

■ POUR LA
SCIENCE

Février 1996

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

**LE THÉORÈME DE
FERMAT DÉMONTRÉ**

LA MUCOVISCIDOSE

LA CONSCIENCE

LES MONSTRES

LA TOUR DE PISE

**SÉISMES
ET RAZ DE MARÉE**

**CONFIDENTIALITÉ
SUR RÉSEAU**

**ALLAITEMENT
ET IMMUNITÉ**

M 2687 - 220 - 38,00 F



Canada : \$ 8,75

Bloc-notes de Didier Nordon 5

Point de vue 6

Plastique et environnement
par Pierre Avenas

Tribune des lecteurs 7

Les impossibles en chimie 8

par Pierre Laszlo



Présence de l'histoire 12

Biot et l'origine des météorites
par Marcel Weyant

Science et gastronomie 16

Fibres et confitures

Jeu-concours 32

Tour contre Cavalier

Perspectives scientifiques :

Un reptile dans une souris 20

Vaccin plus stable contre la polio 21

La combustion apprivoisée 22

Le laçage élucidé 23

Un problème de cou 24

La porte de l'antimonde 25

Syphilis en Europe 26

Un crapaud envahisseur 28

Molécule de sommeil 29

Microscopie et chimie 30

L'origine des rayons cosmiques 32

La myrrhe 33

Réformes de l'orthographe 34

Chémokines 35

HIPPARCOS : premiers résultats 36



Visions mathématiques 100

Partage de butin

par Ian Stewart



L'expérience du mois 106

Respirations

par Shawn Carlson

L'image du mois 108

Craquelures tectoniques



Analyses de livres 110

– *Connaître les arbres*, de Bernard Fischesser.

– *Paléoécologie. Paysages et environnements disparus*, de Jean-Claude Gall.

L'imaginaire monstrueux 38

par Jean-Louis Fischer

Pendant plusieurs millénaires, l'homme a imaginé que des êtres monstrueux vivaient dans des contrées reculées. Nés de l'imagination, ces monstres exerçaient à la fois l'attraction et la crainte.



L'allaitement maternel protège le nourrisson 46

par Jack Newman

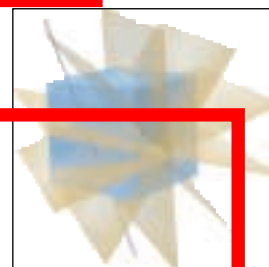
Certaines molécules et cellules du lait humain protègent les nourrissons contre les infections.



La confidentialité des communications 52

par Thomas Beth

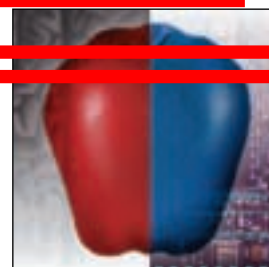
Un nouveau protocole cryptographique utilisant des « passeports numériques » assure la sécurité des réseaux informatiques en permettant l'authentification des correspondants.



Qu'est-ce que la conscience? 58

par David Chalmers

Neurobiologistes et philosophes explorent un grand mystère. La connaissance des mécanismes physiques du cerveau semble insuffisante pour comprendre la nature de la conscience.

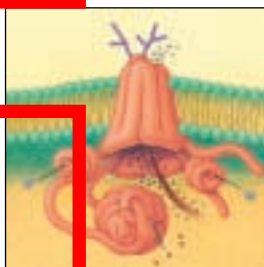


La mucoviscidose

66

par Michael Welsh
et Alan Smith

Cette maladie mortelle est due à une anomalie génétique, dont une des conséquences est la production de sécrétions très visqueuses qui obstruent les voies respiratoires.

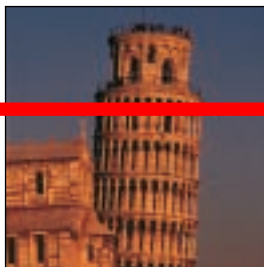


Le redressement de la tour de Pise

76

par Paolo Heiniger

Depuis le XII^e siècle, la tour de Pise s'incline dangereusement. Les techniques modernes d'ingénierie civile la sauveront-elles ?



Les tremblements de terre géants du Pacifique Nord-Est

84

par Roy Hyndman

La côte Ouest des États-Unis, entre la Californie et la Colombie britannique, risque d'être frappée par un séisme violent.

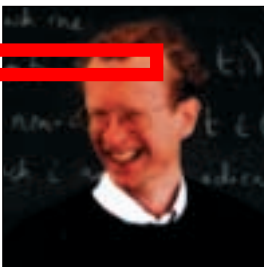


Fermat enfin démontré

92

par Yves Hellegouarch

La démonstration du théorème de Fermat par Andrew Wiles s'appuie sur un faisceau de méthodes mathématiques, qui bouleverse le paysage de la théorie des nombres.



ÉDITORIAL

Homo monstrosus

Quand la planète n'était pas entièrement explorée, quand les mécanismes de l'évolution et de l'hérédité étaient un total mystère, l'univers des possibles n'était limité que par l'imagination. Faible contrainte...

Aussi les variations de la morphologie humaine vantaient-elles les récits fabuleux. Avec des modes, la mythologie, fruit de l'imagination collective, avait ses rythmes et ses engouements. Les premiers chrétiens répudièrent les images de la mythologie antique, ses gorgones sifflantes, ses centaures hennissants, ses hydres gluantes, ses sirènes musiciennes, les minotaures rugissants et ses satyres vireux. Ils les remplacèrent par les chimères, les gargouilles, les dragons et les salamandres. Parallèlement, condisciples de nos frayeurs de la forêt et de la nuit, elfes, korrigans malicieux et fées diaphanes peuplaient la lande celtique ; les récits de voyages africains mêlaient observations étonnées, comptes rendus de légendes locales et exagérations débridées : l'amplification de la corne du rhinocéros transformait l'animal en licorne.

Quand les possibilités d'êtres extraordinaires terrestres actuels se sont estompées, la paléontologie a remeublé notre bestiaire : la faune des dinosaures s'est révélée plus riche et plus diversifiée que celle des dragons.

