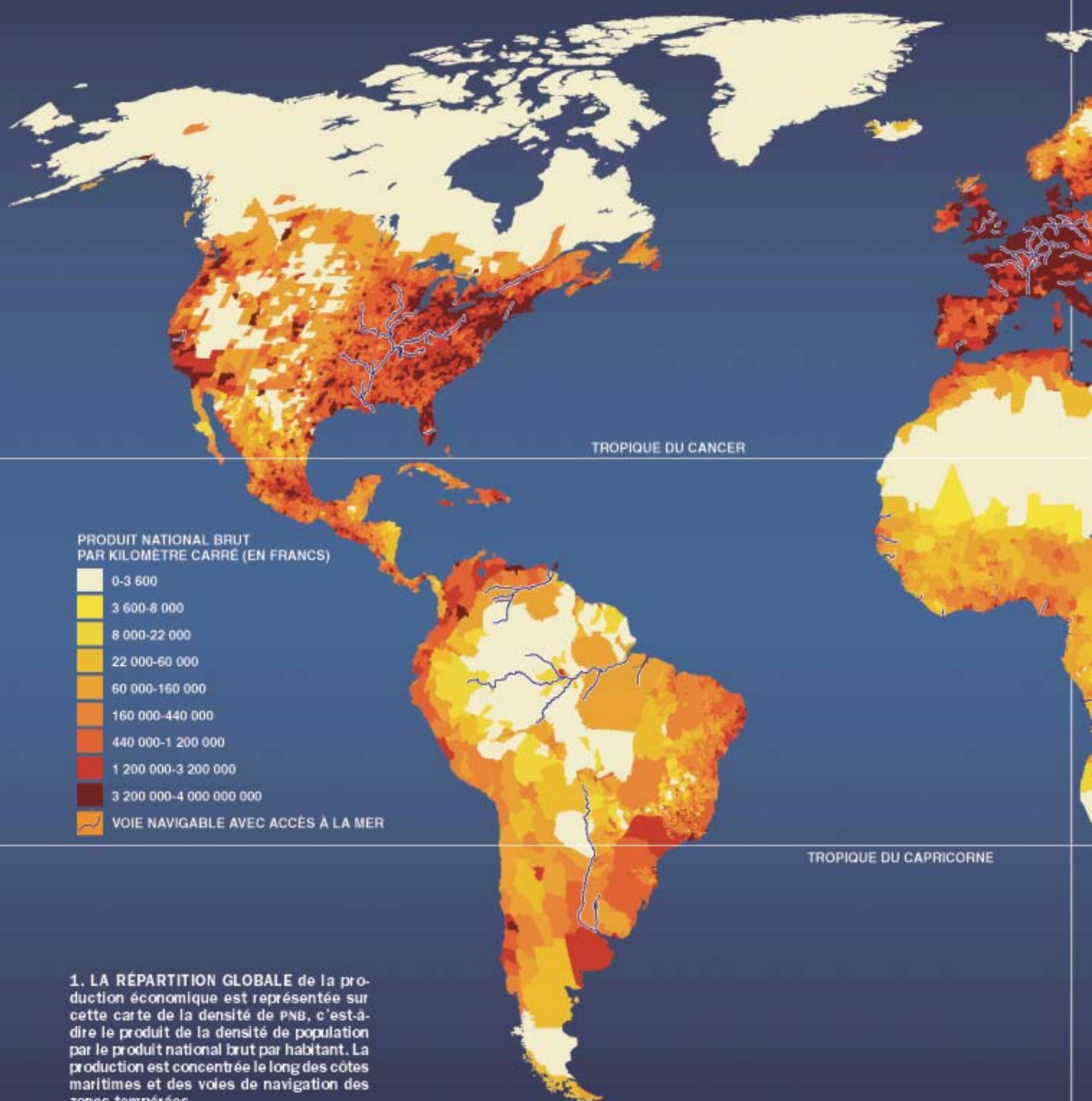
la quantité de dioxyde de carbone émise dans l'atmosphère par les centrales électriques serait réduite de 300 mégatonnes par an. Cette perspective est attractive, mais le remplacement à grande échelle de l'éclairage public ne se fera pas avant une dizaine d'années. Aujourd'hui, les meilleures diodes électroluminescentes blanches coûtent environ trois francs par lumen, 10 à 20 fois plus qu'une ampoule à incandescence. Il faudra réduire les coûts et convaincre les consommateurs d'adopter les diodes électroluminescentes, plus chères à l'achat, mais qui durent plus longtemps. Toutefois, ils se laisseront sans doute convaincre par la solution d'avenir que représentent ces diodes : elles consomment peu d'énergie, de sorte qu'elles participent moins au réchauffement de la planète que les ampoules classiques.

George CRAFTORD, qui mit au point la première diode électroluminescente jaune, travaille à la Société *LumiLeds Lighting*, à San Jose. Nick HOLONYAK est professeur de physique et d'électronique à l'Université de l'Illinois. Frederick KISH dirige le département recherche et développement de la Société *Agilent Technologies*.

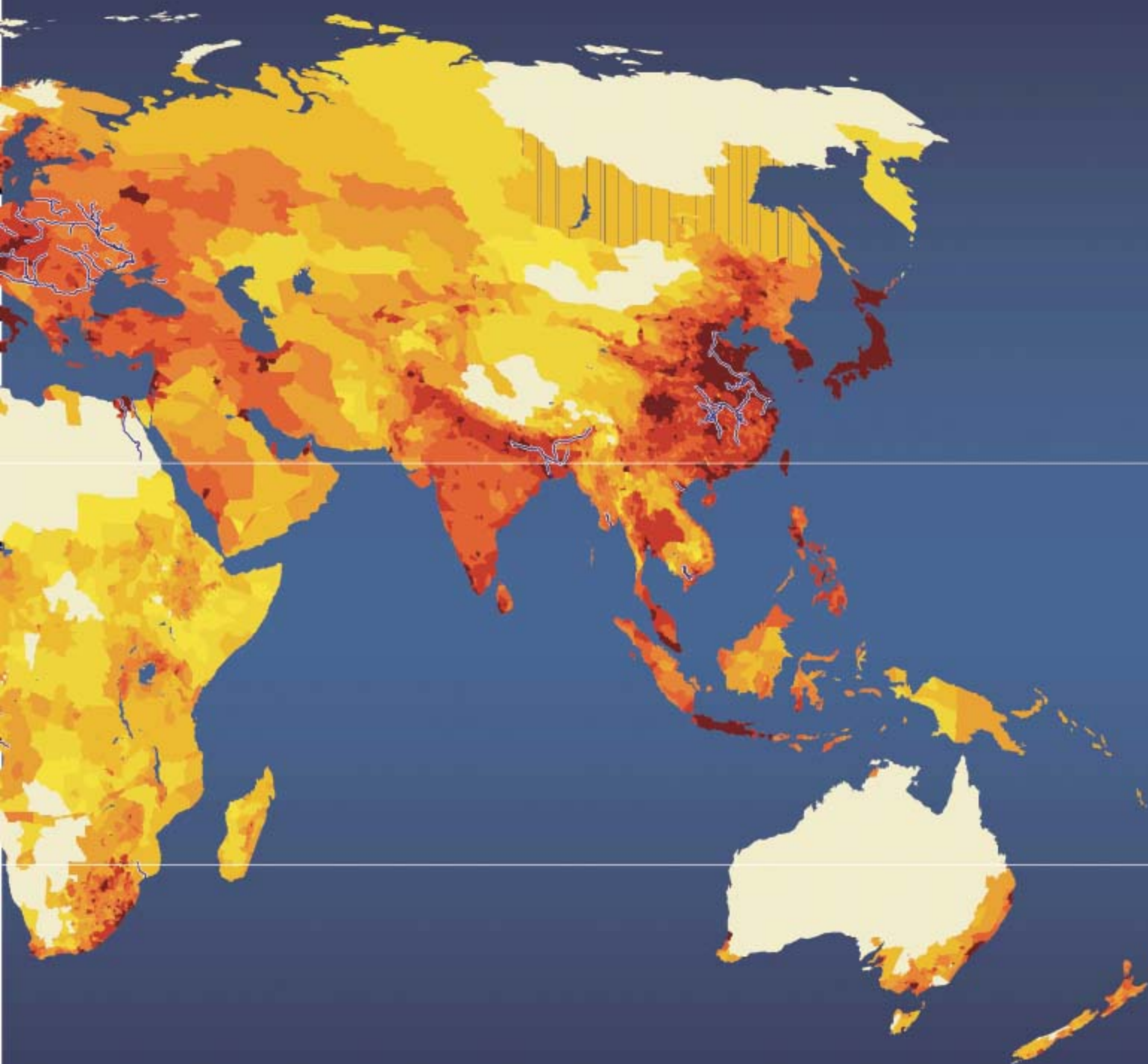
Bob JOHNSTONE, *We Were Burning : Japanese Entrepreneurs and the Forging of the Electronic Age*, Basic Books, 1999. Charles T. WHIPPLE, *Replacing the Light Bulb*, in *Photonics Spectra*, vol. 33, n° 12, pp. 104-109, décembre 1999. Neil SAVAGE, *Leds Light the Future*, in *Technology Review*, vol. 103, n° 5, pp. 38-44, septembre/octobre 2000.

Richesses, pauvreté et contraintes géographiques

JEFFREY SACHS • ANDREW MELLINGER • JOHN GALLUP



Le climat tropical et le manque d'accès au commerce maritime pénalisent les nations les plus pauvres. De nouveaux programmes d'aide devraient les aider à accéder à la richesse.



Pourquoi certains pays sont-ils riches, alors que d'autres sont désespérément pauvres ? À la fin du XVIII^e siècle, l'économiste écossais Adam Smith fut le premier à soutenir qu'une économie de libre concurrence, où l'État autorise les entreprises à faire des profits, est la meilleure garantie de prospérité. Au cours des deux siècles qui ont suivi, l'hypothèse de Smith s'est trouvée confortée par le succès des économies capitalistes de l'Amérique du Nord, de l'Europe de l'Ouest et de l'Asie de l'Est, et par l'échec de l'économie communiste en Europe de l'Est et dans l'ancienne Union soviétique.

Smith avait cependant émis une seconde hypothèse : la géographie physique d'une région influe sur ses performances économiques. Selon lui, les régions côtières ont, en général, des performances économiques supérieures à celles des régions enclavées. Aujourd'hui, la plupart des économistes pensent, comme Smith, que l'économie de libre concurrence participe à la prospérité, mais ils négligent le rôle de la géographie physique : ils admettent implicitement que toutes les régions du monde ont le même potentiel de croissance économique et de développement à long terme, et que la disparité des performances tient seulement à des différences institutionnelles. Nos

découvertes, qui reposent sur des données récentes et sur de nouvelles méthodes de recherche, nous conduisent à penser qu'il en est autrement, et que la géographie joue un rôle important dans la répartition des richesses mondiales et de la croissance économique.

Nos résultats confirment les prévisions de Smith : les régions côtières et celles qui bordent les voies navigables sont bien plus riches et bien plus peuplées que les régions intérieures, mais le climat joue aussi un rôle primordial dans le développement économique. Les habitants des pays situés dans les zones tropicales sont généralement exposés à davantage de maladies infectieuses que les habitants des zones tempérées ; de surcroît, la productivité agricole y est moindre (notamment en ce qui concerne les denrées alimentaires), tout comme dans les zones désertiques. Les régions les plus pauvres du monde sont celles qui cumulent les deux handicaps : elles n'ont pas accès au commerce maritime et sont localisées en zone tropicale ou désertique.

Certes, tout cela est bien connu, mais notre étude nous a permis de préciser l'impact des conditions géographiques, de la politique économique et de divers facteurs, que nous expliciterons, sur les performances d'une nation. Aux outils de recherche utilisés par les géographes – notamment de nouveaux logiciels qui

fournissent des cartes détaillées de la densité d'une population – nous avons associé les techniques et les équations employées en macroéconomie. Par ailleurs, nous ne nous laissons pas de répéter les enseignements que prodigue la géographie et sur lesquels on doit insister, puisque la plupart des économistes les ignorent. Au cours des dix dernières années, la quasi-totalité des articles publiés sur le développement économique ont négligé les réalités géographiques, même les plus évidentes. Enfin, si les résultats de nos recherches sont corrects, leurs conséquences en matière de politique seront notables. Les programmes d'aide aux pays en développement devront être redéfinis, car les contraintes imposées par les conditions géographiques devront être prises en compte. En particulier, nous avons tenté de définir de nouvelles stratégies susceptibles d'aider les pays des zones tropicales à améliorer leur productivité agricole et à faire reculer les maladies telles que le paludisme.

La disparité géographique

Le meilleur indicateur de la prospérité d'un pays est son produit national brut (PNB) par habitant, c'est-à-dire la valeur de sa production économique globale divisée par le nombre de ses habitants. Une carte du PNB par habitant et par nation montre immédiatement les inéga-



© J. J. J. J.

2. LES DISPARITÉS ÉCONOMIQUES tiennent pour une grande part aux facteurs géographiques. Dans les pays de la zone tempérée, en bord de mer (ci-dessus, le port de Lorient), le coût de

transport de marchandises est plus faible et la productivité agricole plus élevée que dans des pays enclavés de la zone tropicale, comme l'Ouganda (page ci-contre).



lités de la répartition entre les pays riches et les pays pauvres (voir la figure 1). La majorité des pays les plus pauvres sont localisés dans la zone située entre le tropique du Cancer et le tropique du Capricorne. Au contraire, la plupart des pays les plus riches sont localisés dans les zones tempérées.

On peut préciser cette disparité géographique en définissant les régions tropicales par leur climat, et non par leur latitude. Grâce à une méthode de classification mise au point par les climatologues allemands Vladimir Köppen et Rudolph Geiger, on peut ainsi définir cinq vastes zones climatiques (voir la figure 4) : la zone tropicale et subtropicale (dite, par la suite, zone tropicale), la zone des déserts et des steppes (dite désertique), la zone tempérée et où, parfois, tombe la neige (dite tempérée), la zone des montagnes et la zone polaire. Elles sont définies par les températures qui y règnent et par l'abondance des précipitations. Nous avons exclu de notre analyse la zone polaire, puisqu'elle n'est pratiquement pas habitée.

Parmi les 28 pôles économiques considérés à haut revenu par la Banque mondiale (et dont la population dépasse un million de personnes), seuls Hong-Kong, Singapour et une partie de Taiwan sont dans la zone tropicale, et à eux trois ils représentent à peine deux pour cent de l'ensemble de la population des pays riches. Presque tous les pays de la zone tempérée ont des économies riches (c'est le cas de l'Amérique du Nord, de l'Europe de l'Ouest, de la Corée et du Japon) ou moyennement riches, quand ils ont subi, dans le passé, le poids de poli-

tiques communistes (c'est la cas de l'Europe de l'Est, de l'ancienne Union soviétique et de la Chine). En outre, dans les pays où coexistent les deux types de climat, on observe une très forte disparité entre les régions tempérées et tropicales. La plus grande partie du Brésil, par exemple, est située en zone tropicale, mais ses régions les plus méridionales – qui sont en zone tempérée – sont les plus riches.

La carte mondiale du PNB illustre l'importance d'un accès au commerce maritime. Les régions enclavées d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Asie, qui sont loin de la mer, sont beaucoup plus pauvres que les régions ayant une ouverture sur la mer. Les différences entre les régions côtières et intérieures sont encore plus évidentes sur une carte mondiale représentant la densité de PNB, c'est-à-dire la production économique par kilomètre carré (voir la figure 1). Cette carte a été établie d'après un recensement détaillé des densités de population effectué en 1994. Le logiciel d'un système d'information géographique a été utilisé pour diviser la surface de la Terre en territoires de cinq minutes d'angle sur cinq minutes (ce qui, à l'équateur, correspond à 100 kilomètres carrés). La densité de PNB de chaque zone est le produit de sa densité de population par le PNB par habitant. Quand on ne dispose d'aucune évaluation régionale du PNB par habitant, on utilise des moyennes nationales.