La biologie naissante (voir *L'imaginaire monstrueux*, par Jean-Louis Fischer, page 38) a commencé à démêler l'écheveau de la procréation, a cherché à interpréter les phénomènes humains, observés ou relatés, en termes de volonté biologique divine. À la table du mal, pêcheurs, monstres humains et diables étaient invités. Les accidents monstrueux interrogeaient la vigilance divine : Dieu voulait-il ou permettait-il ces accidents ? Le monstre est à la fois production naturelle et signe du créateur.

Philippe BOULANGER

Par Didier Nordon

Lit de Procuste-mathématique

André Lichnerowicz, je crois, expliquait qu'une difficulté de sa vie de mathématicien, c'était de convaincre sa femme qu'il pouvait fort bien se trouver allongé sur son lit, les yeux fermés, tout en étant en train de travailler intensément. David Ruelle pratique le même exercice du divan créateur.

Cette curieuse façon de faire ne doit pas être exceptionnelle dans la profession. A preuve, le souvenir suivant, raconté par Michel Philippon. Pendant une grève au CNRS, Michel Philippon, alors conseiller scientifique, rend visite au Directeur du CNRS. Avisant un groupe de personnes errant par là, il demande : « Ils sont en grève ? » Réponse du Directeur : « Je n'ai jamais pu reconnaître un mathématicien qui travaille ! » (notes de la table ronde du 6 juin 1994, Laboratoire Musique et Informatique de Marseille).

Ainsi les mathématiciens sont-ils au droit de grève, puisqu'il n'est même pas « reconnu » par le Directeur du CNRS ! Comment faire alors pour leur garantir l'exercice de cette liberté fondamentale ? Je vois une solution. Certains grévistes pour rendre leur colère plus spectaculaire,

manifestent en brandissant leurs instruments de travail. Que les mathématiciens grévistes défilent donc dans la rue allongés sur leurs lits, à la romaine.

Diktat formaliste

Le formalisme effréné des années 1960, gendre du structuralisme, menait à de nombreuses contradictions. Qu'elles perdurent encore aujourd'hui, on trouve un professeur pour écrire que en mathématiques, « les résultats sont vrais ou faux indépendamment de leur sémantique » — ce qui signifie à peu près qu'ils peuvent n'avoir aucun sens et être vrais quand même : au fou ! Heureusement le structuralisme a reculé. Hélas, chassez le non-sens par la porte, il rentre par la fenêtre...

Lisez la dernière diapos des championnats d'orthographe organisés par Bernard Pivot. Vous y trouverez une accu-

mparens, de hardies zigourats, de moucharabiehs, de gypaètes barbus et autres cancoillottes parfumées. Ces mots n'étant là que pour leur difficulté, il est inutile de chercher le moindre intérêt à ce texte. Plus grave : il est même inutile de lui chercher le moindre

sens. Il n'en a aucun. Simplement, il peut être orthographié correctement ou non. Là encore, formalisme pur, même si qu'il l'absurde. Pourquoi les mathématiciens voient-ils en Bernard Pivot un défenseur de la langue française ? La vider ainsi de tout sens, c'est la massacrer.

La réputation des Marseillais

La réputation que les Marseillais ont d'exagérer est-elle justifiée ? Question complexe, qu'on ne peut pas résoudre sans recenser les données numériques. Car exagérer consiste aussi bien à augmenter un chiffre qu'à le diminuer. La même manifestation, par exemple, où un policier a vu à peine trois chats, un syndicaliste y a vu une marée humaine. Du policier et du syndicaliste, l'un au moins exagère. Et tous deux le font, cela ne les met pas d'accord, puisqu'ils ne vont pas dans le même sens.

Participation à la manifestation du 16 décembre 1995. Paris. Police : 56 000. Organisateur : 300 000. Si le nombre vérifié reste inconnu, cela n'empêche pas de déterminer le coefficient d'exagération corrélée du policier et du syndicaliste parisiens. Il est de 5,4 quand le syndicaliste parisien voit passer 5,4 adhérents, le policier parisien ne voit qu'un opposant.

Participation à la manifestation de ce même jour à Marseille. Police : 60 000. Organisateur : 120 000. Le coefficient d'exagération corrélée du policier et du syndicaliste marseillais est donc 2, quand un policier marseillais voit passer une personne, le syndicaliste en voit deux.

Ainsi la réputation des Marseillais n'est pas justifiée. Pourquoi, pour être précis, se fonde sur Paris, leur taux d'exagération rapporté à la norme n'est que de 2/5,4 soit à peine 0,37.

Méfions-nous de la facilité

Le gouvernement voulait supprimer la déduction de 20 % du revenu pour les salariés. Cela, bien sûr, dans un souci unique : simplifier. Simplifier, il ne s'agit que de cela ? C'est nous prendre pour plus sots que nous ne sommes. Que les scientifiques, au contraire, emploient leurs talents à compliquer les calculs nécessaires à établir l'impôt. Faisons confiance à leur esprit frondeur : le contribuable y trouverait son compte, au moins autant que le ministre...

Le sens de la mesure

Comment remédier au dramatique manque d'enseignants dans les universités ? Un professeur à la Sorbonne a trouvé une solution : augmenter de 50 pour cent le service des universitaires qui, durant les cinq dernières années, n'ont pas publié un minimum de deux cents pages dans des revues subventionnées par le CNRS (*Le Monde*, 10-11 décembre 1995).

Voilà un professeur qui aura au moins compris une chose dans sa vie : rien n'existe, que le quantitatif. Des pages, mon Dieu, des pages... Si prestigieux soit l'organisme qui les cautionne, il existe toutes sortes de pages. Des grandes et des petites, des pleines et des vides, des lisibles et des illisibles... Foin de ces considérations futiles ! Le seuil est à deux cents, parce que c'est à deux cents qu'il doit être. Cent cinquante pages intelligentes, et on vous inflige un surcroît d'enseignement ; deux cent cinquante pages ineptes, et on vous laisse tranquille. De quoi inciter les universitaires à travailler la qualité...

Cependant, répétons-le : le manque d'enseignants est dramatique. Même imparfaite, adoptons donc la suggestion, et imaginons-la entrée dans les faits. Pour éviter d'être condamnés à une fréquentation accrue des étudiants, les enseignants vont croquer tant et plus. Que deviendront alors les innombrables pages, conditionnées en paquets de deux cents, sorties de leurs doctes plumes ? Il serait criminel que ces merveilleuses idées s'accumulent sans que personne n'en tire profit. Il faut absolument que des gens se consacrent à les lire. Des gens, je veux dire : des universitaires, car eux seuls ont compétence pour venir à bout d'aussi laborieuses lectures. Mais la compétence ne suffit pas, il faut également du temps, beaucoup de temps. La mesure préconisée par notre professeur en Sorbonne doit donc être accompagnée d'une mesure la complétant : tout universitaire s'engageant à lire les publications de ses chers collègues bénéficiera d'une dispense totale d'enseignement.

Plastique et environnement

PIERRE AVENAS

On accuse les matières plastiques synthétiques d'être écologiquement moins performantes que les matériaux « naturels » tels que le bois. Est-ce justifié ? Ils n'ont pas une aussi bonne image que les métaux ou le verre, qui sont, pourtant, également artificiels ; est-ce raisonnable ? Les plastiques biodégradables, produits à partir des matières végétales, ont la faveur de ceux qui se sentent une solidarité pour la nature : sont-ils vraiment plus écologiques que les plastiques produits à partir du pétrole ?

Avec une consommation mondiale de plus de 100 millions de tonnes, le volume de plastiques produits est comparable à celui des aciers. Leur valeur d'usage remarquable (légereté, souplesse, résistance à la corrosion...) est à l'origine de leur développement. Initialement ces matériaux étaient fragiles, ou résistaient mal aux variations de température, de sorte qu'ils avaient une réputation de qualité médiocre ; pourtant cette qualité s'est tant améliorée que les fenêtres en polychlorure de vinyle sont vendues avec une garantie décennale, par exemple.

D'autre part, on a longtemps associé les matières plastiques au pétrole, et leur utilisation croissante à un gaspillage d'énergie. Il est vrai que la plupart des polymères synthétiques sont tirés du pétrole, avec des exceptions notables : pour 57 pour cent de son poids, le polychlorure de vinyle provient du chlorure de sodium, dont les océans sont une source inépuisable ; le polyamide 11 provient de l'huile de ricin, l'acétate de cellulose provient de la cellulose... Des recherches sur la fabrication des polymères à partir de biomasse se poursuivent, mais elles se heurtent le plus souvent à des impossibilités économiques : la nature produit bien des polymères, mais ceux-ci forment des mélanges dont il est difficile d'extraire des composés définis, aux propriétés contrôlées. En outre, le spectre de la pénurie de pétrole a reculé, et d'autres sources de carbone prendront le relais, aux siècles suivants : charbon, sables asphaltiques, schistes bitumineux... Enfin les polymères ne sont pas particulièrement responsables d'un gaspillage : quatre pour cent seulement du pétrole utilisé dans les pays européens

constituent la matière première des plastiques, contre 86 pour cent brûlés pour la génération d'énergie et pour les transports. Enfin tous les matériaux, et pas seulement les polymères, nécessitent de l'énergie pour leur élaboration, leur mise en forme et leur transport.

Examinons le problème d'une bouteille, en verre ou en matière plastique : pour le même poids de matériau, il faut plus d'énergie pour fabriquer du plastique que du verre, mais une bouteille en verre est bien plus lourde qu'une bouteille en plastique, de sorte que la quantité d'énergie consommée est supérieure. En outre, le transport de produit liquide en bouteille de verre conduit à transporter plus de 40 pour cent d'emballage et moins de 60 pour cent de produit ; avec des bouteilles en plastique, ces proportions sont moins de 10 pour cent d'emballage, et plus de 90 pour cent de produit.

Au total, le bilan énergétique complet de la bouteille en plastique est plus favorable que celui de la bouteille en verre (même en cas de réutilisation, qui ne se justifie que sur des distances inférieures à 300 kilomètres : le transport du retour coûte d'autant plus que le matériau est dense).

UNE SOLUTION POUR L'ENVIRONNEMENT

Le plastique est donc un espoir pour l'environnement : non seulement les allègements des véhicules et des emballages, mais aussi les matières plastiques, contribuent à réduire la consommation des ressources fossiles, mais, d'une façon générale, les matières plastiques ont un écobilan favorable. C'est dans le domaine de la gestion des déchets ménagers et industriels que les exigences à l'égard des plastiques ont été les plus pressantes, surtout depuis la fin des années 1980. On a reproché à ces matériaux des faits qui résultent, en réalité, de leur succès et de leurs qualités : si les plastiques se développent, il est normal que leur proportion dans les déchets augmente, même si celle-ci n'atteint que sept à huit pour cent (en poids) dans les déchets ménagers. Ce problème s'est aggravé pour les maté-

riaux de toutes les familles (aciers, papiers, verres...), de sorte que les pays ont pris des mesures afin de réduire les déchets et d'obliger les acteurs économiques à valoriser leurs déchets. Les plastiques se prêtent bien à de telles valorisations : on refond les déchets de plastique afin de fabriquer des objets par extrusion ou injection, des traitements de craquelage redonnent des produits assimilables à des coupes pétrolières, la dépolymérisation redonne parfois les monomères initiaux, et la combustion des plastiques, dans des incinérateurs propres, fournit de l'énergie (c'est la voie favorisée dans les pays les plus avancés dans ce domaine).