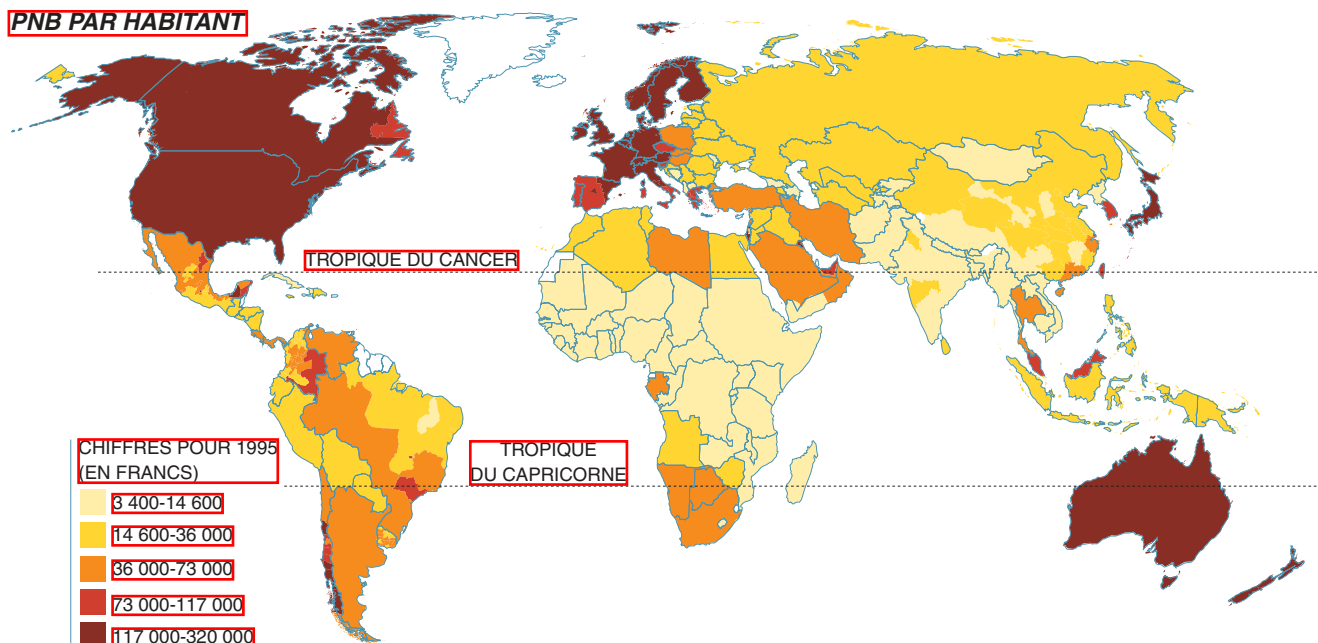
Pour exploiter ces données, nous avons réparti les régions du monde en larges catégories définies par leur climat et par leur proximité à la mer. Nous considérons qu'une région est proche

de la mer quand elle est située à moins de 100 kilomètres d'une côte ou d'une voie navigable (un fleuve, un lac ou un canal que peuvent emprunter les navires de haute mer). Les régions situées dans l'une des quatre zones climatiques étudiées peuvent être classées comme «proches» ou «éloignées», ce qui définit huit catégories. En analysant ces données, nous avons constaté que la production globale est très largement concentrée dans les régions côtières des zones de climat tempéré. Les régions de la catégorie «zone tempérée + proximité d'une côte» ne représentent que 8,4 pour cent des territoires habités, mais regroupent 22,8 pour cent de la population mondiale et produisent 52,9 pour cent du PNB mondial. Dans ces régions, le revenu par habitant est 2,3 fois supérieur à celui de la moyenne générale, et la densité de population y est 2,7 fois plus élevée. Inversement, la catégorie «zone tropicale + éloignement d'une voie navigable» correspond aux régions les plus pauvres : le PNB par habitant n'y est que le tiers de la moyenne mondiale.

L'interprétation des modèles

Dans nos recherches, nous avons évalué l'influence sur le développement économique des facteurs géographiques. Tout d'abord, comme l'avait remarqué Adam Smith, l'accès aisé à une voie de transport des marchandises est un facteur primordial. Comme le commerce par voie maritime est moins coûteux que par voie terrestre ou par voie aérienne, la proximité des côtes confère, sur le plan économique, un

PNB PAR HABITANT



grand avantage. Le prix au kilomètre du transport des marchandises par voie terrestre, en Afrique par exemple, est souvent multiplié par 10 par rapport à celui du commerce maritime vers un port africain. Ainsi, le coût d'expédition par mer d'un conteneur de six mètres de longueur de Rotterdam, aux Pays-Bas, à Dar-es-Salaam, en Tanzanie (soit, à vol d'oiseau, 7 300 kilomètres), est de l'ordre, d'après nos

dernières estimations, de 10 000 francs, alors que le transport terrestre du même conteneur de Dar-es-Salaam à Kigali, au Rwanda (environ 1 300 kilomètres), coûte environ 18 000 francs, soit presque deux fois plus.

De surcroît, les facteurs géographiques influent sur la proportion de la population touchée par diverses maladies. De nombreuses maladies infectieuses sont endémiques dans les

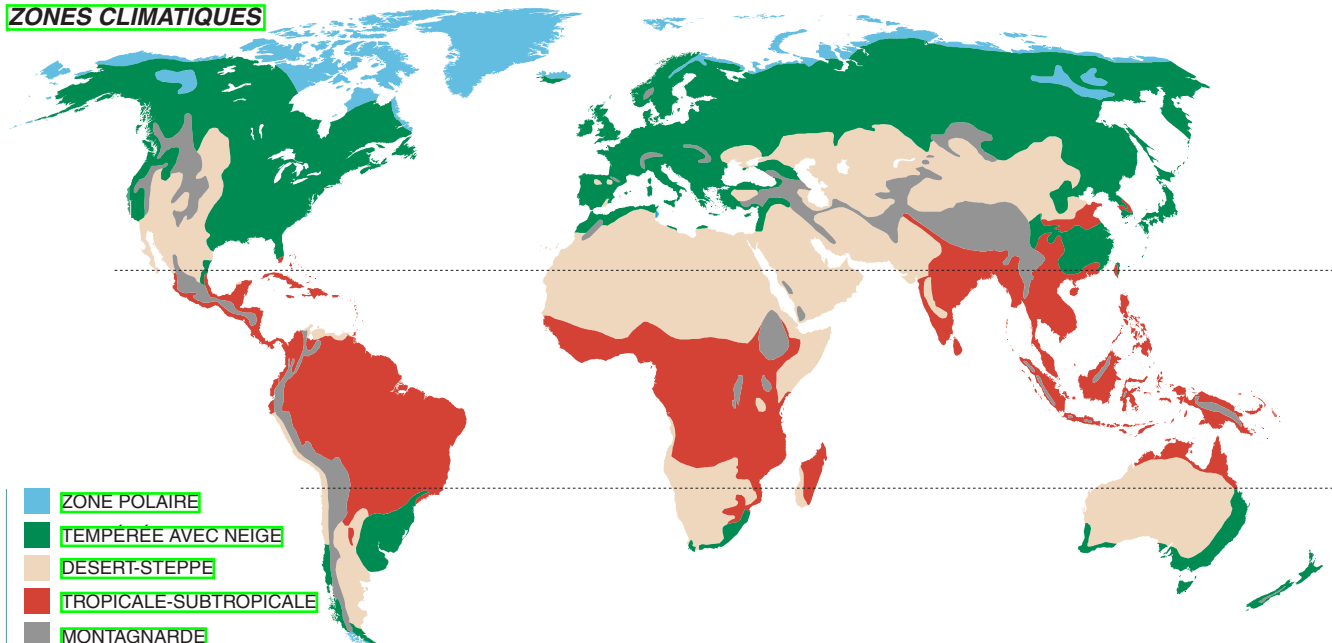
zones tropicales et subtropicales. Ce constat est particulièrement vrai pour les maladies où l'agent pathogène passe une partie de son cycle de vie hors de l'organisme : c'est le cas du paludisme (dont les vecteurs sont les moustiques) et des parasitoses dues à des vers, nommés helminthes. Bien que des épidémies de paludisme aient eu lieu, au XIX^e siècle, à des latitudes aussi septentrionales que Marseille ou Boston, jamais la maladie n'a pris pied durablement dans les zones tempérées, car le froid hivernal freine la transmission de la maladie par les moustiques (l'hiver est la mesure de santé publique la plus efficace !). Il est bien plus difficile de maîtriser le paludisme dans les régions tropicales, où la maladie se transmet toute l'année.

Selon l'Organisation mondiale de la santé, 300 à 500 millions de nouveaux cas de paludisme se déclarent chaque année, presque exclusivement dans les régions tropicales où la maladie est si fréquente que personne ne sait exactement combien de personnes elle tue chaque année – au moins un million, peut-être deux, voire même davantage. Une maladie aussi répandue, qui tue des personnes jeunes, fait payer un lourd tribut aux hommes et à l'économie, car elle réduit notablement la productivité. Ces maladies endémiques ont également des conséquences sociales à long terme, par exemple une modification de la pyramide des âges. Dans les sociétés où le taux de mortalité infantile est élevé, les femmes ont beaucoup d'en-

ZONE CLIMATIQUE	(EN POUR CENT DU TOTAL MONDIAL)	DISTANCE À UNE VOIE MARITIME	
		INFÉRIEURE À 100 KM	SUPÉRIEURE À 100 KM
TEMPÉRÉE			
PNB	67,2	52,9	14,3
POPULATION	34,9	22,8	12,1
SURFACE TERRESTRE	39,2	8,4	14,3
TROPICALE			
PNB	17,4	10,5	6,9
POPULATION	40,3	21,8	18,5
SURFACE TERRESTRE	19,9	5,5	14,4
MONTAGNARDE			
PNB	5,3	0,9	4,4
POPULATION	6,8	0,9	5,9
SURFACE TERRESTRE	7,3	0,4	6,9
DÉSERTIQUE			
PNB	10,1	3,2	6,8
POPULATION	18,0	4,4	13,6
SURFACE TERRESTRE	29,6	3,0	26,6

3. LA REPARTITION DU PNB ET DE LA POPULATION en fonction du climat et de la proximité de voies maritimes montre que les richesses sont concentrées dans les régions au climat tempéré proches des voies maritimes, tandis qu'à l'inverse, les régions au climat tropical éloignées des voies maritimes restent très pauvres.

ZONES CLIMATIQUES



fants, de sorte que quelques-uns (au moins) parviennent à l'âge adulte. Dans ces pays, les jeunes enfants représentent une proportion notable de la population, mais les familles pauvres n'ont pas les moyens d'envoyer leurs enfants à l'école. Si l'éducation passe au second plan, c'est aussi le cas du rôle des femmes dans la société : elles consacrent presque tout leur temps à élever leurs enfants.

Enfin, les facteurs géographiques influent aussi sur la productivité agricole. Parmi les principales céréales, le blé ne pousse que dans les climats tempérés, mais le maïs et le riz poussent sous tous les climats, même si leurs récoltes sont en général plus abondantes sous des climats tempérés et subtropicaux que dans les zones tropicales. En moyenne, un hectare, sous les tropiques, fournit 2,3 tonnes de maïs, contre 6,4 tonnes en zone tempérée. Dans un environnement tropical, l'agriculture est entravée par la fragilité du sol : certes les températures élevées accélèrent la minéralisation des matières organiques, mais ces dernières sont entraînées par les précipitations abondantes qui lessivent les sols. Dans un environnement tropical où alternent saisons sèches et saisons humides, par exemple dans la savane africaine, les fermiers sont confrontés aux températures élevées qui assèchent les sols, aux précipitations irrégulières et au risque permanent de sécheresse. De surcroît, insectes nuisibles et parasites dévastent les récoltes et déciment les troupeaux.

4. RICHESSE ET CLIMAT sont intimement liés. La comparaison de la carte mondiale du PNB par habitant (page ci-contre) et des zones climatiques (ci-dessus) montre que les pays des zones tempérées sont en général plus prospères que ceux des zones tropicales. De plus, à l'intérieur de chaque zone climatique, les régions situées près des côtes et des voies navigables sont plus riches que celles de l'arrière-pays (tableau ci-contre).

Des remèdes contre les inégalités

La plupart des tentatives qui visaient à l'amélioration de la production des denrées alimentaires dans les régions tropicales, d'abord par les puissances coloniales, puis, plus récemment, par les organismes de développement internationaux, se sont soldées par un échec. En général, les experts agricoles ont voulu transposer sous les tropiques des pratiques agricoles des zones tempérées, avec pour seul résultat de voir les troupeaux et les récoltes anéantis par les parasites, les maladies, ou la sécheresse. Qui plus est, la production agricole dépend aussi des conditions géologiques et topographiques, variables selon le lieu. Sur l'île de Java, par exemple, on peut pratiquer une agriculture intensive, car le sol volcanique est plus riche que le sol non volcanique des îles voisines de l'Indonésie.

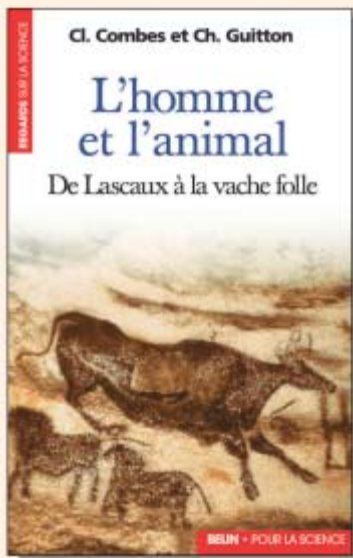
De petites différences des facteurs géographiques ont parfois des conséquences économiques à long terme notables. Ainsi, dans des pays de la zone tempérée, des conditions agricoles et sanitaires favorables participent à l'augmentation des revenus par habitant et au développement de l'économie. La croissance stimule la production de produits destinés à l'exportation vers les pays riches, de

sorte que l'activité économique ne cesse de croître. L'innovation renforce l'avantage conféré par des conditions géographiques plutôt favorables.

Au contraire, la faible production agricole des régions tropicales tend à limiter la taille des villes, approvisionnées par l'arrière-pays agricole. Quand l'urbanisation est restreinte, les innovations techniques sont plus lentes et, en général, la croissance économique est faible. C'est pourquoi les zones tropicales restent plus rurales que les zones tempérées, leur activité économique reposant sur l'agriculture plus que sur l'industrie ou sur les services.

Toutefois, les facteurs économiques ne représentent qu'un aspect de la question. Les institutions économiques et sociales sont importantes pour l'économie d'un pays. Comparons les performances des économies de marché et des économies communistes, après la Seconde Guerre mondiale, dans des pays qui ont les mêmes facteurs géographiques : que ce soit en Corée du Nord et en Corée du Sud, en Allemagne, anciennement de l'Ouest et de l'Est, en République tchèque et en Autriche, ou encore en Estonie et en Finlande, l'économie de marché a été favorable aux performances économiques.

Notre étude a révélé que les responsables politiques devraient davantage prendre en compte les contraintes



L'homme et l'animal

**Claude Combes,
Christophe Guittion**

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

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

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

Eurêka

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

Midi Libre

**Code 075012 • 95 F
160 pages**

**Voir bon de commande
page 98**

BELIN • POUR LA SCIENCE

géographiques, telles qu'une situation sanitaire médiocre, une faible productivité agricole ou des coûts de transport élevés. Les économies tropicales devraient s'efforcer de diversifier leur production vers des secteurs industriels et de services indifférents aux conditions climatiques. Les pays prospères du Sud-Est tropical de l'Asie, notamment la Malaisie, ont réalisé d'étonnants progrès au cours des 30 dernières années, d'une part, en s'attaquant aux problèmes de santé publique et, d'autre part, en déplaçant leur économie d'une production liée aux conditions climatiques (caoutchouc, huile de palme, etc.) vers divers secteurs industriels, tels l'électronique ou les semi-conducteurs. Cette réussite a été favorisée par la densité élevée de leurs populations dans les régions côtières, situées près de grandes voies maritimes internationales, et par une situation sanitaire assez facile à maîtriser, tant en ce qui concerne le paludisme que d'autres maladies tropicales. L'Afrique subsaharienne n'a pas cette chance : la plus grande partie de sa population est située loin des côtes, et les contraintes écologiques pèsent sur la santé humaine et sur la production agricole.

Une aide indispensable des pays riches

La Banque mondiale et le Fonds monétaire international, les deux organismes internationaux qui donnent les grandes orientations des actions à mener dans les pays en développement, insistent sur la nécessité de faire des réformes institutionnelles, par exemple rénover certains services publics ou l'administration fiscale, plus que sur la lutte contre les maladies tropicales et ou sur l'obligation d'améliorer la production agricole. En matière de santé publique, une des difficultés tient à ce que les laboratoires pharmaceutiques n'ont aucune incitation financière pour rechercher des vaccins contre les maladies tropicales. Les pays indus-

trialisés devraient stimuler d'une façon ou d'une autre la recherche de vaccins contre les maladies tropicales destinées aux pays en développement. Nous avons lancé un appel aux gouvernements des pays riches pour qu'ils stimulent la recherche et le développement de tels vaccins, et pour qu'ils s'engagent à acheter aux entreprises pharmaceutiques des vaccins contre le paludisme, le SIDA et la tuberculose, qu'ils paieraient à un prix raisonnable. De même, les entreprises de biotechnologie et de recherche agricole doivent être incitées à étudier comment la production agricole dans les régions tropicales peut être améliorée.

Les pays les plus pauvres manquent certainement des ressources qui leur permettraient de vaincre seuls leur handicap géographique. Les pays de l'Afrique subsaharienne ont un revenu par habitant de l'ordre de un dollar par jour (environ sept francs). Même lorsque ces pays investissent dans la santé publique trois à quatre pour cent de leur PNB, ce qui, pour un pays très pauvre, représente une fraction notable des ressources, le retour sur investissement ne dépasse par 110 francs environ par an et par personne. Ce n'est certainement pas assez pour lutter contre le paludisme, et encore moins pour vaincre le SIDA, la tuberculose et les infections parasitaires.

Pour que les pays en développement surmontent les difficultés liées aux conditions géographiques, leurs politiques économiques devront être améliorées, mais les pays riches auront à consentir un apport financier notablement supérieur. D'après une estimation préliminaire, même un modeste apport supplémentaire de fonds de l'ordre de 180 milliards de francs par an – soit seulement 0,1 pour cent du PNB global des pays riches ou encore quelque 200 francs par habitant – représenterait, pour les pays les plus pauvres du monde, une aide précieuse dans leur lutte contre les maladies et pour l'accroissement de la production des ressources alimentaires.

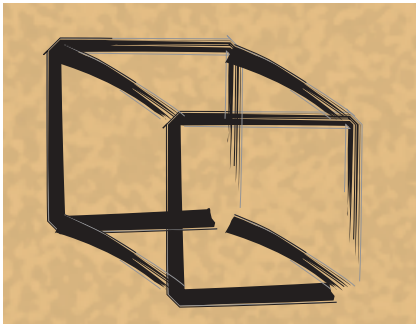
Jeffrey SACHS et Andrew MELLINGER travaillent au Centre pour le Développement International (CID) à l'Université Harvard. John GALLUP est le fondateur de la Société *DevelopIT.org*.

Adam SMITH, *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*.

Modern Library, 1994.

Jared DIAMOND, *Guns, Germs and Steel : The Fates of Human Societies*, éditeur W. Norton, 1997.

David LANDES, *The Wealth and Poverty of Nations : Why Some Are So Rich and Some Are So Poor*, éditeur W. Norton, 1998.



Le combat des hémisphères

YVES FREGNAC

Des illusions de la perception visuelle résultent souvent de la compétition entre les deux hémisphères cérébraux, chacun d'eux interprétant une scène ambiguë d'une façon différente.

Devant *Le marché aux esclaves* où disparaît le buste de Voltaire, le visiteur du Musée Dali de Saint Petersburg, en Floride, ne sait pas quelle interprétation choisir : alternativement, les religieuses ou les traits du pamphlétaire antireligieux prennent le contrôle de ses illusions. Le titre de l'œuvre de Salvador Dali, peinte en 1940, est sans ambiguïté : il donne tout de suite la solution à ce qui pourrait être une énigme visuelle.

Ce tableau est exemplaire : il atteste l'incroyable capacité du cerveau humain à associer de plusieurs façons les éléments d'une scène en des interprétations cohérentes. Bien sûr, pour émerger, les différentes perceptions requièrent, au sein de notre cerveau, une préexistence des représentations, voire une connaissance culturelle de Voltaire et des luttes anticléricales. Par ailleurs, les multiples interprétations de l'œuvre de Dali évoquent les figures réversibles qui sont des curiosités depuis des siècles : le cube de Necker (voir la figure à côté du titre), qui semble pivoter périodiquement autour d'un axe, le vase dessiné par deux visages qui se font face et le canard-lapin (voir la figure), qui intriguait tant Marcel Duchamp.

Le point de vue analytique le plus classique des œuvres des peintres surréalistes découle des théories du gestaltisme (la psychologie de la forme), introduites dans les années 1930. Notre système visuel est une machine qui établit des liens entre les éléments perçus à partir de règles quasi syntaxiques, telles la proximité spatiale, la continuité... L'interprétation de l'instabilité des perceptions devant le tableau de Dali nécessite de définir l'idée de segmentation : de la connaissance du « tout », soit le buste de Voltaire, soit le marché aux esclaves, nous cherchons à identifier les « parties » que le cerveau a, de façon quasi automatique, liées. Un changement d'échelle spatiale nous renseigne sur la nature des éléments recrutés pour chacune des perceptions. Rapprochons-nous du tableau, et le buste disparaît laissant place à deux religieuses. Éloignons-nous du tableau, et nous perdons la foi. L'interprétation qui prédomine est alors tridimensionnelle : le contraste des

coiffes devient un indice de profondeur incompatible avec la reconnaissance du visage des nonnes, ainsi gommées.

Le deuxième point de vue requiert l'exploration neurobiologique et psychophysique des mécanismes cérébraux de l'ambiguïté perceptive. En 1838, Charles Wheatstone a, le premier, décrit un phénomène nommé rivalité binoculaire. Lorsqu'on présente dans un stéréoscope (un appareil qui expose une image différente à chaque œil) deux motifs incompatibles, par exemple, des lignes verticales pour l'œil gauche et horizontales pour le droit, la plupart des observateurs ne perçoivent pas la combinaison des deux : ils voient alternativement le motif vertical et le motif horizontal, chacun pendant quelques secondes. Régulièrement, le cerveau passe d'une représentation à l'autre, cependant, on ignore où est l'interrupteur.

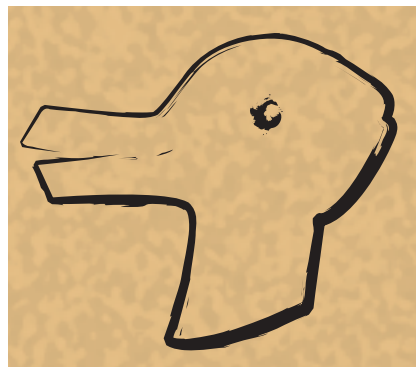
Les neurobiologistes ont longtemps pensé que des neurones reliés à chaque œil et dédiés à la détection de chacune des images monoculaires se disputaient le contrôle de la perception consciente. À la fin des années 1990, les études électrophysiologiques menées chez le singe par l'équipe de Nikos Logothetis ont montré que les représentations

neuronales des figures réversibles ne sont pas élaborées à un stade précoce du traitement des formes, mais plutôt dans des aires corticales supérieures nécessaires à une représentation unifiée. Dans le cas de la rivalité binoculaire, la guerre perceptive est cérébrale et intervient donc entre des représentations « mentales », indépendamment des conditions dans lesquelles la compétition a été introduite.

Les expériences récentes de Jack Pettigrew, neurobiologiste à l'Université de Brisbane, en Australie, vont un pas plus loin et mettent en évidence une rivalité entre les deux hémisphères du cerveau humain, avant même qu'une perception prédomine dans la conscience. Selon cette théorie, ce n'est plus un, mais bien deux esprits qui se prononcent sur ce qui est vu. Cette découverte s'accorde avec le point de vue de N. Logothetis selon lequel le cerveau construit des représentations conflictuelles d'une scène qui sont en compétition pour une prise de conscience visuelle. L'hypothèse de J. Pettigrew devient plus exigeante : ce ne sont plus seulement quelques groupes de neurones qui s'opposent dans la rivalité binoculaire, mais bien les hémisphères droit et gauche du cortex cérébral.

Pour tester cette hypothèse, les neurobiologistes ont effectué d'étranges expériences. Pendant que des sujets observaient des cubes de Necker ou les deux motifs de lignes dans un stéréoscope, puis répondaient à des questions en appuyant sur des boutons, les neurobiologistes les tourmentaient ! Ils versaient de l'eau glacée dans l'oreille de certains, appliquaient un champ magnétique en un point précis d'un des deux hémisphères cérébraux d'autres, et enfin, racontaient des histoires drôles aux plus chanceux. Il s'agissait de perturber, de façon sensorielle, émotionnelle ou directe, l'un des deux hémisphères, puis d'étudier l'impact de cette perturbation sur la perception et la représentation des images.

De l'eau glacée versée sur le tympan active le système vestibulaire de l'oreille interne : la stimulation cause des



Le canard-lapin est une figure réversible qui offre deux interprétations. La première est stockée dans l'hémisphère droit, et la seconde, dans l'hémisphère gauche. Grâce à un « interrupteur » entre les deux hémisphères, elles sont alternativement perçues consciemment. Deux esprits cohabitent en un.

troubles de l'équilibre et déclenche des mouvements réflexes des yeux. Une fois les vertiges passés, l'hémisphère opposé à l'oreille «refroidie» est en sursurveillance et ne remplit plus son rôle. À l'inverse, la stimulation du lobe pariétal d'un des hémisphères cérébraux par un champ magnétique de un tesla interrompt temporairement la plupart des activités neuronales de ce même hémisphère.

Et les histoires drôles ? On ne connaît pas exactement les effets d'un bon fou rire sur le cerveau bien que l'on ait repéré en imagerie cérébrale des régions spécifiquement activées. Cependant, de longs accès d'hilarité entraînent souvent des faiblesses, des manques de coordination, des difficultés à respirer, et une sudation. Par ailleurs, les individus atteints de cataplexie (un trouble du sommeil) souffrent parfois d'une paralysie partielle ou totale pendant plusieurs minutes après un éclat de rire. Selon le neurobiologiste australien, des anomalies des connexions entre les deux hémisphères expliqueraient ces symptômes.

Les résultats sont étonnants : la plupart des sujets testés qui ont reçu de l'eau froide dans l'oreille perçoivent

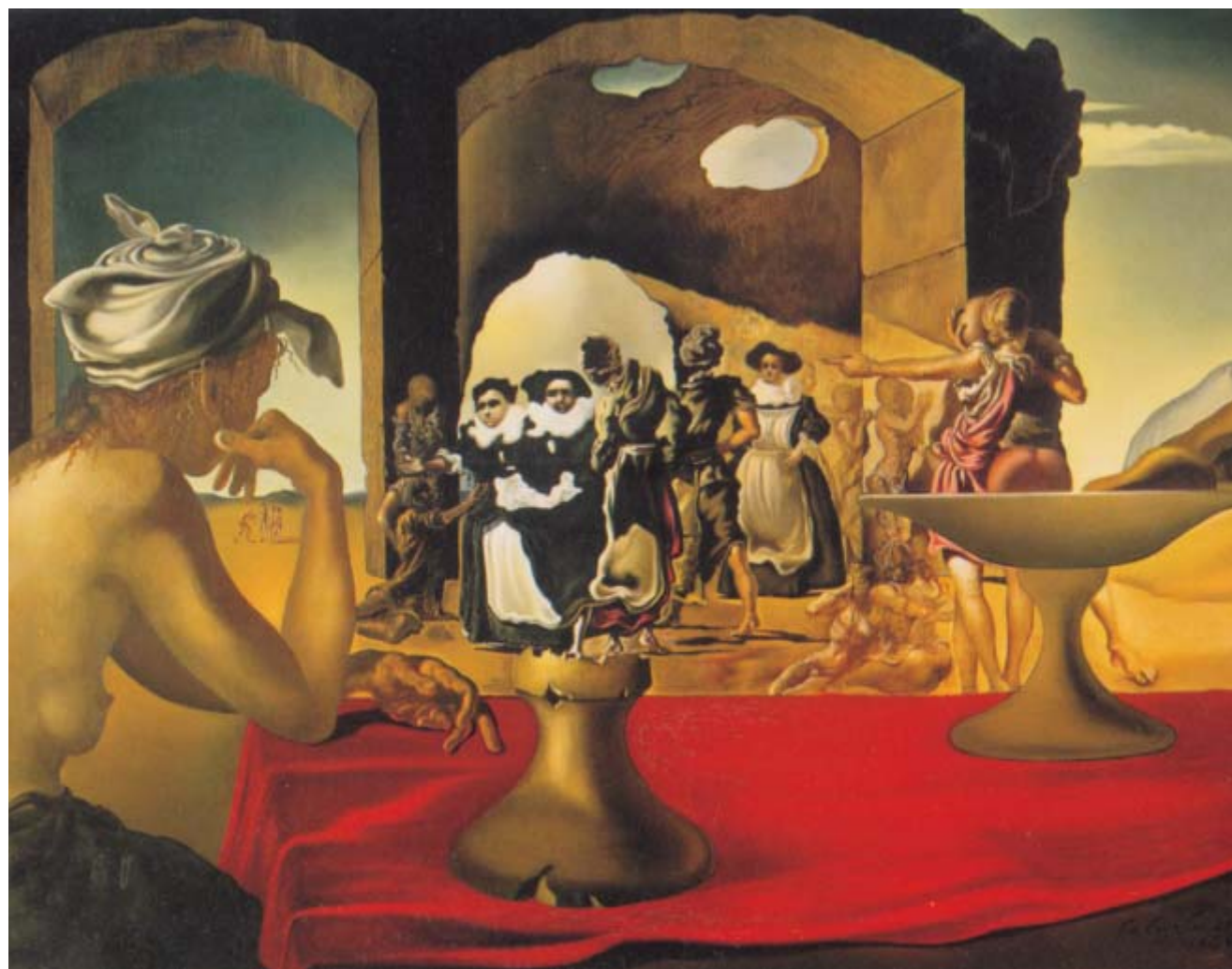
plus longtemps l'un des deux motifs du stéréoscope, alors que les sujets témoins qui ont reçu de l'eau tiède alternent de façon équilibrée entre les deux perceptions. Les impulsions magnétiques émises sur l'hémisphère gauche ont interrompu l'alternance des deux représentations du cube chez cinq des sept personnes testées. Et parmi tous les 20 volontaires testés, le fou rire a supprimé, ou atténué, la rivalité binoculaire pendant presque une demi-heure : ils voient dans le stéréoscope une grille de lignes horizontales et verticales.

De ces résultats découle une interprétation nouvelle de nos perceptions illusoires devant des tableaux de peintres surréalistes. Face à la scène ambiguë du tableau de Dali, l'hémisphère gauche construit une représentation, par exemple le marché aux esclaves, tandis que le cerveau droit en élabore une autre, le buste de Voltaire. Un interrupteur entre les deux hémisphères alterne la conscience de l'une ou de l'autre. Le rire court-circuite l'interrupteur ou bien l'accélère, on l'ignore encore, si bien que, sous son emprise, nous voyons les deux repré-

sentations simultanément : il crée un nouvel état d'esprit hybride.

Cette superposition d'états n'est pas sans rappeler la schizophrénie, une psychose caractérisée par une ambivalence des pensées et une conduite paradoxale, une sorte de dédoublement de la personnalité. Keith White, de l'Université de Floride, a découvert que de nombreux schizophrènes avaient une rivalité binoculaire déficiente. Des résultats de J. Pettigrew naîtra peut-être un test diagnostique original recommandant la visite du Musée Dali de Saint Petersburg. Les gardiens du musée seront tous diplômés en neuropsychologie clinique. Ils auront pour tâche d'observer la réaction des visiteurs devant les tableaux de Dali, alors que leurs collègues raconteront des histoires drôles. À chaque instant, des nonnes s'enfuiront à l'entrée de Voltaire. Cette nouvelle forme de dépistage de la schizophrénie n'aurait certainement pas déplu au Maître espagnol.

Yves FRÉGNAC est directeur de l'unité de neurosciences intégratives et computationnelles, à Gif-sur-Yvette



MUSEE SALVADOR DALI, SAINT PETERSBURG. L'ŒUVRE DE DALI, ESPAGNE. L'ŒUVRE DE DALI, ESPAGNE. L'ŒUVRE DE DALI, ESPAGNE. L'ŒUVRE DE DALI, ESPAGNE.



Jusqu'où l'ordinateur calculera-t-il?

JEAN-PAUL DELAHAYE

Votre ordinateur de bureau finira-t-il par avoir la puissance de calcul du cerveau humain?

Si tu t'imagines, fillette, fillette, Si tu t'imagines que ça va durer, Ce que tu te goures, ce que tu te goures...

En 1949 déjà, quand Juliette Gréco chantait la chanson *Si tu t'imagines* dans les caves de Saint-Germain-des-Près, on peut penser que le célèbre Dr. Schutz célébré par Boris Vian comparait des machines qui n'avaient même pas la puissance de calcul de nos

téléphones portables à des cerveaux électroniques! Pourtant, après cinquante ans de progrès, nos ordinateurs n'égalent toujours pas nos cerveaux sur de nombreux points.

Lorsque tout va très vite, on perd ses marques, et, en matière de performances informatiques, il y a si longtemps qu'on nous prétend que la nouvelle machine est incomparablement supérieure aux précédentes qu'on finit par ne plus rien y comprendre.

Dans le vertige du progrès rapide et continu, on pourrait croire que tout est possible... y compris ce qui ne l'est pas : certains calculs sont à la limite de ce qui est envisageable, certains autres devront attendre quelques années, d'autres enfin sont hors de portée pour des décennies, voire pour des siècles ou à tout jamais. Tentons de fixer des repères.

LES LOIS DE MOORE

En avril 1965, dans un article publié dans la revue *Electronics Magazine*, Gordon Moore (qui dirige alors la recherche chez *Fairchild Semiconductors* et qui cofondera avec Robert Noyce la firme *Intel* en 1968) remarque que, depuis l'invention du circuit intégré (en 1958), on observe un doublement annuel du nombre de transistors par unité de surface. Il prédit que ce doublement durera encore dix ans.

Sa prévision se réalisera assez bien ; pourtant, en 1975, dans un exposé où on lui demande de proposer un nouveau pronostic, G. Moore, analysant les difficultés technologiques présentes, annonce cette fois un doublement du nombre de transistors par unité de surface tous les deux ans (au lieu de tous les ans).

En prenant en compte l'augmentation de la fréquence d'horloge des microprocesseurs (la vitesse avec laquelle on les fait calculer), ou en faisant la moyenne entre les prédictions de 1965 et celles de 1975, certains des collègues électroniciens de Moore ont reformulé les prédictions et ont parié sur un doublement de performance tous les 18 mois. C'est ce qu'abusivement aujourd'hui nous dénommons la *Loi de Moore* et que nous dénommerons ici la loi de Moore *standard* : «les performances informatiques doublent tous les 18 mois».

Il existe dans la littérature d'autres versions de ce qu'est la loi de Moore, mais la réalité (que G. Moore lui-même atteste quand on l'interroge) correspond

1. CAPACITÉS DE CALCUL DEPUIS LE DÉBUT DU SIÈCLE

La loi de Moore n'a de sens que pour la période, commençant en 1958 et se terminant sans doute prochainement, des circuits imprimés obtenus par lithographie optique. Pour savoir s'il existe une loi plus générale incluant plusieurs technologies de calcul différentes, Ray Kurzweil dans son livre *The Age of Spiritual Machines* (Penguin Books, New York, 1999) a évalué la puissance de calcul des machines en instructions par seconde pour un dollar sur toute la durée du XX^e siècle. Durant cette période, cinq technologies de calcul différentes se sont succédé.

Ray Kurzweil évalue que, de 1900 à 2000, nous sommes passés de 10^{-8} à 10^5 instructions par seconde pour un dollar. En un siècle, la puissance de calcul pour une somme d'argent donnée a donc augmenté d'un facteur 10^{13} , ce qui correspond à un accroissement moyen de 35 pour cent par an, soit un doublement tous les 2,4 ans.

Ce résultat suggère que la loi de Moore est généralisable. On peut donc espérer que, lorsque la technologie de la gravure optique des circuits intégrés aura atteint ses limites (vers 2020 ou avant), elle sera remplacée par une autre technologie qui prendra le relais et permettra la poursuite des gains réguliers des performances informatiques.