Ainsi, en France comme dans de nombreux pays, l'incinération propre des déchets ménagers contribue largement au chauffage urbain des grandes villes. La moitié environ de l'énergie produite par la combustion de ces déchets est apportée par les matières plastiques qu'ils contiennent. Ces diverses solutions permettent d'envisager une valorisation de plus en plus complète des matières plastiques usées. La valorisation énergétique est une des voies les plus rationnelles, car elle permet d'utiliser la même quantité de pétrole plusieurs fois : une fois en tant que matière plastique et une fois en tant que source d'énergie, alors que le reste du pétrole est généralement brûlé directement, surtout pour le chauffage et les transports.

Le raisonnement précédent est parfois critiqué par des personnes qui préconisent d'utiliser des polymères biodégradables. Cette question appelle plusieurs réponses, fondées sur une observation : toute biodégradation nécessite la présence d'eau, et tout matériau biodégradable doit donc être perméable à l'eau. Or les plastiques sont souvent préférés au papier ou au carton, qui sont biodégradables, précisément parce qu'ils résistent à l'eau et à l'humidité et, plus généralement, parce qu'ils sont impu-tréscibles. D'autre part, des produits normalement biodégradables peuvent ne pas se dégrader lorsqu'ils sont enfouis sous plusieurs mètres de déchets (on lit encore un journal vieux de 40 ans). En troisième lieu, pour les trois voies de valorisation des déchets plastiques (matériau, chimie, énergie), la biodégradabilité n'apporte rien ; au contraire, elle est gênante pour le recyclage de tout matériau. Il ne paraît donc pas rationnel de développer des matières plastiques biodégradables.

Pierre Avenas est directeur de la recherche et du développement d'Elf Atochem et président du Syndicat des producteurs de matières plastiques.

Le tabac et le chou

La campagne publicitaire en faveur du tabagisme fait décidément parler d'elle (voir *Tribune des lecteurs*, *Pour la Science*, novembre 1995)! Le message publicitaire est construit comme une bonne blague et énumère le nombre de mots pour le théorème de Pythagore (24), le principe d'Archimède (6), les *Dix commandements* (179), la *Déclaration américaine d'indépendance* (200), et... la récente législation en Europe...

M. Federspiel a vérifié la comptabilité des mots. Il retrouve la langue dans laquelle le théorème de Pythagore ne fait que 24 mots (en grec), mais cherche en vain d'autres concordances : le principe d'Archimède n'est pas énoncé comme tel dans l'Antiquité. Ce qui l'amène à traiter les publicitaires de négligents...

J'irais plus loin : dans ce cas précis, les publicitaires ne sont pas négligents, mais carrément plagiaires. Heureusement, ils ont plagié une « chose » sans copyright : une rumeur. Leur annonce commerciale reprend exactement la forme d'une rumeur qui circule... au moins depuis les années 1950.

Un chercheur de Harvard l'a repérée aux États-Unis et en Grande-Bretagne entre 1951 et 1954, à propos du nombre de mots d'une supposée législation sur le chou(!) Que dit ce « canular du chou »? Comme le « canular du tabac », il reprend le nombre de mots des *Dix commandements* (297), le *Bill of Rights*, la charte et les droits civils américains (463), le discours de Lincoln à Gettysburg (266)... et « la directive fédérale sur le prix des médicaments : 26 911 mots ». Troublante ressemblance avec notre annonce pro-tabagisme, non?

C'est cette campagne contre la bureaucratie américaine qui est à l'origine de l'annonce publicitaire. Le voyage transatlantique ne semble pas avoir été trop dur, encore que la *Déclaration américaine d'indépendance* aurait pu être remplacée par celle de la *Déclaration universelle des droits de l'homme* de 1789...

Pourquoi les publicitaires de 1995 reprennent-ils un message plus vieux qu'eux de 40 ans? Le « canular du chou » et le « canular du tabac » ont le même ennemi : la mainmise des politiciens sur la vie quotidienne. L'utilisation d'une suite logique de nombres, celle de la Bible, celle des sciences occultes, celle du nombre d'or, alimentent tous une peur de l'effroi devant l'implacabilité du destin (« je ne suis rien face à l'État »), l'épouvante devant un ennemi dont on n'arrive même pas à imaginer la taille (puisqu'il est partout), l'épouvante à l'idée qu'un geste aussi personnel que « griller une

blonde » ou se tomber sous le coup d'une interdiction sociale. D'où le sentiment de révolte, l'appel à la sédition, et l'autopersuasion du rumeur que son acte de plaisir est une évocation politique. On se croirait dans une tragédie antique : le héros contre les Dieux, le héros contre son destin.

Un manufacturier américain essaie d'établir un lien politique entre l'acte personnel de fumer et une décision administrative de limiter les lieux : il utilise une vieille rumeur de derrière les fagots. Son efficacité est connue, et, en plus, elle est ancienne. Mais personne n'est dupe : le but est avant tout politique, et il ne suffit pas toujours d'avoir de bons mots pour gagner une cause.

P. S. Mon articlelet contient 550 mots...

Dépenses de santé

Dans l'article *La juste évaluation des dépenses de santé* (*Pour la Science*, décembre 1995), des arguments sociologiques, économiques, statistiques, médicaux, éthiques et soi-disant éthiques sont exposés pour justifier l'évaluation des dépenses de santé et, par voie de conséquence, leur maîtrise, leur contrôle. L'omission d'une raison essentielle du fameux « trou de la sécu », le chômage, me fait penser à un médecin qui, pour traiter une personne ayant une angine de poitrine, prescrit des médicaments qui prescriraient que de l'aspirine contre la fièvre et la douleur, mais pas de pénicilline contre la cause de la maladie, la bactérie. Peut-être notre médecine n'a-t-elle pas trouvé le juste antibiotique au moindre coût, à moins que son client n'ait dépassé certaines limites, tel l'âge moyen d'espérance de vie, ou abusé des plaisirs de la vie. Le parti pris « libéral » est clair, même s'il est enrobé de bons sentiments.

L'enjeu n'est pas tant le parti pris que le libéralisme en sens de l'économie dite de marché. L'économie libérale n'est qu'un art, comme la médecine, même si elle se réclame de la science, de la mathématique, en usant et abusant de l'informatique. Toutefois, à la différence de la pratique médicale, l'économie ne se fonde que sur le mythe séculaire de l'ordre naturel. Pourtant la science nous a montré ces dernières années que la nature est à la fois ordre et désordre, excès et manque, jamais en parfait équilibre, comme l'intelligence, mais surtout l'angoisse, humaine le voudrait.