Indiquons quelques repères indiqués par le spécialiste Ray Kurzweil (les chiffres représentent le nombre d'instructions par

seconde, par dollar dépensé).	
Machine analytique 1900	10^{-8}
Tabulateur IBM 1919	10^{-6}
Calculateur Bell Modèle I 1940	10^{-5}
ENIAC 1946	10^{-3}
Univac1103 1953	10^{-2}
DEC PDP1 1960	10^{-1}
DEC PDP8 1965	2
Altair 8800 1975	10
IBM PC 1982	10^{+2}
Pentium II 1999	10^{+5}



à la version que nous avons donnée : deux énoncés, l'un en 1965, l'autre en 1975 concernant la densité des transistors, conduisent à l'énoncé de la loi standard de Moore : un doublement de performance tous les 18 mois.

Notons qu'il ne s'agit pas, bien sûr, d'une loi mathématique ou physique, mais d'une simple règle hypothétique permettant l'évaluation de l'avenir des performances informatiques. Ces performances résultent d'une combinaison de facteurs sociaux, économiques, technologiques et physiques : les succès des techniques informatiques auprès du public (facteur social) et la concurrence entre firmes (facteur économique) déterminent les bénéfices de l'industrie des semi-conducteurs, qui fixent à leur tour l'investissement en recherche de cette industrie (facteur technologique), lui permettant de surmonter les obstacles qu'oppose la réalité matérielle (facteur physique).

Un doublement de performance tous les 18 mois est équivalent à une multiplication par 1 000 tous les 15 ans (dix doublements valent exactement une multiplication par 1 024) et à une multiplication par un million tous les 30 ans. Si les performances des voitures avaient suivi le même rythme, nous roulerions aujourd'hui un million de fois plus vite qu'en 1970, soit environ à 30 000 kilomètres/seconde... et dans six ans nous dépasserions la vitesse de la lumière ! G. Moore, voyant que chaque prédiction concernant l'évolution de l'informatique lui est attribuée dit avec humour qu'il est l'inventeur de la fonction exponentielle comme Al Gore est l'inventeur d'*Internet* (Gordon Moore est républicain!).

Menons un petit calcul pour tester la loi de 1975. Nous sommes passés de 2 300 transistors pour le *Intel-4004* de 1971, à 42 millions de transistors pour le *Pentium 4* disponible depuis novembre 2000. Cela correspond à un facteur multiplicatif de 18 260 en 29 ans, soit une multiplication par $18\,260^{2/29} = 1,967$ tous les deux ans, valeur remarquablement proche du facteur 2 du second pronostic de Moore.

L'augmentation de densité prédite s'est précisément réalisée entre 1971 et aujourd'hui, mais, comme Moore le fait remarquer, sa prophétie était «auto-réalisatrice» : l'industrie (et lui-même en particulier comme acteur de premier plan de cette industrie) s'est fondée sur elle pour fixer ses objectifs et ses plans d'investissements.

Gordon Moore, aujourd'hui milliardaire et âgé de 71 ans, a évalué que les usines de circuits produisent chaque année plus de transistors (10^{17} environ), qu'il n'existe de fournis sur terre (10^{16} ,

nombre proposé par le naturaliste Edward Wilson). Ramené au nombre d'humains sur terre, on peut aussi noter que, chaque année, plus de dix millions de transistors sont dessinés pour chaque être humain : les inventeurs du transistor de 1947 (W. Shockley, W. Brattain, J. Barden) peuvent être fiers d'eux !

EST-CE QUE CELA VA CONTINUER? NON

Gordon Moore prévoit maintenant que sa loi ne restera pas indéfiniment vraie. Il pense que, dans les dix prochaines années, elle sera satisfaite, mais au-delà, il prédit un ralentissement, le rythme se réduisant à un doublement du nombre de transistors par unité de surface tous les quatre ans (donc un doublement de performance tous les trois ans environ).

Si l'on s'en tient au perfectionnement des techniques de gravure optique des puces, on devra utiliser des longueurs d'onde de plus en plus courtes. Or, au mieux, on ne peut graver des traits qu'avec une précision de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière utilisée. Comme plus rien n'est transparent pour les longueurs d'onde très courtes, on ne peut plus concevoir et réaliser des lentilles pour contrôler la gravure au-delà d'une limite qu'on n'est pas loin d'atteindre. Aujourd'hui, les longueurs d'onde utilisées se situent entre l'ultraviolet et les rayons X. Le récent *Pentium 4*, par exemple est dessiné avec une gravure de 180 nanomètres. On étudie déjà ce que l'on va pouvoir faire avec des longueurs d'onde de 130 nanomètres et l'on envisage pour la prochaine décennie des longueurs d'onde de 15

2. QUELLE EST LA PUISSANCE DU CERVEAU HUMAIN?

- Se fondant sur une étude détaillée de la rétine humaine, Hans Moravec, de l'Université *Carnegie Mellon*, évalue que le cerveau humain est équivalent à un ordinateur d'une puissance de 10^{14} instructions par seconde.
 - Nick Bostrom, de l'Université de Yale, propose une évaluation fondée sur le raisonnement suivant. Dans le cerveau humain, il y a environ 10^{11} neurones, chacun possédant environ 5 000 synapses ; les signaux circulent au travers de ces synapses à la vitesse de 100 décharges par seconde environ, et chaque signal porte approximativement 5 bits d'information. Au total, le cerveau opère donc un calcul d'environ 25×10^{16} opérations binaires par seconde qui, ramenées en instructions par seconde, donnent le nombre approximatif de 10^{17} instructions par seconde.
 - Ray Kurzweil, par un calcul analogue, arrive au nombre un peu inférieur de 2×10^{16} instructions par seconde.
 - Ralph Merkle qui, lui, fait une estimation en se fondant sur la consommation d'énergie par un neurone comparée à la consommation totale du cerveau, obtient une fourchette : le cerveau humain aurait une puissance comprise entre 10^{13} et 10^{16} instructions par seconde.
 - Certains spécialistes, arguant de la complexité interne des neurones, qui seraient chacun de petits calculateurs, suggèrent que ces nombres doivent être multipliés par 100, ce qui conduit à 10^{19} instructions par seconde.
- Notons encore que le véritable équivalent informatique en calcul du cerveau pourrait être plus faible que l'estimation la plus basse de 10^{13} (Merkle). En effet, il est certain que, pour effectuer une multiplication comme 43×52 , un cerveau humain mobilise une énorme force de calcul impliquant des millions de neurones pendant plusieurs secondes, qui effectuent donc l'équivalent de millions d'instructions, alors qu'une puce fait une telle multiplication en quelques instructions. Si d'autres activités mentales sont aussi "mal programmées" dans notre cerveau, alors l'imitation du cerveau pourrait être obtenue avec une puissance bien inférieure à celle qu'il possède.

En résumé, les estimations de la puissance du cerveau humain oscillent entre 10^{13} et 10^{19} instructions par seconde, cette fourchette pouvant peut-être être élargie vers le bas. Cela est certes très imprécis, mais reflète l'ignorance où nous sommes de ce que fait un cerveau.



nanomètres, qui semblent la limite des méthodes actuelles.

Au-delà, les procédés de lithographie devront utiliser les rayons X (technologie étudiée par IBM) ou des faisceaux d'électrons (technologie étudiée par Bell), mais ces nouvelles méthodes ne sont plus de simples prolongements de ce qu'on sait faire, elles demanderont donc des investissements nouveaux colossaux... et de la chance, car on ne peut être certain que cela va marcher.

Quant aux projets de développements de calculateurs quantiques ou à ADN étudiés dans certains laboratoires de recherche, Gordon Moore, comme la plupart des spécialistes, pense que cela ne pourra jouer un rôle que dans un avenir lointain, et en tout cas pas dans les dix ans à venir.

Parmi les variantes de la loi de Moore, la loi de Rock inquiète de nombreux observateurs. Elle énonce que le coût en investissements double tous les quatre ans. L'industrie du microprocesseur est une industrie de l'ordre de 200 milliards de dollars par an, qui investit 10 pour cent de ses revenus dans la recherche et le développement. La loi de Rock, freinerait peut-être plus les progrès envisageables (les doubléments de performances prévus tous les 18 mois) que les difficultés liées à la physique, car rien en économie ne croît aussi vite et, tôt ou tard, il y aura un manque de ressources financières, en tout cas avant

que la totalité des richesses économiques terrestres ne soient consacrées à la fabrication de microprocesseurs! La limitation économique imposera sa contrainte à la courbe exprimant la densité de transistors en fonction du temps.

Notons, en passant, que la loi de Machrone, variante humoristique de la loi de Moore, est étonnamment exacte : l'ordinateur dont vous rêvez vaut toujours 5 000 dollars (ou euros).

EST-CE QUE ÇA VA CONTINUER? OUI!

Lorsqu'on observe certains aspects particuliers des performances informatiques, on découvre que la loi de Moore (standard) a été récemment dépassée dans trois domaines où l'augmentation des performances a été plus rapide que le fameux doublement tous les dix-huit mois. Ces trois domaines sont l'affichage graphique, le stockage sur disques magnétiques et la capacité des fibres optiques.

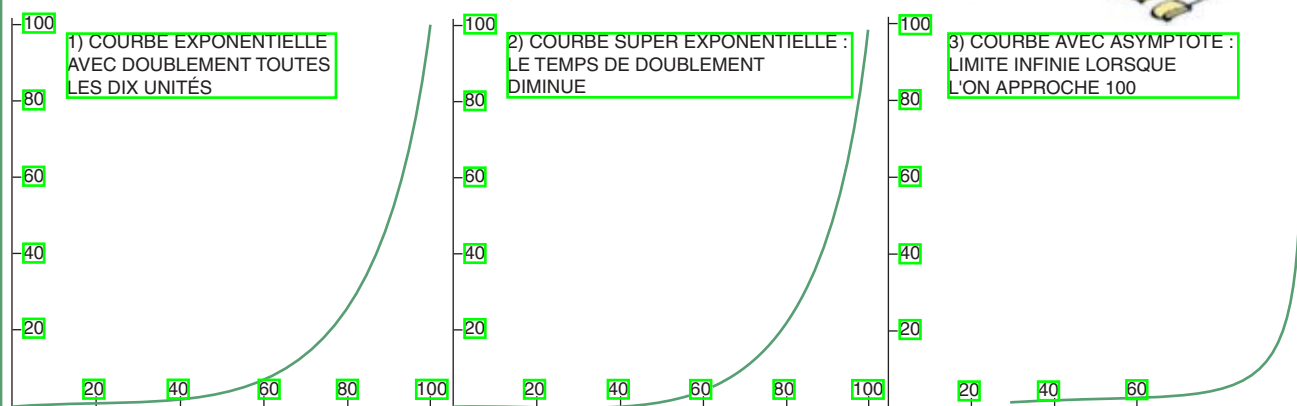
Fin 1998, pour 250 \$, on pouvait disposer d'une carte graphique traitant un million de polygones par seconde et produisant donc de belles animations 3-D en images de synthèse. Les spécialistes annoncent, pour un prix équivalent, des cartes capables d'afficher 100 millions de polygones par seconde à la fin 2001. Le gain en performance sera donc d'un facteur 100 en trois ans, ce qui

correspond à un facteur 10 en 18 mois, bien plus que le doublement habituel. L'explication de ces progrès accélérés se trouve dans le succès commercial des jeux utilisant les simulations 3-D qui ont conduit à la mise au point de puces spécialisées ; celles-ci bénéficient à la fois des progrès d'intégration (le nombre de transistors par unité de surface) de la fréquence plus élevée des processeurs (ces deux facteurs conduisent au doublement tous les 18 mois), et tirent aussi avantage d'une meilleure conception des algorithmes et du dessin optimisé des circuits. C'est là que les progrès dans la maîtrise mathématique et le savoir-faire spécialisé sont responsables de ce dépassement des prévisions : non seulement l'électronicien avance, mais aussi le mathématicien et l'informaticien.

Dans le domaine du stockage des données sur disques magnétiques, la loi



3. LES PRÉVISIONS DE L'AUGMENTATION DE LA PUISSANCE DE CALCUL



L'augmentation des performances informatiques franchit les transitions technologiques produisant des doubléments à intervalles réguliers, qui semblent même à certains analystes de plus en plus rapprochés. Trois hypothèses sont à envisager. (1) La courbe de performance informatique est déterminée par une fonction exponentielle, c'est-à-dire une fonction de type : $t \rightarrow C \cdot a^t$: l'espace entre deux doubléments est constant. (2) La courbe de performance est déterminée par une fonction super-exponentielle, par exemple $t \rightarrow C \cdot t^t$: la durée entre deux doubléments diminue. (3) La courbe de

performance possède une asymptote verticale comme celle de la fonction $t \rightarrow C/(s - t)$: lorsque t s'approche de s , la singularité, la performance, tend vers l'infini. Si la troisième hypothèse est vérifiée, alors se pose la question de l'interprétation de cette singularité. Ce changement radical a été théorisé par V. Vinge, du Département de mathématiques de l'Université de San Diego, qui considère qu'elle correspond à la mise au point de machines plus intelligentes que l'homme. Bien sûr, ces réflexions prospectives proches de la science-fiction sont considérées avec méfiance par la majorité des scientifiques.

de Moore s'est appliquée sans fantaisie jusqu'en 1998, mais, depuis, suite à des avancées techniques accélérées (ici, il ne s'agit plus de densité de transistors, mais de maîtrise des constituants magnétiques), l'augmentation de la capacité de stockage est multipliée par 3,5 tous les 18 mois, beaucoup plus que ce que prévoit la loi de Moore standard. Les disques durs d'un téraoctet (10^{12} octets, c'est-à-dire mille milliards de caractères) dont nous allons pouvoir disposer d'ici peu permettront de stocker l'équivalent d'un million de livres de 200 pages, ou 400 cassettes vidéo VHS, ou encore toutes les conversations d'une personne durant toute sa vie!

Enfin, dans le domaine du transport optique d'informations on assiste, grâce au procédé de multiplexage (passage simultané de plusieurs lumières de longueurs d'onde différentes dans la même fibre) à un doublement de capacité tous les six mois (multiplication par 8 tous les 18 mois) largement supérieur encore à ce qu'une traduction directe de la loi de Moore standard laisse espérer.

Ces accélérations dans des domaines particuliers seront peut-être momentanées, et la loi de Moore d'un doublement de performance tous les 18 mois semble pour l'instant le repère général le plus fiable pour envisager l'avenir des performances informatiques dans les dix prochaines années.

PRÉVISIONS À LONG TERME

La loi de Moore, relativement précise, s'applique sur une assez courte période de temps, car, dans l'esprit de son inventeur, elle ne concerne vraiment que la technologie des circuits intégrés qui sont dessinés en utilisant une lithographie optique classique sur du silicium. Les autres méthodes de lithographie étudiées, les idées d'ordinateurs optiques, quantiques ou à ADN constitueront des sauts technologiques dont personne aujourd'hui ne peut vraiment être certain du succès. Dans 20 ans, ou bien nous aurons rencontré un mur, et les performances auront cessé de croître au rythme actuel, ou bien nous aurons réussi une transition technologique.

La prévision pour le siècle qui commence doit donc se fonder sur une vue plus générale provenant de l'étude du passé sur une période incluant des transitions technologiques importantes. Plusieurs de ces études ont été menées, dont celle de Ray Kurzweil (*The Age of Spiritual Machines*, Penguin Books, 1999) qui couvre le XX^e siècle dans sa totalité.

4. LE PLUS GROS ORDINATEUR D'AUJOURD'HUI ET CEUX DE DEMAIN

Le plus puissant ordinateur du monde aujourd'hui est un ordinateur IBM répondant au doux nom de *ASCI-White-SP-Power-3-375-MHz*. Installé depuis novembre 2000 en Californie, il dispose d'une puissance de 5 000 GFLOPS, ou, en gros, 10^{13} instructions par seconde. Le FLOPS (Opération en virgule flottante par seconde) qui donne naissance au MFLOPS (10^6 FLOPS) et au GFLOPS (10^9 FLOPS) et au TFLOPS (10^{12} FLOPS) est utilisé pour l'évaluation des ordinateurs destinés aux calculs avec des nombres réels dont on a besoin en météorologie et dans le domaine de la physique atomique. On peut sommairement évaluer qu'un FLOPS vaut de 2 à 10 instructions par seconde, d'où notre conversion des 5 000 GFLOPS en 10^{13} instructions par seconde. L'ordinateur numéro un n'est pas un «micro», loin s'en faut : il occupe une surface au sol équivalente à celle de deux terrains de basket, pèse plus de cent tonnes, et possède 8 192 processeurs de calculs travaillant en parallèle pour réaliser des simulations d'explosions atomiques, ce qui est moins polluant que de les réaliser dans l'atmosphère. Jusqu'à présent, la physique atomique était la plus grosse consommatrice de puissance informatique. Les choses sont en train de changer, et les sciences de la vie devraient rapidement passer en tête.

Un système dédié à des calculs bioinformatiques d'une puissance de 10^{14} instructions par seconde est en cours de conception et sera opérationnel en 2004. Ce projet résulte d'une association entre *Celera* (firme privée s'occupant du séquençage des génomes et ayant déjà apporté une contribution majeure au projet de séquençage du génome humain), *Compaq* (Société informatique) et le *Sandia Labs* (Laboratoire du Département de l'énergie américaine qui s'occupe aujourd'hui de physique nucléaire). Cet effort sans précédent dans le domaine des sciences de la vie est une réponse au défi lancé par J. Craig Venter, président de *Celera*, qui a déclaré que «les plus puissants systèmes informatiques d'aujourd'hui ne sont pas en mesure de satisfaire les besoins en calcul rencontrés dans le domaine de la génomique».

La firme IBM, qui n'est pas en reste, développe un système appelé *Blue Gene* dont la puissance prévue est dix fois supérieure encore, soit 10^{15} instructions par seconde environ. Si l'on accepte le chiffre moyen de 10^{15} pour la puissance d'un cerveau, *Blue Gene* sera le premier ordinateur à égaler un cerveau.

Nous assistons à un changement de perspectives, et les gros ordinateurs qui, depuis l'ENIAC, ont toujours été développés dans le cadre de projets militaires, vont maintenant laisser la place à des systèmes développés à des fins plus pacifiques dans le cadre de la recherche en biologie. Paul Robinson, président des Laboratoires *Sandia*, confirme ce changement de tendance : «L'industrie des armes nucléaires pensait depuis des années que rien n'était plus complexe que la physique atomique. En réalité, rien ne dépasse la complexité de la biologie, le génome humain et les défis qu'il soulève».

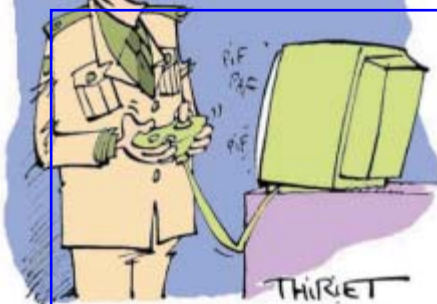


Les machines à calculer mécaniques ou à relais électromécaniques n'utilisaient pas de transistors. La première question à résoudre pour traiter du XX^e siècle dans son entier est donc : comment comparer la puissance de machines, dont certaines ne pouvaient faire que quelques additions par minute, à d'autres qui affichaient des millions de pixels par seconde.

Aucune unité précise de calcul ne peut être proposée, et les organismes qui aujourd'hui expertisent les machines et les comparent (par exemple, *Top500* à l'adresse www.top500.org) le font tou-

jours à partir de jeux de tests variés (dénommés *benchmarks*) qui leur fournissent des indices de comparaison spécifiques. Les méthodes fondées sur ces jeux de tests ne permettent que de comparer des machines proches dans le temps et la conception : on comprend qu'il soit difficile de demander à l'ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*) de 1945 d'exécuter un programme de traitement de texte actuel ou le dernier jeu avec images animées en «full 3D». D'ailleurs, aucun ENIAC n'est aujourd'hui en état de marche!

5. QUI DISPOSE DE PLUS DE PUISSANCE DE CALCUL AUJOURD'HUI : LES MILITAIRES, LES PROPRIÉTAIRES DE PC OU LES ENFANTS ?



La puissance cumulée des 500 plus grosses machines actuelles est évaluée à 88 TFLOPS, ce qui donne environ 10^{15} instructions par seconde, qu'on peut en gros considérer comme la puissance dont disposent les militaires aujourd'hui. La puissance cumulée des PC (cinq cents millions de machines ayant une puissance moyenne d'environ 2×10^8 instructions par seconde) est plus de cent fois supérieure (10^{17}). Même les enfants avec leurs consoles de jeux battent les militaires. En effet, les consoles de jeux se vendent par dizaines de millions – 76 millions d'exemplaires de la *Playstation* première génération de *Sony* – et disposent d'une puissance de calcul cumulée du même ordre de grandeur que celle de tous les micro-ordinateurs du monde. À vrai dire, les données qui permettraient de départager les ordinateurs personnels des consoles de jeux ne sont pas disponibles avec assez de précision (ce qui, de toutes les façons, ne permettrait pas une conclusion très intéressante, puisque de nombreux PC sont utilisés... comme console de jeux!)

En comptabilisant tous les ordinateurs petits et moyens, tous les microprocesseurs (dans les téléphones portables, les machines à laver, etc.), on peut sommairement évaluer qu'aujourd'hui l'humanité dispose d'une puissance de calcul électronique de 10^{18} instructions par seconde, ce qui dépasse sans doute la puissance de calcul du cerveau humain (rappelons la fourchette 10^{13} – 10^{19} proposée pour évaluer cette puissance).

En définitive, sur une longue période, on ne peut éviter d'avoir recours aux unités de mesure. Comme aucune méthode ne définit d'unités précises et fiables, il faut se contenter de mesures assez vagues. Cela n'est pas très grave, car dans un univers en croissance exponentielle comme celui de l'informatique, une incertitude d'un facteur dix, voire cent, correspond à une courte période de temps et ne compromet pas l'analyse générale.

Une opération élémentaire de calcul devrait en toute logique correspondre à une opération binaire élémentaire comme le calcul d'un OU ou d'un ET entre deux données binaires : «0 ou 1 = 1», «1 et 0 = 0», etc. Le plus souvent, on désigne par opération élémentaire (ou instruction élémentaire, ou calcul élémentaire) une manipulation (copie, transfert, duplication, etc.) d'un mot de l'ordinateur auquel on s'intéresse, mot comportant plusieurs informations binaires. Selon la longueur du mot (qui change d'un ordinateur à l'autre), une instruction équivaut donc à un nombre d'opérations binaires élémentaires compris entre 10 et 100, voire plus. Toutes sortes d'autres raisons rendent impossible la définition d'une mesure universelle précise et fiable de l'unité de calcul,

et il faut se contenter de mesures approximatives pour suivre le progrès des ordinateurs sur le long terme. L'unité instruction, aussi imparfaite soit-elle, est cependant le moins mauvais outil de comparaison qui existe, et c'est lui qu'on retient en général.

L'instruction donne naissance à l'unité de puissance IPS (instruction per second), qui conduit à l'unité la plus souvent mentionnée aujourd'hui, le MIPS : million d'instructions par seconde. Cependant cette unité est tellement manipulée commercialement que certains en plaisantent et disent que MIPS signifie *Meaningless Indicator of Performance for Salesmen* (indicateur de performance sans signification pour commerciaux).

Le prix des machines informatiques pouvant varier considérablement, une étude sérieuse se devait d'en tenir le plus grand compte : c'est pourquoi finalement Ray Kurzweil a adopté dans son étude futuriste l'unité «instruction par seconde pour 1 \$». Il constate une évolution allant de 10^{-8} en 1900 à 10^5 en 2000, soit une augmentation de puissance – pour une somme donnée – d'un facteur 10^{13} , ce qui correspond à un accroissement moyen de 35 pour cent par an, équivalant à un doublement tous les 2,4 ans.

Au cours du XX^e siècle, une multitude de technologies de calcul ont défilé : machines mécaniques (à base d'engrenages et de tringles métalliques), puis machines électromécaniques (assemblage d'interrupteurs commandés par électroaimants – appelés «relais» – et connectés), puis machines électroniques (construites avec des kilomètres de fils et des milliers de lampes), puis machines à transistors isolés (fichés individuellement sur des cartes), et enfin machines à circuits intégrés (comportant des transistors dessinés simultanément par lithographie optique par centaines, puis par millions).

Les transitions technologiques se sont non seulement faites à chaque fois que cela a été nécessaire, sans que jamais la capacité de calcul ne stagne, mais, en fait, les transitions ont conduit à un progrès qui s'est légèrement accéléré, passant d'un doublement de performances tous les trois ans au début du XX^e siècle, à un doublement tous les ans aujourd'hui.

LA SINGULARITÉ ?

Comparée à l'analyse sur tout le XX^e siècle, la période de 1965 à 2000 que couvre la loi de Moore, n'est donc pas exceptionnelle et, bien au contraire, se conforme à une loi plus générale que l'on peut imaginer valable encore au XXI^e siècle.

L'augmentation des performances de calcul saute par-dessus les transitions technologiques et produit des doublements de performances à intervalles de plus en plus rapprochés. Reste que la diminution du temps nécessaire à un doublement nous amène à nous interroger. La variation de la performance en fonction du temps t ne serait pas une exponentielle de la forme a^t , mais une courbe à croissance superexponentielle, par exemple t^t , ou même une courbe à asymptote verticale en $1/(s-t)$ (lorsque t s'approche de s , la singularité, $1/(s-t)$ tend vers l'infini).

L'hypothèse de la courbe superexponentielle conduit à imaginer un futur où non seulement le progrès se poursuit, mais s'accélère sans cesse, de nouvelles technologies prenant le relais de celles qui, épuisées, ne produisent plus de puissance nouvelle.

Si, comme le pensent certains experts, quantité de problèmes informatiques que chacun rencontre (instabilité des systèmes d'exploitation et des programmes, incompatibilités des logiciels les uns avec les autres ou avec les matériels utilisés, complexité mal maîtrisée à tous les niveaux, etc.) proviennent de la rapidité trop grande des

changements, alors il faut s'attendre à ce que tout empire ; les utilisateurs d'ordinateurs risquent de rencontrer des ennuis de toutes sortes dus aux défaillances et aux caprices de leurs outils, «en progrès» accélérés, mais de moins en moins contrôlés.

Cependant l'hypothèse de la courbe superexponentielle n'est rien à côté de l'hypothèse de la courbe à asymptote verticale (la courbe hyperbolique de la figure 3), car celle-ci signifie que nous approchons d'un instant où le progrès deviendra infini, ce qui bien sûr est matériellement impossible et implique un changement radical avant l'instant s de la singularité. Ce changement radical a été théorisé par Vernor Vinge, du Département de mathématiques de l'Université de San Diego, en 1993. V. Vinge écrit : «Je défends l'idée que nous sommes tout proches d'un changement comparable à l'apparition de la vie humaine sur Terre. La cause précise de ce changement est la création imminente, par notre technologie, d'entités possédant une intelligence plus grande que celle des humains.»

D'autres textes prophétiques ont depuis lors repris l'idée de la singularité créée par l'explosion de la courbe du progrès informatique provoquant ou provoqué par (tout n'est pas très clair !) l'apparition d'intelligences supérieures à celle de l'homme. Bien sûr, rien n'est établi de manière définitive, et il s'agit de spéculations comme la science-fiction les aime depuis longtemps (V. Vinge est d'ailleurs auteur de livres de science-fiction). Certains arguments numériques sont cependant intéressants à examiner et pourront peut-être vous troubler.

L'argument le plus amusant est, sans aucun doute, la comparaison de la puissance de calcul d'un cerveau humain avec la puissance de calcul informatique calculée avec la loi de Moore simplement prolongée (sans même prendre en considération un éventuel raccourcissement de la période de doublement de performances).

CAPACITÉ DE CALCULS DES CERVEAUX

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour mesurer la puissance de calcul d'un cerveau humain, et ont donné lieu à de nombreuses dissertations conduisant à une estimation qui oscille entre 10^{13} et 10^{19} instructions par seconde. Cette grande imprécision ne fait que refléter l'ignorance où nous sommes encore aujourd'hui quant au fonctionnement détaillé du cerveau humain et illustre la difficulté qu'il y a à comparer des puces électroniques et des neurones.

Du côté des machines, le plus puissant ordinateur du monde aujourd'hui, est un ordinateur IBM destiné à la simulation d'essais atomiques au Lawrence Livermore Laboratory en Californie, aux États-Unis. Il dispose d'une puissance d'environ 10^{13} instructions par seconde.

La plus puissante machine, avec ses 10^{13} instructions par seconde, en est donc précisément arrivée aux estimations basses de puissance du cerveau humain. Si le rythme du progrès se maintient, en 2015, l'ordinateur le plus puissant du monde atteindra 10^{16} instructions par seconde et, en 2030, 10^{19} instructions par seconde correspondant à l'estimation la plus haute proposée pour la puissance du cerveau humain qui serait ainsi, selon toute vraisemblance, largement dépassée à cette date. Quelques années de plus, et ce seront les ordinateurs personnels qui atteindront la puissance du cerveau, avant les téléphones portables quelques mois plus tard !

Ray Kurzweil de son côté évalue avec plus de précision (mais en prenant sans doute plus de risques) qu'un ordinateur de 1 000 \$ atteindra la puissance du cerveau humain en 2030 (et atteindra la puissance de tous les cerveaux humains réunis en 2060).

Tout semble assez cohérent, et c'est là une grande nouvelle : pour ce qui est de la puissance de calcul, l'espèce humaine est entrée dans l'ère où elle construit des machines égalant ses propres capacités. Aurons-nous pour autant des machines intelligentes ?

L'INTELLIGENCE N'EST-ELLE QUE DU CALCUL ?

Ce n'est pas sûr du tout. En effet il ne suffit pas d'avoir à sa disposition une grande puissance de calcul pour obtenir de l'intelligence... ce serait bien trop simple.

En voici la preuve. En connectant par le réseau internet les cent millions d'ordinateurs de bureau vendus en l'an 2000, nous disposons déjà d'une sorte de gros ordinateur d'une puissance de calcul de 10^{16} instructions par seconde (les ordinateurs de bureau vendus aujourd'hui ont une puissance dépassant 10^8 instructions par seconde, $5 \cdot 10^8$ même pour les plus récents). Parce que les échanges entre les diverses parties de cet «ordinateur à l'échelle de la Terre» sont trop lents et parce qu'aucun programme ne tente d'utiliser cette puissance pour produire de l'intelligence, ce mastodonte reste essentiellement idiot, bien qu'il dispose sans doute de la puissance d'un cerveau humain.

L'idée un peu trop simple qu'imiter l'intelligence n'est qu'une question matérielle et technique n'est pas nouvelle. En 1950, le célèbre mathématicien anglais Alan Turing prédisait qu'en l'an 2000, avec un ordinateur disposant d'une mémoire d'un milliard de chiffres binaires (pour lui semble-t-il, plus importante que la puissance de calcul et aujourd'hui largement dépassée), nous obtiendrions une machine imitant assez correctement le comportement humain. Cela n'est pas le cas : la «machine de Turing est encore assez bête». Plus proche de nous, Herbert Simon prévoyait, en 1965, qu'en 1985 les machines seraient capables de faire n'importe quel travail qu'un homme réalise. Là encore, la prédiction était trop optimiste.

Le débat sur l'intelligence artificielle, qui a déjà fait couler beaucoup d'encre, n'est donc pas clos. Il entre cependant dans une nouvelle phase. La charge de la preuve – qui était dans le camp des anti-IA, car à défaut de machines puissantes c'était à eux d'argumenter qu'on ne pourrait rien en faire – change de côté, et maintenant qu'une puissance comparable à celle du cerveau est disponible (ou sur le point de l'être), l'échec des tentatives pour rendre intelligentes nos machines prend une nouvelle signification. Les années qui viennent seront déterminantes.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille : delahaye@lil.fr

G. HERMAN, *Benchmarking the Benchmarks*, 1996 : <http://163.18.14.55/datapro/12006-1.htm>

(sur la difficulté de la mesure de la puissance de calcul des ordinateurs)

D. HUTCHESON et J. HUTCHESON, *Le futur de la micro-électronique*, Pour la Science, pp. 50-56, mars 1996.

R. KURZWEIL, *The Age of Spiritual Machines : When Computer Exceed Human Intelligence*, Penguin Book, New York 1999.

R. MERKLE, *Energy Limits to the Computational Power of the Human Brain* : <http://www.merkle.com/brainLimits.html>

H. MORAVEC, *Mind Children. The Future of Robot and Human Intelligence*, Harvard University Press, Cambridge, 1988.

V. VINGE, *On the singularity*. VISION-21 Symposium sponsored by NASA Lewis Research Center and the Ohio Aerospace Institute, March 30-31, 1993 : www.ugcs.caltech.edu/~phoenix/vinge/vinge-sing.html

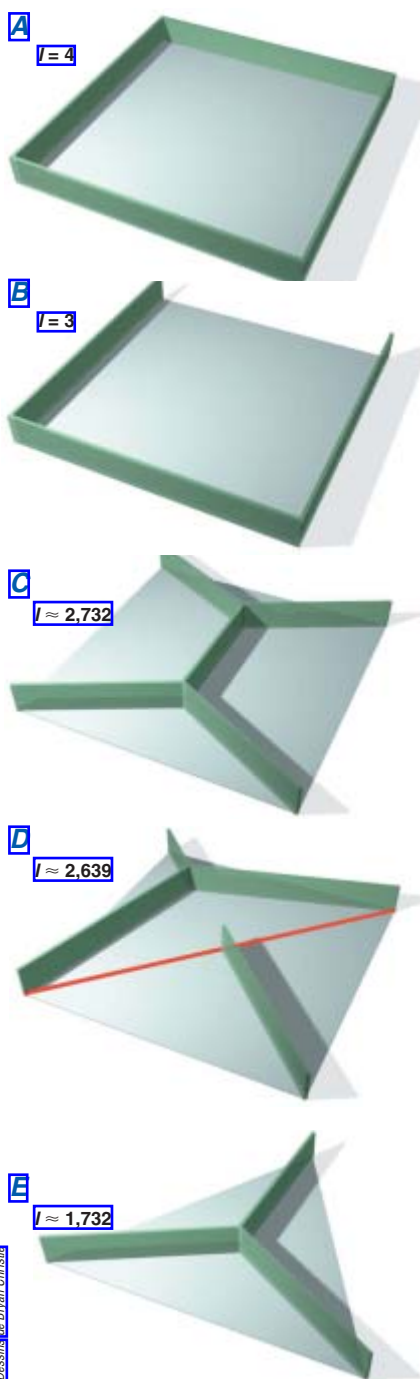
D. YANG, *On Moore's Law and Fishing*. Gordon Moore speaks out, U.S. News 7-10-2000 : <http://www.usnews.com/usnews/transcripts/moore.htm>



Obstruction de polygones

IAN STEWART

Ou comment empêcher un rayon lumineux de traverser un terrain devient vite un problème mathématique ardu.