Ce qui pouvait être un idéal au siècle des lumières, mettre en équation les échanges de biens entre possédants et possédés, est malheureusement devenu un

dogme : l'éconocratie, pour reprendre le terme d'Édouard Morin. Il est éthiquement incorrect, pour masquer les erreurs des uns et les bénéfices des autres, une pseudoscience au nom de la société, critique la pratique médicale et ses praticiens et veuille à la destruction des biens de consommation.

La majorité des médecins ont conscience de l'impasse de leur pratique, des limites de leur connaissance et, surtout, de leur impuissance devant la mort.

À l'encontre de l'OMS, nous savons que la médecine ne peut pas grand-chose pour le bonheur de l'humanité, mais cette dernière confond santé et bien-être. Ils n'ont pas attendu les économistes pour participer à un programme de santé publique. Quel rôle pourrait jouer un médecin qui jouerait tous les jours au « juste prix »?

Docteur VULTAGGIO-LUCAS, Chinon

Réponse de Jean-Paul Moatti et Pierre Huard

Dans notre article, nous expliquons en quoi, depuis le milieu des années 1970, le ralentissement de la croissance économique (dont le chômage est en partie l'expression) est à l'origine des difficultés croissantes d'équilibrage des comptes de notre système d'assurance maladie. En outre, même dans l'hypothèse d'une croissance plus soutenue, le problème de la bonne utilisation des ressources dans notre système de santé continuerait de se poser. Toute utilisation inadéquate sacrifie en effet la possibilité de produire, avec les moyens disponibles, plus de santé (ou d'autres sources de bien-être) pour nos concitoyens.

Il est regrettable qu'une partie du corps médical et, comme on l'a vu dans une actualité récente des organisations syndicales), sincèrement attachée au maintien de l'équité sociale dans l'accès aux soins, continue de camper sur un refus de principe de toute analyse économique en matière sanitaire. Que ce refus soit habillé d'une critique radicale de la science économique, au prix d'un amalgame de celle-ci à ses versions les plus caricaturalement « néo-libérales », ne change rien au fond de l'affaire.

Avec la majorité des économistes de la santé au plan international, nous défendons l'idée qu'une régulation par le marché et par les assurances privées ne constitue pas la solution pour les systèmes de santé. Le calcul économique devient alors un moyen, non unique mais indispensable, d'éclairage des choix médicaux et sanitaires. Il est vrai qu'aller dans cette direction de plus grande transparence implique que les médecins partagent mieux la responsabilité de ces choix, non pas tant avec les économistes qu'avec le reste de la société, à commencer par leurs patients eux-mêmes.

Les impossibles en chimie

PIERRE LASZLO

La chimie est un art combinatoire assorti de règles. Dans leurs «figures libres», les chimistes synthétisent des molécules pour le plaisir de la difficulté vaincue ; dans leurs «figures imposées», ils fabriquent des molécules, déjà identifiées, pour l'industrie et la pharmacie. L'étrange est que des molécules faites pour l'amour de l'art aient des applications. Ainsi, les cristaux à symétrie d'ordre 5, considérés comme une merveille inutile, constituent des alliages antifriction.

Toute nouvelle molécule est un outil en quête d'applications, et il semble impossible d'inventer une molécule dont on puisse assurer qu'elle ne servira à rien : l'impossible majeur en chimie est de dire ce qui est impossible. Le chercheur est ainsi trait : le fruit défendu l'attire irrésistiblement.

La plupart de ce qui m'a été enseigné comme impossible au cours de mes études s'est révélé pratiquement réalisable. Semblables aux règles auxquelles s'astreignent écrivains et poètes, les impossibles incitent les chimistes aux transgressions. On m'avait appris que l'atome de carbone avait toujours quatre liaisons ; depuis, on a observé et créé des molécules fugaces mais bien réelles, où ce carbone est lié à cinq ou six autres atomes.

Un autre impossible de la chimie du carbone, apparaissant alors comme impossibilité de principe, concerne les hydrocarbures saturés, qu'on appelle aussi paraffines : on m'avait seriné qu'on ne pouvait faire réagir ces substances extrê-

mement stables. L'an dernier, le prix Nobel de chimie a été décerné à George Olah, qui a trouvé des milieux tellement acides que même ces molécules s'y transforment. Un autre dogme était l'absence de réactivité des gaz rares : on a synthétisé depuis des dizaines de composés des gaz rares. On les qualifiait d'inertes, alors que c'était notre imagination qui était inerte.

Un impossible de principe a été très bien énoncé dès sa première formulation par Louis Pasteur : c'est l'impossible de synthétiser un composé asymétrique en l'absence d'asymétrie.

L'IMPOSSIBLE SYNTHÈSE CHIRALE

Il existe deux catégories d'objets : ceux qui sont identiques à leur image dans un miroir et ceux qui en diffèrent.

Parmi les lettres majuscules, il y a des lettres qui ont un «sens» et des lettres qui n'en ont pas. Par exemple, le A majuscule est une lettre qui n'a pas de «sens» : elle est la même, qu'on la lise de gauche à droite ou de droite à gauche, tandis que S R E G sont toutes des lettres ayant un «sens». On distingue ainsi, parmi les majuscules de l'alphabet, celles ayant un «sens», les lettres chirales, et celles qui sont symétriques parce qu'elles se lisent indifféremment vers la gauche ou vers la droite. Les lettres symétriques sont identiques à leur image dans un miroir, celles qui ont un «sens» sont différentes. La même distinction est vraie dans l'espace à trois dimensions : ma main gauche, image de ma main droite dans un miroir, en diffère. Un tire-bouchon, un escalier en colimaçon, de nombreux coquillages, pratiquement toutes les molécules du vivant ont un sens et

appartiennent soit à une série gauche, comme la main gauche, soit à une série droite, comme la main droite. Les chimistes savent synthétiser ces molécules pour qu'elles soient toutes comme des mains gauches ou des mains droites. Toutefois, ils ne peuvent le faire en l'absence d'une source d'asymétrie, en l'absence d'un environnement où des objets, généralement des molécules, ont déjà un sens, soit de main gauche, soit de main droite.

Le physicien arrive à briser la symétrie pour faire un objet asymétrique à partir de forces qui sont symétriques. Une barre symétrique sur laquelle on appuie va flamber, c'est-à-dire qu'elle va s'incurver. On ne sait pas où le bombement va avoir lieu, mais on va créer une

asymétrie à partir de forces symétriques : une petite fluctuation amènera une asymétrie. On a créé ainsi une asymétrie à partir de la symétrie, mais sur un cas



À bel arbre, chimie somptueuse. On a isolé du tremble une dizaine de terpènes d'une classe nouvelle, formés par la nature, suivant un plan inédit lui aussi. Cet arbre est le théâtre d'une guerre chimique. Des moisissures de diverses espèces hostiles combattent au cœur du bois, qu'elles font pourrir. Parallèlement des champignons émettent des acides, benzoïque et salicylique, inhibant diverses enzymes de ces moisissures.

seulement l'or, en chimie, on met en jeu des populations de milliers de milliards de milliards d'objets. Si l'on peut observer une déviation par rapport à la production égale de formes gauches et droites, statistiquement, sur le nombre colossal de molécules créées, on observe toujours une population strictement identique (50-50) d'objets gauches et d'objets droits.

Cette impossibilité de principe s'est affaiblie depuis Pasteur, qui était convaincu que la synthèse asymétrique était impossible en l'absence du vivant. Nous avons su dépasser cet interdit avec des molécules asymétriques n'appartenant pas au vivant.

Un des très grands problèmes connexes non résolu est celui de l'origine de la vie, puisque la vie est asymétrique : comment la première asymétrie est-elle apparue ? Cette double question, origine de la vie, origine de l'asymétrie moléculaire, est ardue. Le rationaliste que je suis souhaite une réponse scientifique plutôt que métaphysique, ou de science-fiction. Il n'est pas sûr qu'on la trouve... Il est certain qu'on ne l'a pas encore trouvée.

LA PRÉPONDÉRANCE DE LA FORME GAUCHE

Hormis quelques exceptions, les sucres des substances naturelles appartiennent à la série droite, et nous ne savons pas quand et comment cette sélection s'est imposée. Il est tout à fait possible qu'une légère prépondérance de la forme gauche soit apparue à un certain endroit de la planète et que, pour des raisons contingentes, cette abondance plus grande ait entraîné petit à petit l'incorporation dans des formes plus élaborées ; la sélection darwinienne aidant, cette forme a expulsé l'autre. Mais cela reste une hypothèse, et des dizaines d'autres causes ont été invoquées.

Deux questions passionnent actuellement les chimistes : l'auto-assemblage et la reconnaissance moléculaire.

Comment les molécules individuelles se regroupent-elles pour s'auto-assembler en structures d'ordre supérieur dotées de propriétés que les molécules n'avaient pas à l'état individuel ? Examinons le cas des phospholipides, ces molécules en forme d'allumettes avec une tête polaire et une queue hydrocarbonée. Leur tête se met de préférence en contact avec l'eau et leur queue hydrocarbonée exclut l'eau : ces phospholipides s'assemblent et forment ainsi ce qu'on appelle des bicouches lipidiques, c'est-à-dire les constituants des membranes cellulaires. L'évolution biologique impose une séparation entre l'intérieur et l'extérieur de la

cellule, de manière à définir un milieu interne à la cellule. Nous imitons très bien ces processus ; les fabricants de cosmétiques utilisent de tels liposomes.

L'autre question est la reconnaissance moléculaire. Bien entendu, dans l'auto-assemblage, il y a déjà reconnaissance moléculaire, puisque l'auto-assemblage est la reconnaissance du même par le même. Mais la reconnaissance par complémentarité, où la clé est complémentaire de la serrure qu'elle ouvre, est autrement créative. De telles adaptations mutuelles de formes sont fréquentes dans le vivant : ainsi les enzymes agissent sur les seules molécules dont la forme épouse celle de leur site actif, complémentaire. Cette adaptation mutuelle clé-serrure s'est perfectionnée au cours des siècles, et elle a été réglée par l'évolution.

L'asymétrie du receleur joue un rôle primordial : sur un site actif, l'enzyme accepte la molécule gauche et refuse la molécule droite. Cette sélection est très importante en pharmacie, car il faut éviter de vendre des produits où 50 molécules sur 100 sont inactives, voire dangereuses.

LIMITES DE LA SYNTHÈSE CHIMIQUE

Le répertoire des outils de la chimie et des réactions est un ensemble suffisant : étant donné le plan d'une molécule, sa formule, on est capable de la construire. L'impossible est de synthétiser plus qu'une infime fraction du monde extraordinairement diversifié des possibles. L'octane a huit atomes de carbone, et il existe 2 028 conformations différentes de ces huit atomes. L'étude de ces 2 028 conformations est encore accessible, mais une molécule naturelle typique du monde vivant aura, par exemple, 18 carbones asymétriques et 262 144 stéréo-isomères aux propriétés différentes. Nous ne pouvons pas synthétiser ces 262 144 molécules afin de les comparer une à une à la substance naturelle et de déterminer quelle est la bonne !

Cette impossibilité de tout faire prouve par l'absurde l' inanité de toute gestion de la recherche par secteurs d'activité, lotis en lopins hyperspécialisés. Il importe au contraire d'encourager le nomadisme scientifique, qui assure les grandes percées. La logique de la découverte n'est pas dans l'immobilisme d'un découpage territorial ; la recherche vit dans le dynamisme d'un constant réaménagement des frontières, d'ailleurs arbitraires, posées entre les sous-disciplines.