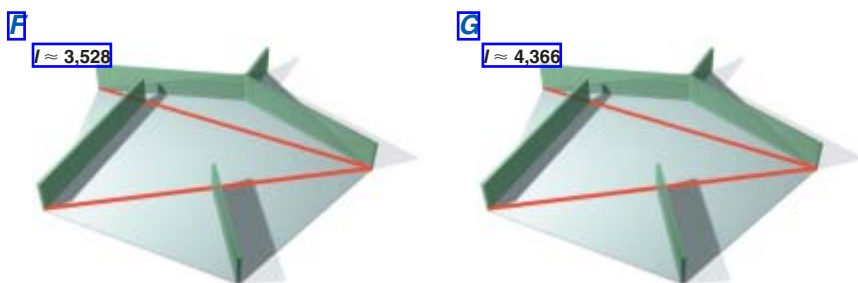
La géométrie combinatoire est un domaine des mathématiques qui fourmille de problèmes simples sans pourtant avoir de solutions connues. Elle consiste à trouver des arrangements de droites, de courbes ou d'autres formes géométriques qui obéissent à des contraintes données. Ce mois-ci, je me consacrerai à la question dite du Problème du carré opaque et à plusieurs variations du même problème. Bernd Kawohl, de l'Université de Cologne, en Allemagne, a attiré mon attention sur ce problème et l'un de ses articles m'a inspiré ces pages.

Supposez que vous travaillez au contre-espionnage de votre pays et vous savez que, dans quelques jours, deux espions situés de part et d'autre du terrain de l'ambassade de votre pays tenteront de communiquer par signaux lumineux. Supposons ce terrain carré, de un kilomètre de côté. Pour empêcher des secrets de passer à l'ennemi, vous décidez de construire une clôture opaque qui interceptera tout rayon lumineux qui traverserait le jardin de l'ambassade. De plus, les finances de votre service sont au plus bas, et vous souhaitez la clôture la plus courte possible. Quelle forme lui donner ? Elle peut être aussi compliquée que vous le voulez, formée de plusieurs parties rectilignes ou courbes.

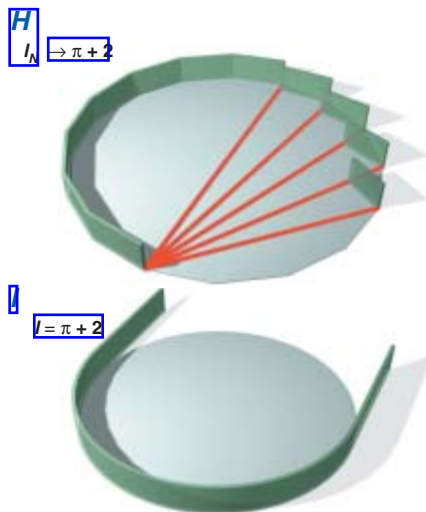
Votre première idée, la plus simple, est de clôturer le pourtour du carré, soit de construire une clôture de quatre kilomètres (voir la figure 1A). Puis, une courte réflexion vous inspire une amélioration : la suppression d'un des côtés du carré ; il reste alors une clôture en U (voir la figure 1B) de trois kilomètres de longueur. Il s'agit de la plus courte clôture qui suit une courbe simple, sans rupture et sans ramification, polygonale ou non. En effet, une telle clôture doit contenir les quatre sommets du carré.

Cependant, vous pouvez encore faire plus court avec des clôtures toujours d'un seul tenant, mais ramifiées. La figure 1C illustre une clôture de $(1 + \sqrt{3})$ kilomètres, soit environ 2,732 kilomètres. Tous les angles mesurent 120 degrés. De tels motifs sont nommés arbres de Steiner : les angles de 120 degrés en minimisent la longueur. C'est la courbe d'un seul tenant la plus courte possible.

Pouvez-vous faire mieux ? Oui, si vous acceptez des clôtures en plusieurs parties : la clôture la plus courte mesure environ 2,639 kilomètres (voir la figure 1D). Les trois segments de la partie supérieure forment trois angles à 120 degrés. Cependant, vous ne pourrez pas démontrer ce résultat au trésorier du service, car une telle démonstration reste à faire.



1. Les clôtures opaques d'une figure sont des barrières qui empêchent toute droite de traverser cette figure. Pour un carré, une clôture qui suit le périmètre (A) ou seulement trois des côtés (B) est opaque. Un arbre de Steiner (C) ou une clôture en deux parties (D) le sont aussi, mais sont plus courts. La clôture minimale pour un triangle équilatéral est aussi un arbre de Steiner (E). Les clôtures opaques que l'on pense être minimales pour un pentagone régulier (F) ou un hexagone (G) sont constituées de trois morceaux. Dans ces figures où l'on suppose les longueurs des côtés égales à un, toutes les longueurs (l) autres que celles qui correspondent à (A) et à (B) sont approximatives.



2. Un polygone régulier ayant un nombre pair et élevé de côtés a une clôture opaque constituée de plusieurs éléments (H). Quand le nombre N de côtés du polygone croît, la longueur l_N de cette clôture s'approche de celle de la clôture opaque minimale d'un cercle (I), soit un demi-cercle prolongé de deux rayons.

Plus encore, les mathématiciens ignorent s'il existe une clôture opaque encore plus courte. Peut-être est-il possible de raccourcir indéfiniment ces clôtures en les compliquant à volonté. On a prouvé l'existence d'une clôture minimale pour un nombre donné de constituants. On ignore encore si la longueur minimale d'une clôture continue à décroître lorsque le nombre de constituants tend vers l'infini. Ou encore, si une clôture qui a une infinité de composants peut être plus courte que toutes celles qui ont un nombre fini d'éléments. Tout cela semble peu vraisemblable, mais personne n'a encore prouvé que c'est impossible.

B. Kawohl a prouvé que la clôture illustrée sur la figure 1D est la plus courte de celles à deux éléments. Il a montré qu'un composant doit relier trois des sommets du carré et que l'autre doit contenir le quatrième. Le premier composant doit alors être l'arbre de Steiner le plus court joignant trois sommets. La plus petite région convexe qui contient ce morceau de clôture, c'est-à-dire la partie protégée du terrain, est un demi-carré limité par une diagonale. Le second élément doit être la plus courte courbe qui joint ce triangle au quatrième sommet, soit le segment de diagonale entre ce sommet et le centre du carré.

Vous avez convaincu votre supérieur et vos services sont requis pour d'autres ambassades. Comment faire pour d'autres formes de terrain ? Quand le terrain est un triangle équilatéral, la clôture opaque la plus courte est l'arbre de Steiner composé de trois segments qui relient chaque sommet au centre (voir la figure 1E). Pour un pentagone régulier, la clôture opaque la plus courte la plus souvent proposée a

trois éléments (voir la figure 1F). L'un d'eux est un arbre de Steiner qui relie trois sommets consécutifs du pentagone. Un autre est le plus court segment de droite qui relie le quatrième sommet à la région protégée par l'arbre de Steiner précédent. Enfin, le dernier élément est le plus court segment qui joint le cinquième sommet à la région protégée par les deux précédents. Personne n'a prouvé que cette clôture est optimale, mais on n'en connaît pas de plus courte.

CLÔTURES ET TRANCHÉES

Nouveau défi pour vos talents d'architecte : l'hexagone (voir la figure 1F). Puisque les angles d'un hexagone sont égaux à 120 degrés, l'arbre de Steiner est composé de trois côtés consécutifs qui relient quatre sommets consécutifs. Le deuxième composant est le plus court chemin du cinquième sommet à la région protégée par l'arbre de Steiner, et le troisième, le plus court chemin du dernier sommet à la région protégée par les autres éléments. De nouveau, on ignore si cette clôture est la plus courte.

Par analogie, vous pouvez clôturer tout polygone régulier convexe dont le nombre de côtés est pair (voir la figure 2H). Après la division du polygone en deux par un diamètre, le premier élément de la clôture est formé des côtés du polygone inscrit dans ce demi-cercle. Le deuxième élément est le plus court chemin qui joint le sommet suivant à la région protégée par le premier constituant, le troisième est le plus court chemin entre le sommet suivant et la région des deux précédents, et ainsi de suite...

Puisqu'un polygone régulier qui a un grand nombre de côtés est proche d'un cercle, quelle est la plus courte clôture opaque d'un terrain circulaire ? Pour simplifier, supposons que le rayon de ce terrain circulaire soit égal à un kilomètre. L'idée la plus simple est une clôture qui suit la circonférence du cercle, soit 2π (environ 6,283) kilomètres. Vous pouvez faire mieux en érigeant une partie de la

clôture à l'extérieur du terrain : une demi-circonférence prolongée à chaque extrémité par une partie de tangente égale au rayon (voir la figure 2I). La forme en U obtenue est bien une clôture opaque pour le cercle, et sa longueur est égale à $\pi + 2$ (environ 5,142) kilomètres.

On peut prouver que ce motif est bien de longueur minimale parmi les clôtures opaques d'un cercle qui sont des courbes simples (d'un seul tenant et sans ramification). Pour ce faire, énonçons le problème en termes de tranchées plutôt que de clôtures. Imaginons qu'un tuyau souterrain rectiligne passe à un kilomètre d'un point donné. Quelle est la tranchée la plus courte qui rencontrera à coup sûr le tuyau ? Nous savons que ce dernier rencontrera tangentiellement le cercle centré au point donné et d'un rayon de un kilomètre, et donc aussi toute clôture opaque de ce cercle. Dès lors, il suffit de tracer une tranchée qui a la forme d'une clôture opaque de ce cercle.

Dans cette version terrassière du problème, il est normal d'accepter que les tranchées sortent du terrain, mais les clôtures sont généralement érigées par un propriétaire sur sa propriété plutôt que chez le voisin. B. Kawohl montre que la clôture opaque minimale tout entière située à l'intérieur du cercle ne saurait mesurer plus de $(\pi + 2)$ kilomètres de longueur. Il obtient ce résultat en utilisant la clôture d'un polygone dont le nombre de sommets est pair et très grand (qui s'approche alors d'un cercle). Un calcul trigonométrique montre que la longueur de la clôture de la figure H tend vers $\pi + 2$ kilomètres lorsque le nombre de côtés tend vers l'infini.

Ces clôtures sont-elles vraiment minimales ? Peut-on en trouver de plus courtes ? Et que dire d'autres formes, tels des polygones irréguliers, convexes ou non, des ellipses, des demi-cercles ? Que se passe-t-il à trois dimensions, avec des murs opaques créés pour un cube ou pour une sphère ? La protection des secrets d'État est source de problèmes pour les mathématiques des jeux.

Réactions

Plusieurs lecteurs ont critiqué un calcul exposé dans l'article *Un guide fractal du jeu de ticktacktoe* (voir *Pour la Science*, octobre 2000). J'indiquais que le nombre de parties possibles au morpion est 362 880. J'aurais dû préciser que ce calcul tient compte de l'hypothèse selon laquelle le jeu continue jusqu'à ce que toutes les cases de la grille soient remplies plutôt que de s'arrêter dès que l'un des joueurs gagne. Le nombre total de séquences qui remplissent toute la grille est $9 \times 8 \times 7 \times \dots \times 3 \times 2$ (noté 9!), soit bien 362 880.

Quel est le nombre de jeux réels ? John Stewart, de l'Université de Rockedge, indique que ce nombre est donné par :

$$9! - 24M - 6N - 2P - Q + (M + N + P + Q),$$

où M, N, P et Q sont les nombres de jeux terminés après le cinquième, sixième, septième et huitième mouvements. Leurs valeurs exactes restent à calculer. À vos calculatrices ! Selon J. Stewart, ce nombre serait 1440.



Un vide plus ou moins... vide

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-MICHEL COURTY

Raréfiés, les gaz ont des comportements différents selon la taille de l'enceinte où ils sont confinés.

Une pression faible suffit-elle à définir le vide? Pas pour un physicien, pour qui le vide se mesure en termes de collisions moléculaires. Pour créer le vide, on doit pomper le gaz contenu dans l'enceinte à vider afin que le nombre de molécules qu'elle contient diminue. Toutefois, en raison des mécanismes physiques qui s'installent quand les collisions moléculaires sont peu nombreuses, le pompage est d'autant plus difficile que le nombre de molécules présentes dans l'enceinte diminue. La pression cesse alors d'être un paramètre pertinent, et doit être remplacée par le «libre parcours moyen», c'est-à-dire par la distance moyenne parcourue par une molécule entre deux collisions. Tentons de comprendre comment s'opère ce basculement entre la notion de pression faible et celle de libre parcours moyen dans un gaz raréfié, en examinant de près comment... on fait le vide.

Pour le physicien ou pour l'ingénieur, cette expression signifie avant tout retirer les gaz de l'enceinte. Dans un liquide et encore plus dans un solide, les forces d'attraction sont assez grandes pour maintenir les atomes et les molécules à des distances du même ordre de grandeur que la taille des molécules ou des atomes eux-

mêmes. Il en va autrement dans les gaz, car l'agitation thermique l'emporte sur l'attraction : les molécules d'un gaz sont séparées par des distances bien supérieures à leur taille ; elles interagissent essentiellement lors de brèves collisions. Puisque ses molécules sont libres de se déplacer, un gaz tend à occuper spontanément tout le volume disponible.

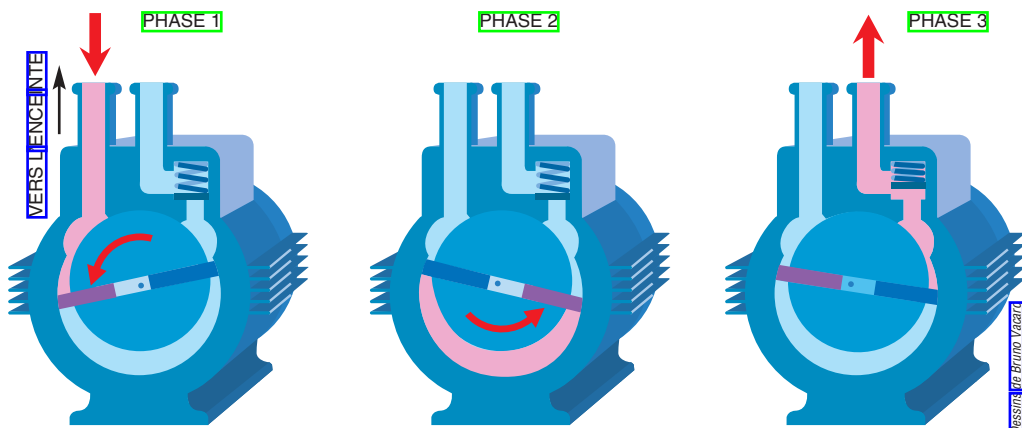
LA POMPE À PALETTES

Pratiquement, tous les systèmes à faire le vide exploitent cette propriété, notamment les pompes à palettes, l'un des systèmes les plus utilisés pour créer des vides industriels. La rotation de palettes solides d'un tambour permet d'abord au gaz de l'enceinte que l'on veut vider d'occuper un volume supérieur au volume de l'enceinte elle-même. Ce gaz (*en rose sur la figure*) est entraîné par le mouvements des palettes (phase 1), isolé de l'enceinte et de l'extérieur (phase 2), puis repoussé vers l'extérieur (phase 3). La rotation se poursuivant, l'enceinte est à nouveau isolée pendant que le volume aspiré est évacué. Avec les pompes à palettes, on atteint des pressions inférieures à un pascal, soit un dix millième de la pression atmosphérique. Pour aller au-delà, il faut

disposer d'autres dispositifs de pompage, qui prennent le relais une fois que la pompe à palettes n'est plus efficace.

Voyons pourquoi, dans la plupart des cas, la pression caractérise la qualité du vide. Cette grandeur macroscopique mesure la force exercée par le gaz sur les parois de l'enceinte. Elle résulte des chocs incessants des molécules sur les parois. Par conséquent, la pression d'un gaz est d'autant plus élevée que les chocs sont plus nombreux (la densité de molécules dans le gaz est élevée) ou que les chocs sont plus violents (l'agitation thermique est forte). Cette pression est proportionnelle au produit de la densité du gaz par sa température. Elle ne peut être faible que dans deux situations : quand le gaz est très froid ou quand l'enceinte contient peu de molécules. Le vide est souvent créé à température constante (celle du récipient), de sorte que la pression mesure directement le nombre de particules par unité de volume.

Il existe toutefois des situations où la pression cesse d'être le paramètre pertinent pour caractériser le vide. Les physiciens préfèrent alors s'intéresser au «libre parcours moyen» défini précédemment. Contrairement à la pression, le libre parcours moyen est une grandeur microscopique, applicable dans toutes les situations. Un raisonnement simple suffit à déterminer sa valeur à un facteur près. Lorsqu'une molécule se déplace, elle balaye au cours de son mouvement un cylindre dont la section est égale à celle de la molécule et la longueur est la distance parcourue. Elle subit autant de chocs qu'il y a de molécules dans ce volume. La longueur correspondant à un seul choc, c'est-à-dire au libre parcours moyen, est d'autant plus grande que le nombre de molécules rencontrées est faible et que la molécule est petite. Ainsi le libre parcours moyen est inversement proportionnel au produit du nombre de molécules par unité de volume par la valeur de la section géométrique d'une molécule. Celle-ci est en général de l'ordre de 0,5 nanomètre carré. À température ambiante (25 °C) et sous une pression



Une pompe à palettes est reliée à l'enceinte où l'on veut faire le vide. Les palettes, solidaires d'un tambour qui tourne, entraînent l'air (*en rose*) contenu dans l'enceinte (phase 1) ; elles isolent ce gaz soustrait à l'enceinte (phase 2), puis le mettent en communication avec le milieu extérieur (phase 3), où il s'échappe. Au fil des cycles, l'air est aspiré de l'enceinte où l'on fait le vide.