Il est extrêmement tentant d'opposer la recherche universitaire, acadé-

mique et la recherche industrielle. Aujourd'hui, étant donné l'extrême sensibilité de très nombreux tests biologiques, les chimistes sont tentés de travailler à l'aveuglette : ils constituent des chimiothèques en synthétisant 10 000 molécules apparentées, ils les soumettent à des tests biologiques et repèrent ainsi une dizaine de molécules actives. Ces méthodes évacuent l'intelligence, l'imagination créatrice, et je suis très hostile à leur développement. En science, une idée, même simpliste, vaut beaucoup mieux que pas d'idée du tout. Il me semble impossible que l'on obtienne de très bons résultats par ce moyen. En outre, nous ne connaissons pas toutes les propriétés des 700 000 molécules synthétisées chaque année, et le danger de toxicité imprévue va grandissant avec cette technique des chimiothèques. Le risque de prolifération lié à la mise sur le marché pharmaceutique de molécules insuffisamment connues est réel.

Tout scientifique partage son temps entre le ludique et l'utile. Le paradoxe est que l'utilité sociale naît très souvent d'une recherche parfaitement désintéressée. Je crois assez peu à la recherche ciblée vers des objectifs appliqués.

Les chimistes ont voulu et su synthétiser des molécules en forme de solides platoniciens : le tétraèdre, le cube, l'octaèdre, l'icosaèdre et le dodécaèdre. Cette activité, à la fois gratuite et coûteuse, s'est révélée payante : la molécule de cubane, en forme de cube, est utile dans la lutte antivirale et pour fabriquer des explosifs.

Pourquoi la lutte antivirale ? Parce que les enzymes n'ont pas l'habitude d'interagir avec des cubes : aussi ceux-ci restent-ils actifs très longtemps dans l'organisme sans être détruits. Pourquoi des explosifs ? Parce que les six faces carrées du cube sont sous forte tension et ne demandent qu'à s'ouvrir en libérant une forte énergie. L'armée américaine a été vivement intéressée... et le Pentagone s'est saisi du cube. Je ne connais pas de molécules naturelles en forme de cube, mais nous n'avons encore exploré qu'une infime portion de la diversité naturelle.

Cet rapprochement de l'artifice et du naturel nous amène à un autre sujet : la distinction arbitraire et fictive entre molécule naturelle et molécule artificielle. La législation américaine protège certaines substances naturelles, en particulier la vanilline, qui est l'arôme au goût de vanille des glaces à la vanille : c'est l'arôme alimentaire le plus utilisé dans le monde entier. La substance naturelle coûte environ 50 000 dollars le kilogramme ; la substance de

synthèse environ 17 dollars le kilogramme. C'est dire les trafics pour faire passer la vanilline de synthèse comme vanilline naturelle. Pour réprimer la fraude, on analyse les impuretés isotopiques qui se trouvent dans la vanilline naturelle et dans la vanilline de synthèse. On détecte aussi, par les mêmes méthodes, la chantage, car le sucre du betterave a un enrichissement en deutérium différent du fructose présent dans le raisin. Le laboratoire de Maryvonne et Gérard Martin, à l'Université de Nantes, est spécialisé dans ce type d'identification.

CHIMIE MINÉRALE ET CHIMIE ORGANIQUE

La distinction est conventionnelle, un peu arbitraire, et peut être néfaste, car le front actif de la science chevauche les frontières entre les disciplines. Comme toute interface, celle de la chimie minérale et de la chimie organique est active et productive. Parmi les espèces chimiques qui sont à la fois des espèces organiques et des espèces minérales, il y a tous ces complexes organométalliques où un métal porte des groupements qui sont organiques. La plupart des catalyseurs dans les réacteurs industriels sont des complexes organométalliques.

Certains scientifiques cherchent, dans ce *no man's land* entre minéral et organique, les indices de l'origine de la vie... C'est une intuition que, sentimentalement, j'aurais tendance à partager, mais que, rationnellement, je ne peux pas justifier. Ici nous sommes en pleine science-fiction, voire métaphysique. Dans ce domaine de l'origine de la vie, je trouve que les auteurs, que mes collègues, sont terriblement dogmatiques, fonctionnant par exclusion mutuelle, avec des affirmations beaucoup trop tranchées et catégoriques. D'autre part, leurs écrits utilisent des procédés typiques des romanciers : dans Balzac et dans une publication traitant de l'origine de la vie, on trouve le même type de descriptions extrêmement minutieuses, avec la volonté de donner une impression d'exactitude, bien sûr, ornage en pleine fiction.

Ce très grand problème n'est pas propre à la chimie, mais c'est effectivement l'une des frontières actuelles de la chimie.

Pierre LASZLO est professeur de chimie à l'École polytechnique.

Une retranscription de ce débat, enregistré avec Émile Noël, sera diffusée sur France Culture le 7 février 1996, à 9 heures.

Biot et l'origine des météorites

MARCEL WEYANT

Le 6 floréal an 11 (le 26 avril 1803), une pluie de météorites est tombée en Normandie, à L'Aigle. Bien que depuis l'Antiquité, de nombreuses personnes aient été témoins de la chute de pierres tombant du ciel, l'idée d'une origine extraterrestre de certaines roches était encore reléguée, au début du XIX^e siècle, dans le domaine de la fable. La météorite de L'Aigle a joué un rôle décisif dans le lent cheminement de l'incrédulité vers l'agrément.

À la fin du XVIII^e siècle, par un rationalisme excessif, le monde savant refuse l'idée que des pierres puissent tomber du ciel. Un rapport d'experts dépêchés par l'Académie royale des sciences après la chute d'une météorite à Lucé, dans la Sarthe, en 1768, illustre cette incrédulité. La commission est composée de trois membres dont le chimiste Lavoisier. Ce dernier croit «pouvoir conclure [...] que la pierre [...] ne doit point son origine au tonnerre, qu'elle n'est point tombée du ciel [...]». L'opinion qui nous paraît la plus probable, celle qui cadre le mieux avec les principes reçus en physique, avec les faits rapportés par M. l'abbé Bachelay et avec nos propres expériences, c'est que cette pierre [...] aura été frappée par la foudre et qu'elle aura été ainsi mise en évidence [...]».