égale à la pression atmosphérique normale, la densité volumique des molécules vaut environ $2,4 \times 10^{25}$ molécules par mètre cube. Une molécule parcourt alors en moyenne 0,08 micromètre entre deux chocs, soit 200 fois son diamètre. Leur vitesse moyenne étant d'environ 300 mètres par seconde, les molécules du gaz subissent environ quatre milliards de chocs par seconde!

RÉGIME HYDRODYNAMIQUE ET RÉGIME MOLÉCULAIRE

Ainsi, le comportement d'un gaz raréfié dépend de la «place» dont disposent ses molécules, de leur libre parcours moyen. Si ce dernier est très petit devant la taille de l'enceinte, une molécule interagit souvent avec ses congénères. Dans ce cas, les collisions uniformisent les propriétés du gaz. Ce dernier est alors dans un régime dit «hydrodynamique», car il se comporte comme un fluide homogène. Les collisions entre molécules (résultant de l'agitation thermique) l'emportent sur les autres phénomènes et confèrent au gaz une vitesse moyenne égale à la vitesse moyenne des molécules, comme dans un fluide. Les collisions intermoléculaires microscopiques engendrent la viscosité macroscopique du gaz, c'est-à-dire sa tendance à résister à l'écoulement, et à dissiper de l'énergie. Les interactions avec les parois, qui ne jouent qu'un rôle de confinement des molécules, sont peu nombreuses.

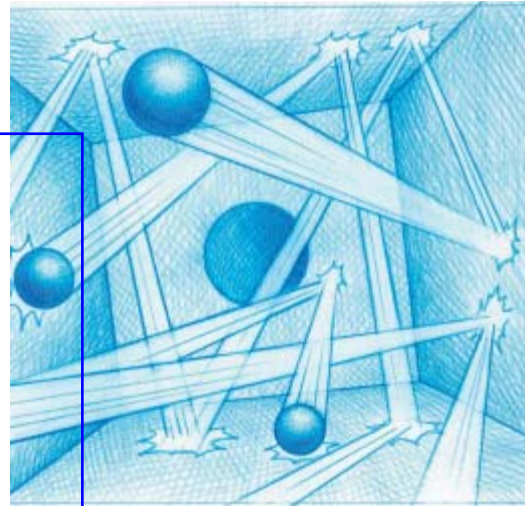
En revanche, quand le libre parcours moyen est supérieur à la taille de l'enceinte, une molécule rencontre peu ses semblables. Les molécules se déplacent

alors de paroi en paroi sans interagir entre elles et le gaz adopte un nouveau comportement : il est en «régime moléculaire». La pression où apparaît ce régime dépend de la taille de l'enceinte considérée. Ainsi, à température ambiante, le régime moléculaire survient dans un tube capillaire dont le diamètre intérieur vaut 10 micromètres et pour une pression de 100 pascals. Cette valeur, 1 000 fois inférieure à la pression atmosphérique normale, est facile à atteindre avec une pompe à palettes. En revanche, dans une enceinte de 10 centimètres de largeur, le régime moléculaire est atteint pour une pression égale à 0,08 pascal, qu'une pompe à palettes ne permet pas d'atteindre. La densité est alors d'environ 2×10^{19} molécules par mètre cube.

Cette valeur, ainsi que celles de la densité des molécules dans le meilleur des vides que l'on obtient en laboratoire restent énormes par rapport à celles qui règnent dans le milieu interstellaire. Ce dernier est plus vide que le meilleur vide que nous sachions réaliser. Dans un nuage interstellaire, le libre parcours moyen d'une molécule est proportionnel à l'inverse de la densité. Cette dernière varie beaucoup selon la température du nuage. Dans les nuages interstellaires froids (100 kelvins) au sein desquels les étoiles se forment, la densité est par exemple de 40 molécules par centimètre cube. Paradoxe apparent, les astrophysiciens considèrent qu'un tel nuage est en régime hydrodynamique! En effet, bien que les libres parcours moyens y soient gigantesques – quelques centaines de millions de kilomètres – ils restent très inférieurs aux tailles courantes des nuages interstellaires : elles se mesurent en millions de milliards de kilomètres.

LES LIMITES DU VIDE

Pourquoi le vide obtenu sur Terre est-il limité? D'abord en raison de diverses contraintes mécaniques, notamment des fuites aux joints (de l'air pénètre dans l'enceinte de la pompe, où la pression est inférieure à la pression atmosphérique) ou encore d'une étanchéité médiocre de ces joints qui s'«usent». En régime hydrodynamique, les molécules s'écoulent dans le tuyau. En revanche, quand les molécules se réfléchissent sur les parois, la situation change : au lieu de rebondir comme une balle sur un mur, une molécule qui rencontre une paroi, y adhère un instant, puis repart dans une direction quelconque. Dû aux forces attractives de Van der Waals, ce phénomène a des consé-



En régime moléculaire, le libre parcours moyen des molécules est supérieur à la taille de l'enceinte. Dans un tel régime, les seules interactions ont lieu avec les parois.

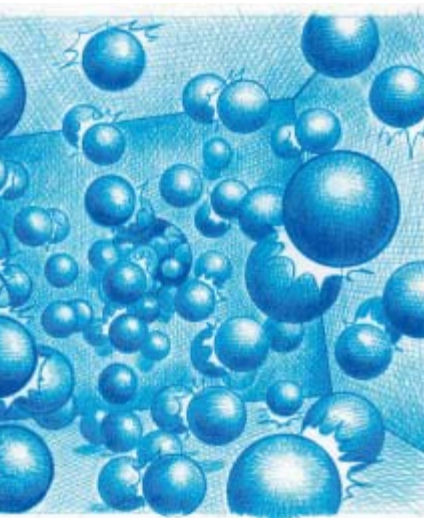
quences étonnantes. Une molécule qui arrive sur une paroi avec une incidence de 30 degrés peut repartir vers l'avant en rasant la paroi, dans la direction perpendiculaire, ou encore vers l'arrière! Pour qu'elle sorte de l'enceinte, une molécule doit avoir une vitesse dirigée dans l'axe du tuyau. Toutefois, même quand elle a atteint le tuyau, elle peut y stagner, car sa direction change après chaque choc sur la paroi. Elle peut même repartir vers l'enceinte à vider! C'est pour cette raison que l'on doit impérativement utiliser des tuyaux courts et de gros diamètre pour réaliser des vides moléculaires. Les effets pernicioeux des rebonds sur les parois du tuyau sont alors réduits au maximum.

Toutefois, ces effets de parois ne sont pas rédhibitoires. Ils peuvent même favoriser la réalisation du vide, si l'on sait les exploiter. Plus la température de la paroi est faible et plus les molécules y restent collées longtemps. Elles peuvent même y rester quasi indéfiniment quand cette température est inférieure à la température de liquéfaction du gaz, voire à celle de sa solidification. Dans ce cas, c'est la paroi elle-même qui sert de pompe (de piège) pour améliorer le vide une fois que l'essentiel des molécules a été enlevé : aucune des molécules qui la frappe ne retourne dans l'enceinte. Un écran refroidi à la température de l'hélium liquide (4 kelvins) collecte ainsi toutes les molécules d'air contenues dans une enceinte. Une habile façon de tirer parti d'un inconvénient!

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. **Jean-Michel COURT** est chargé de recherche au CNRS et travaille au Laboratoire Kastler-Brossel (CNRS, ENS, IPMC).

Aimé RICHARDT et **Isabelle RICHARDT**, *La Technique du vide*, Éditions IN FINE, 1998.

Guy ROMMEL, *Notions de base en technique du vide*, Éditions SFV, 1995.



En régime hydrodynamique, le libre parcours moyen, c'est-à-dire la distance parcourue par une molécule entre deux chocs avec ses semblables, est inférieur à la taille de l'enceinte. Dans un tel régime, le gaz se comporte comme un fluide et s'écoule sans interagir (ou quasiment) avec les parois.

Biologie

La symbiose. Structures et fonctions. Rôle écologique et évolutif

Marc-André Selosse, Vuibert, 2000 (154 pages, 139 francs)

La vie harmonieuse à deux (précisons : deux individus d'espèces différentes) a complètement changé de statut au cours des dernières années. Dans un passé proche, les mots «symbiose» ou «mutualisme» évoquaient des associations, telle celle du bernard-l'hermite et de son anémone de mer, pittoresques certes et qui posaient des problèmes d'évolution et de comportements passionnants, mais de peu de conséquences sur le monde vivant pris dans son ensemble. Les choses ont bien changé depuis qu'une vieille hypothèse, presque abandonnée dans les années 1950, a été remise au goût du jour, sous l'impulsion de l'Américaine Lynn Margulis, et s'est révélée exacte : la cellule eucaryote moderne, pierre d'angle de l'évolution des orga-

nismes pluricellulaires, est le résultat d'une symbiose. Chacune de nos cellules est un être double (voire multiple), qui résulte d'un mariage contracté il y a quelque deux milliards d'années entre deux cellules pour former l'ancêtre commun à la quasi-totalité des végétaux, champignons et animaux.

Peu de biologistes doutent aujourd'hui que les mitochondries, mais également les plastides des végétaux et probablement aussi d'autres «organites», tels les peroxysomes (des vésicules qui contiennent des peroxydases intervenant dans l'oxydation de certains substrats) et les flagelles, résultent de ce que l'on nomme des endosymbioses. Les premières cellules eucaryotes (c'est-à-dire possédant un vrai noyau abritant les molécules d'ADN) se seraient associées avec des procaryotes. Les conséquences de ce mariage ont été immenses ! Mariage ne signifie d'ailleurs pas que cette vie à deux ait été totalement harmonieuse, car le vieux couple cellule eucaryote/mitochondries n'est pas exempt de conflits qui font les délices des généticiens. De bon gré ou non, les mitochondries et les plastides ont cédé une part importante de leur information génétique de base au noyau, tandis qu'une autre partie, de plus grandes dimensions encore, était perdue. L'association a été cependant bénéfique pour tout le monde. Par exemple, la cellule moderne ne «respire» de manière efficace que grâce à ses mitochondries, et les mitochondries semblent s'être fort bien accommodées de leur prison.

Le livre de Marc-André Selosse nous parle des symbioses. Il en dresse un panorama très vaste, qu'il s'agisse des lichens, des mycorhizes (des associations entre des champignons et des arbres ou arbustes) qui entourent les racines des plantes, des nodosités fixatrices d'azote, des algues intracellulaires qui nourrissent les coraux, ou encore des plasmides qui confèrent d'étonnantes propriétés aux bactéries. Il insiste moins sur d'autres types de symbioses comme le transport du pollen par les insectes. Principalement destiné, par son niveau et sa précision, à des étudiants en biologie, cet ouvrage est écrit dans un style clair qui le rend tout de même abordable à des lecteurs moins avertis.

Ce qui ne gâte rien, il est remarquablement à jour. Comme l'indique le sous-titre «Structures et fonctions. Rôle écologique et évolutif», il dépasse largement les aspects descriptifs des associations symbiotiques pour exposer leur mode de fonctionnement, expliquer en quoi consistent les «bénéfices réciproques», montrer comment la sélection naturelle opère sur les êtres doubles ou multiples, et surtout quel rôle la symbiose a joué dans l'évolution. La présentation du livre est quelquefois un peu déroutante (il y a 38 encadrés qui occupent presque le tiers de l'ouvrage), mais cette remarque est mineure.

Jusqu'à ce jour, le public français n'avait à sa disposition sur la symbiose dans son ensemble que des ouvrages en langue anglaise, comme *Symbiotic Interactions* d'A. Douglas et *The biology of Symbiosis* de D. Smith et A. Douglas. Le livre de Marc-André Selosse comble cette lacune.

Claude COMBES,
Laboratoire de biologie animale (CNRS,
Université de Perpignan).

Exploration

Chercheurs de météorites

Françoise et Michel Franco.
Cherche-Midi éditeur, 2001 (238 pages,
120 francs).

Chercheurs de météorites est un véritable roman d'aventures dans lequel les auteurs, Françoise et Michel Franco, nous montrent combien la quête de ces objets extraterrestres reste difficile. Un jour, par exemple, dans une zone du désert où il ne pleut, paraît-il, qu'une fois tous les 15 ans, ils sont restés bloqués plusieurs jours par la pluie, sans tente, ni couverture... Au-delà des anecdotes des expéditions, les auteurs décrivent avec précision leur technique de prospection. Ils roulent très lentement avec leur 4 x 4 archaïque, et scrutent les paléosols par la fenêtre, ou carrément sur le toit, pour repérer «LA» pierre qui dépasse dans l'océan minéral. Ils prospectent aussi avec des aimants (prélevés sur des placards de cuisine), qui représentent pour le chasseur de météorites, ce que le stylo est pour l'écrivain.

Il tombe environ 100 000 tonnes de météorites chaque année. Malheureusement, 90 pour cent d'entre elles ne seront jamais découvertes, car leur masse



Cette plante (pois) nourrit des bactéries, qui s'abritent dans ses racines (dans les nodosités). En échange, les bactéries convertissent l'azote atmosphérique en une forme utilisable par la plante.

Technologie

Les Nouveaux Frankenstein. Quand la science nous trahit

Harry Collins et Trevor Pinch.
Éditions Flammarion, 2001
(224 pages, 139 francs).

Ce livre, écrit par deux universitaires, explore les dessous de la technologie. Il met en lumière, à l'aide de huit affaires bien choisies, les controverses auxquelles donnent lieu les nouveautés techniques et, à travers les échecs de ces dernières, il analyse leurs performances. Il illustre la prudence dont il faudrait faire preuve lorsque l'on fait appel à la compétence des experts. Cet ouvrage nous incite à garder un regard critique. Bien que toutes les affaires relatives se soient déroulées dans un environnement anglo-saxon, les analyses développées dans cet ouvrage sont généralisables à d'autres cultures.

Parmi les affaires, l'explosion de la navette spatiale *Challenger* lors de son lancement en 1986 pose la question de l'évaluation des risques inhérents à toute aventure technologique de cette envergure. Un paramètre inattendu ou sous-estimé (l'action du froid sur les joints plastiques toriques des boosters) a ainsi transformé un lancement en catastrophe. Cet exemple est typique de la «régression expérimentale», c'est-à-dire de la difficulté à concevoir des essais adaptés à ce que l'on veut mesurer. En effet : que mesurer ? Une telle tâche suppose que le concepteur possède la compétence pour tout évaluer ; or, cette compétence ne peut être jugée qu'à travers le résultat obtenu. C'est ce que l'on appelle aussi un cercle vicieux.

Autre sujet abordé : l'origine du pétrole est-elle biologique (théorie majoritairement admise) ou abiologique (théorie de Gold) ? Controverse passionnante, où l'on retrouve la difficulté à imaginer une expérience décisive, qui permettrait ici de prouver une théorie (et d'en invalider une autre). D'autres exemples de controverses virulentes, telles l'affaire de la mémoire de l'eau ou celle de la fusion froide, ne sont, quoi que l'on en dise, pas encore réglées, car on manque d'expériences définitivement concluantes.

Les sciences économiques sont un autre domaine rêvé où modèle mathématique et réalité, argument et preuve, erreur et certitude, avis d'experts et décision politique se télescopent joyeusement. Les responsables politiques, à qui incombe la responsabilité morale des décisions, sont fustigés, eux qui ont un



La météorite de Hraschina, découverte en Croatie en 1751, pèse 40 kilogrammes. Elle est de type sidérite (métallique).

Un seul pour mille est vraiment une météorite.

Depuis dix ans, le Maroc est devenu le paradis des chasseurs de météorites. Au Sud d'une ligne Ouarzazate-Errachidia, presque toute la population possède un aimant et sillonne le désert. À cette époque, quand j'y voyageais à la recherche de fossiles, Ahmed, un personnage hors du commun, était souvent mon guide. Un jour, en fin de soirée, alors que nous étions réunis pour boire le thé, un Berbère a déroulé un sac qui contenait une météorite métallique. C'était la première météorite trouvée dans le grand Sud marocain. Après quelques heures de palabres, je l'ai acquise et j'ai chargé Ahmed de vérifier s'il n'y en avait pas d'autres, par hasard, autour du lieu de la trouvaille. Trente kilogrammes furent retrouvés le mois suivant ! Ahmed est aussi au centre d'une belle découverte : en janvier 2001, il a eu la chance de posséder une magnifique météorite d'origine lunaire de 1 100 grammes. Un Américain l'a achetée avec plusieurs personnes, et cette fabuleuse pierre a été coupée en tranches. Cette histoire soulève la question du traitement des météorites. Oui, comme les auteurs le soutiennent, les météorites doivent être conservées avec soin, car, même si on en trouve beaucoup, elles ne poussent pas comme des champignons. Il faudra attendre des millénaires pour reconstituer les récoltes actuelles. Aussi, si l'aventure vous tente, dépêchez-vous et respectez ces pierres. N'oubliez pas que l'aventure se trouve parfois au coin de la rue : les bordures des champs, les moraines glaciaires peuvent cacher des «cailloux» extra-terrestres.

Alain CARION

est inférieure au gramme. Seules 500 météorites de plus de 200 grammes arrivent à la surface du globe. Comme les océans en recouvrent les trois cinquièmes et que les lieux désertiques sont vastes, on n'a guère retrouvé que 20 météorites par an en moyenne pendant les deux derniers siècles. Cependant, depuis quelques années, les trouvailles se sont multipliées dans l'Antarctique et dans les déserts. Les météorites n'y tombent pas en plus grand nombre qu'ailleurs, mais on peut les repérer plus facilement.

Près de 85 pour cent des météorites sont des chondrites ordinaires, constituées de petits grains de fer et de nickel noyés dans une matrice de silice, et de petites billes de silicate appelés chondres. Ces chondres n'existent plus dans les roches terrestres. Si l'on broie une chondrite et que l'on approche un aimant de la poudre obtenue, on obtient deux tas. Le premier n'est pas magnétisé : sa composition est très proche d'une périclase terrestre, qui compose la croûte de notre Terre. Le second est un mélange magnétique de fer et de nickel, comme le noyau de notre planète. Environ sept pour cent des météorites sont des sidérites, constituées de métal pur et parfois quelques silicates ou quelques sulfures, qui attirent également les aimants.

Si vous envisagez de partir «chasser» les météorites, servez-vous de cet ouvrage pour assimiler les notions de base : comment reconnaître les météorites classiques, par exemple. Outre l'attraction par l'aimant, la croûte de fusion est caractéristique de leur passage à travers l'atmosphère. Presque toutes les météorites pénètrent en effet dans la haute stratosphère à des vitesses de l'ordre de 20 kilomètres par seconde, et leur périphérie s'échauffe à des milliers de degrés. Cependant, comme le rappellent Françoise et Michel, un chercheur de météorites ne se satisfait rapidement plus des chondrites et va traquer les très rares achondrites. On a retrouvé 20 achondrites d'origine lunaire et 20 autres qui proviendraient de la planète Mars, mais, sans échantillons de référence, on ne peut pas l'affirmer avec certitude.

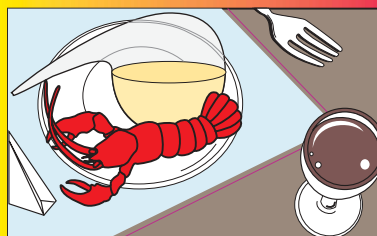
Cet ouvrage est presque un livre historique : la chasse aux météorites est devenue la ruée vers l'or de la fin de XX^e siècle et du début du XXI^e siècle. Michel et Françoise Franco furent des pionniers en Libye, voilà déjà 15 ans. En France, à cette époque, nous étions quatre ou cinq à «chasser» les météorites, mais actuellement, dans ma galerie de l'île Saint-Louis, 15 à 20 personnes passent chaque semaine pour me demander d'expertiser des échantillons.

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 24 mai 2001.



peu trop tendance, lorsque les choses tournent mal, à se défaire sur les scientifiques et sur l'expertise desquels ils s'appuient. Ce chapitre, où certains passages frisent l'ironie ou le comique, est un assez bel exemple d'humour anglais, et certains comportements des politiques épinglés ici ne sont pas sans rappeler les affaires du sang contaminé ou de l'encéphalite spongiforme bovine.

Au-delà des difficultés inhérentes à la technologie, des relations alambiquées entre science et politique, cet ouvrage replace les citoyens au cœur des débats. Par exemple, l'affaire de la contamination radioactive des moutons anglais au moment de l'accident de Tchernobyl montre que les doutes des éleveurs (des profanes en matière nucléaire) envers les méthodes des scientifiques entraînent leur méfiance vis-à-vis de la version officielle. La sagacité des profanes permet à cette occasion d'exhumer une affaire de contamination radioactive qui s'était produite presque trente ans auparavant dans une centrale nucléaire de la région (Sellafield) et qui avait été totalement étouffée par le pouvoir politique. De telles censures sont dangereuses et risquent d'engendrer un divorce entre la population, les scientifiques et les politiques, voire une déstabilisation des institutions politiques elles-mêmes.

Enfin, le livre développe l'histoire du SIDA aux États-Unis, qui constitue une leçon de sociologie appliquée. La complexification croissante du monde, des relations sociales et l'autonomisation croissante des acteurs sociaux, est capable de faire voler en éclats bon nombre de rigidités qui s'opposent aux découvertes scientifiques et au progrès. Cette histoire illustre bien que le moteur des nombreuses innovations radicales réside dans la capacité de certains à prendre des risques, à essayer des solutions que personne n'avait jamais osé mettre en œuvre auparavant. Il souligne aussi combien les compétences acquises par des profanes ou des novices, qui y trouvent en général un intérêt (personnel ou de groupe), sont importantes. Cela corrobore l'observation que les innovations majeures sont les plus nombreuses en période de crise économique. D'où la pertinence de cette remarque : «La science n'est pas uniquement réservée aux scientifiques.»

En définitive, un bon livre, à dévorer comme un roman, destiné à ceux qui rejettent la dictature de la pensée prête à l'emploi telle qu'elle nous est trop souvent délivrée par les experts de tout poil ; un petit ouvrage qui n'a d'autre prétention que de nous faire réfléchir pour nous apprendre à marcher et à penser... hors des sentiers battus.

Elio FLESIA, Centre de recherche
rétrospective de Marseille

Muséologie

La muséologie des sciences et ses publics : regards croisés sur la Grande Galerie de l'évolution du Muséum national d'histoire naturelle

Jacqueline Eidelman et Michel Van Praët,
Presses universitaires de France,
1999 (352 pages, 149 francs).

Après cinq années de fonctionnement, l'équipe qui a mené à bien la refondation de la Grande Galerie de l'évolution au Muséum national d'histoire naturelle fait le point, sans fard ni complaisance, mais avec rigueur et enthousiasme, sur l'aventure qui a permis le réveil de la «Belle endormie» qu'était devenue la galerie de zoologie du Muséum. Depuis quelques années, les musées ont délibérément mis le visiteur au centre de leurs préoccupations, et les études menées depuis le début du projet de rénovation de la Grande Galerie ont visé à analyser et à comprendre les comportements des publics, pour orienter les nouvelles présentations vers une plus grande accessibilité.

L'état des lieux que nous livre l'ouvrage dirigé par Michel Van Praët et Jacqueline Eidelman, occupe un terrain bien plus large que les seules limites du Jardin des plantes. Les courants de la muséologie d'aujourd'hui – notamment de la muséologie scientifique, pionnière en la matière – y sont rappelés en détail. Leurs conclusions vont à présent permettre à tous les concepteurs et responsables de musées de mieux adapter leurs présentations aux publics, anciens et nouveaux.

Pendant ces mêmes années, avec un léger décalage dans le temps, le Musée des arts et métiers préparait sa propre rénovation, avec un œil curieux et attentif tourné vers les équipes du Muséum, nanties d'une expérience pratique bien plus conséquente. Dès 1990, le Musée des arts et métiers s'est également engagé dans l'évaluation de ses publics et dans des tests des futures présentations. Cette démarche a démarré avec l'exposition *De la machine de Pascal à l'ordinateur, 350 ans d'informatique* (1990), et s'est poursuivie par une étude sur les représentations des publics menée selon un méthode



VINCENT LAURENT / AGF

Cinq ans après la réouverture de la Grande Galerie de l'évolution, les refondateurs du Muséum nous font partager leur réflexion sur la muséologie.

originale : munis d'un polaroid, les visiteurs photographiaient dans le musée ce qui les avait marqués. Cette étude a notamment montré que l'ancien nom de «Musée des arts et métiers» était beaucoup plus fidèle à l'esprit du lieu que celui de «Musée national des techniques». Comme on le voit dans cet ouvrage, aucun terme n'est innocent dans la dénomination d'un tel lieu. Les textes présentés aux visiteurs font d'ailleurs l'objet d'un travail de fond pour critiquer et peaufiner chaque mot. Enfin, deux évaluations sur les expositions *L'Homme machine* (1994) et *La Mécanique au temps des automates* (au Palais de la découverte, 1998) ont permis de tester plusieurs dispositifs muséographiques aujourd'hui mis en œuvre, tel le «théâtre des automates», où un animateur présente les automates en fonctionnement au public, rassemblé dans un petit théâtre.

L'une des conclusions des études rassemblées dans cet ouvrage est la part des publics familiaux. On a longtemps limité les études des publics au dénombrement des visiteurs, en termes d'âges et de catégories socio-professionnelles. On voit très clairement ici l'importance sociale et éducative du musée dans le cadre de la sphère familiale, en tant que médiation entre adultes et jeunes, et non seulement entre objets et visiteurs. Au Musée des arts et métiers, le public, assis sur de confortables banquettes de cuir, peut consulter des albums interactifs, qui jouent un rôle essentiel de transmission entre générations, et cela dans les deux sens.

Si la nécessité d'un travail d'équipe apparaît clairement dans le livre, il subsiste un aspect caché : le travail obscur, parfois solitaire et réalisé dans l'urgence, du concepteur – muséologue, conservateur, auteur... – qui le conduit à des sélections souvent douloureuses pour mettre en avant tel thème, tel objet, tel

personnage, et donc pour reléguer dans les réserves tel autre, qu'il sait pourtant, par certains côtés, aussi important. La réalisation d'un musée est une suite de choix, dans lesquels interviennent les études de publics, mais aussi les contraintes matérielles des maîtres d'œuvre, ainsi que les attentes des anciens amoureux du musée ; ceux-ci ne verront souvent que les trois objets qui leur manquent, quand trois cents autres seront revenus sur le devant de la scène.

Bruno JACOMY,
Musée des arts et métiers.

Histoire des sciences

Une histoire de la physique, sans les équations

Jean-Pierre Maury. Éditions Vuibert, 2000 (230 pages, 199 francs).

L'histoire des sciences est une auberge espagnole. Il y a d'abord une histoire des sciences tatillonne, discipline universitaire dont la beauté est presque réservée à l'élite qui la pratique, et qui ne conviendra jamais au grand public. Cette recherche de vérité et de connaissance est indispensable, car elle constitue le socle sur lequel se bâtit une histoire des sciences plus aimable, l'histoire des sciences pour tous, celle qui, même quand elle n'est pas hagiographique, se fait racoleuse, ne cessant de vouloir émerveiller ceux à qui elle parle. Elle n'est pas nécessairement fausse, imprécise, et a parfois su attirer les jeunes vers les sciences.

Il y a quelques années, après son histoire des trois premières minutes de l'Univers, le physicien Steven Weinberg avait livré une remarquable histoire de la physique (*Les particules subatomiques*, Éditions Pour la Science), un grand beau livre illustré, dont les annexes livraient les rudiments formels des résultats présentés. Le livre de Jean-Pierre Maury est dans cette veine, bien qu'il se réduise à du texte (l'ouvrage comporte seulement quelques portraits de savants).

Le titre mentionne l'absence d'équations, mais ce n'est pas la principale qualité du livre, et ce n'était pas, semblerait-il, la principale difficulté de l'exercice. Michael Faraday, par exemple, a beaucoup contribué à l'exploration de l'électromagnétisme,

alors qu'il n'avait que des rudiments mathématiques, et de bons physiciens modernes, à la suite de Richard Feynmann, se sont fait une spécialité d'expliquer la physique «avec les mains», sans équation.

Non, l'une des difficultés était de conserver une impartialité nationaliste qui ne fasse pas paraître trop «française» la physique jusqu'au XX^e siècle, qui sache admirer les savants anglais même quand leurs travaux ont concurrencé ceux des savants français et qui sache aussi admirer les savants allemands. L'exercice était épineux, car bien des auteurs ont attribué les mérites des découvertes aux auteurs qu'ils connaissaient le mieux, ceux dont les noms ont été donnés aux rues, ceux dont les bustes peuplent les squares. Ici, le texte est objectif : la même admiration se porte sur tous ceux qui, géants ou nains juchés sur les épaules des géants, ont contribué à construire cette discipline qu'est la physique.

Le contenu de l'ouvrage ne surprendra pas (il ne le pouvait pas) ceux qui ont suivi des cours de physique, même élémentaire : l'auteur file et tisse une histoire de la thermodynamique, une histoire de l'électricité, une histoire du magnétisme, une histoire de l'optique... Toutefois, même les physiciens avertis apprécieront ce livre, notamment parce que, grâce à sa bonne maîtrise de la physique, J.-P. Maury a évité une difficulté qui n'épargne que rarement les historiens insuffisamment formés à la science : il est très rarement obscur. Écrit dans une langue vive et claire, son texte contient juste assez d'anecdotes pour enthousiasmer des jeunes (et des moins jeunes), sans tomber dans une histoire anecdotique de la science. Les faits sont donnés, les courants sont brossés, les grandes idées sont présentées. Bien sûr, l'auteur se laisse aller à un peu d'«épithétisme», et l'adverbe fleurit dans ses phrases, mais après tout, si les oranges sont belles et bon marché, pourquoi ne pas le dire ?

Des mots, élevons-nous rapidement aux concepts. Là encore, l'auteur mérite des éloges, car il ne s'est pas limité à la description des seules avancées : malgré la brièveté du document, il présente souvent les hypothèses concurrentes, avec lesquelles les physiciens ont cherché à expliquer leurs observations. On a souvent dit que l'histoire des sciences devrait être une introduction à la science elle-même. Jamais cela n'a été aussi vrai. Avoir ce livre pour manuel : quel rêve, pour un étudiant ! Il lui restera alors à se plonger dans des traités, dont on espère qu'ils sauront ne pas éteindre un enthousiasme si bien éveillé.

Hervé THIS

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
www.pourlascience.com
Commande de dossiers ou de magazines :
01-55-42-84-05

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Françoise Cinotti (Rédactrice en chef), Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulennec, François Savatier, Laurence Plévert, Marie-Neige Cordonnier, Xavier Muller (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot, Céline Lapert, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Flo-ryse Grimaud, assistée de Isabelle Huet. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Conseiller scientifique : Hervé This.

Ont également collaboré à ce numéro : Pierre Cartier, Stéphane Cordier, Bettina Debû, Paul Decaix, Marie-Pierre Douin, Charlotte Guénard, Élodie Hardouin, Louis d'Hendecourt, Évelyne Host-Platret, Ivan Ineich, Marie-Thérèse Landousy, Fabien Malbet, Joël Martin (Pour le n° 282), Claude Olivier, Christophe Pichon, Didier Trotier.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Griesebach. President and Chief Executive Officer : Gretchen Teichgraber. Vice-President : Chuck McCullagh and Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté d'Irène Limon
8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97
Télécopieur : 01 43 25 18 29
Étranger : 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Anne-Claire Temois : 01 55 42 84 04

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Christophe Vitiello : 01 55 42 84 81.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE

POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oides - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit

Histoire naturelle

Nature vive

Muséum national d'histoire naturelle et Éditions Nathan, 2000
(136 pages, 135 francs).

La couverture intrigue : un morceau de bois ressemble à un homme exalté et en marche. Le titre surprend : «Nature vive». Est-ce l'antithèse de «nature morte» ou la prière, le souhait, l'injonction pour que la Nature vive ?

Eveiller la curiosité, c'est déjà enclencher la réflexion, ce qui est le propos du livre. Les rapports entre l'homme et la nature sont émotionnels : tour à tour l'hostilité, la peur, l'amour-passion, la nostalgie, mais jamais l'indifférence. La nature dispense des ressources inépuisables, ou bien elle est massacrée, pillée, souillée, en danger.

On l'a compris, les interrogations sont multiples, de la recherche du paradis perdu, le regret d'une sauvagerie originelle, jusqu'à la nature aménagée ou magnifiée. Cet ouvrage collectif, dont les auteurs sont professeurs ou chercheurs au Muséum national d'histoire naturelle entre autres lieux, est l'occasion d'une lecture-promenade, au parcours apparemment désordonné et dont la logique apparaît au fil des pages, comme un paysage se découvre.

Parfois une interrogation s'impose. Pourquoi les hommes préhistoriques, immergés dans la nature, ne l'ont-ils jamais représentée ? L'art rupestre ou pariétal abonde en représentations animalières fidèles, mais cette faune flotte dans un espace imaginaire. Vivre dans une nature bien réelle et construire une culture qui s'en affranchit, voilà une question qui ne quitte plus celui qui la rencontre.

Selon le philosophe britannique Francis Bacon (1561-1626) et selon René Descartes (1596-1650), la nature était l'œuvre de Dieu, mais les hommes ont cherché à la maîtriser et à l'asservir par les sciences et par les techniques. C'est, pour le premier, une façon de retrouver la plénitude des origines, et pour le second une façon d'échapper à la malédiction divine.

Lorsque l'aspect religieux disparaît, seule demeure la supériorité des tech-

niques, et c'est l'exploitation de la nature jusqu'au mépris. Lorsque l'erreur devient flagrante et que les ressources naturelles s'épuisent, une gestion plus raisonnable s'impose. Le naturaliste suédois Carl von Linné (1707-1778) avait déjà réfléchi à l'«équilibre de la nature» et compris toute l'importance des relations entre les espèces. Certes, pour lui, l'équilibre était d'ordre divin, mais sa réflexion était très «écologique», prônant la biodiversité avant l'heure. En revanche, la révolution industrielle brouilla les idées d'Auguste Comte (1798-1857), puisqu'il proposa d'«éliminer systématiquement toutes les espèces animales et végétales n'ayant pas d'utilité pour les hommes». Il y a eu du progrès : malgré les désaccords entre les participants de la Conférence de Rio, tous auraient été révoltés !

L'art des jardins a été aménagé, redessiné, esthétisé la nature : André Le Nôtre (1613-1700) la met en ordre, comme un architecte, les Anglais privilégient le plaisir des sens. Aujourd'hui la nature devient un parcours initiatique, un spectacle, de l'art *in situ*. En 1960, naît le mouvement de l'«Earth art» (l'Art de la Terre) : l'artiste Michael Heizer utilise les vastes espaces pour présenter des œuvres monumentales construites et s'empare du Nevada, et Christo transfigure des falaises, des collines ou des îles, en les emballant ou en les drapant. Plus récent, le «Land Art» (l'Art du pays) se veut plus discret : les œuvres sont éphémères et bricolées sur place, avec des pierres et du bois. C'est le retour au «beau naturel».

L'opus n'est pas un catalogue, mais il enrichit et prolonge une exposition qui se tient à la Grande Galerie de l'Évolution du Muséum de Paris, jusqu'au 17 septembre 2001 : cette habitude éditoriale du Muséum est toujours une réussite.

Michèle FEBVRE