Il est alors de bon ton de railler ceux qui prétendent avoir observé des chutes de pierres venant du ciel. Le premier scientifique qui a le courage de braver les préjugés de ses confrères est le physicien allemand Ernst Chladni. En 1794, il postule l'existence de corps célestes de petite taille, susceptibles d'entrer en collision, et de libérer des fragments de roches et de fer qui peuvent atteindre la Terre sous l'effet de l'attraction gravitationnelle. Il se heurte à de nombreuses critiques. Neuf ans plus tard, la chute de la météorite de L'Aigle oblige les incrédules à admettre l'origine extraterrestre des météorites. Le compte rendu factuel que Jean-Baptiste Biot fait de l'événement y contribue notablement.

Biot (1774-1862) est professeur de physique au Collège de France et membre de l'Observatoire de Paris quand il part mener son enquête sur la

météorite de L'Aigle. Son rapport est un modèle d'honnêteté intellectuelle, fondée sur une enquête minutieuse sur le terrain.

LES PRÉPARATIFS

«Depuis que l'attention des savants s'est dirigée vers l'examen des classes minérales que l'on dit être tombées de l'atmosphère, toutes les ressources de la critique et de l'expérience ont été employées pour constater cet étonnant phénomène et jeter quelque lumière sur sa cause [...]. C'est un grand pas de fait dans l'étude de la nature, que de savoir examiner un phénomène dont on ne voit encore aucune explication complète, et cette sorte de courage n'appartient qu'aux hommes les plus éclairés [...]».

Toujours dans les questions douteuses, l'ignorant croit, le demi-savant décide, l'homme instruit examine : il n'a pas la témérité de poser des bornes à la puissance de la nature. Suivons donc avec zèle, et sans que rien nous arrête, le phénomène qui nous occupe maintenant : et s'il arrive en fin,

comme je l'espère, que nous réussissions à le mettre hors de doute, n'oublions pas que c'est l'envie de tout expliquer qui l'a fait rejeter si longtemps [...].

J'ai senti que l'exactitude et la fidélité la plus scrupuleuse pouvaient seules rendre utiles aux sciences la mission dont j'étais chargé. Je me suis considéré comme un témoin étranger à tout système ; et pour ne rien hasarder de ce qui pourrait ôter quelque confiance aux faits que je vais rapporter, je me bornerai dans ce mémoire à les exposer tels qu'ils m'ont été recueillis et, en développant les conséquences immédiates qui résultent de leurs rapports, je m'abstiendrai même d'examiner en quoi elles se rapprochent ou s'écartent des hypothèses que l'on a imaginées.

Avant de partir, [...] je priai le citoyen Haüy de vouloir bien m'éclairer de ses lumières sur ce qui concernait la minéralogie du pays que j'allais parcourir. Le citoyen Coquebert Montbret, correspondant de la classe, me fournit les connaissances qui m'étaient nécessaires sur la géographie physique du même pays. Enfin le citoyen Fourcroy voulut bien me donner une copie des lettres qu'il avait reçues de L'Aigle, relativement à l'apparition du météore.

Je partis de Paris le 7 messidor, [...] mais je ne me rendis pas directement dans ce lieu même [L'Aigle]. Si l'explosion du météore avait réellement été aussi violente qu'on nous l'annonçait, on devait en avoir entendu le bruit à une très grande distance. Il était donc conforme aux règles de la critique de prendre d'abord des informations dans des lieux éloignés sur ce bruit extraordinaire, sur le jour et l'heure auxquels on l'avait entendu, d'en suivre la direction et de me laisser conduire par les témoignages jusqu'à l'endroit même où l'on disait que le météore avait éclaté [...].

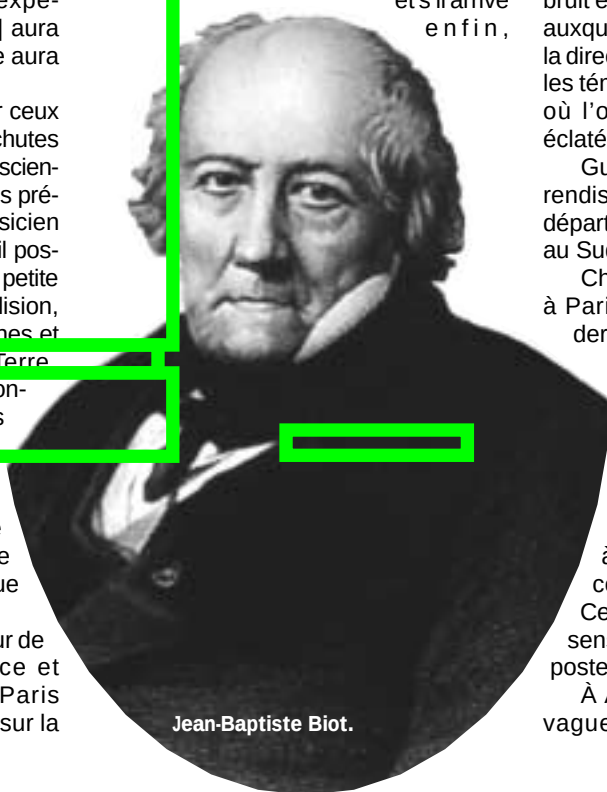
Guidé par ces considérations, je me rendis d'abord à Alençon, chef-lieu du département de l'Orne, situé à 15 lieues au Sud-Ouest de la ville de L'Aigle.

Chemin faisant, le courrier de Brest à Paris me dit que, le mardi 6 floréal dernier, à neuf lieues par-delà Alençon, entre Saint-Rieux et Pré-en-Pail, il vit dans le ciel un globe de feu qui parut, par un temps serein, du côté de Mortagne, et sembla tomber vers le Nord. Quelques instants après, on entendit un grand bruit semblable

à celui du tonnerre ou au roulement continu d'une voiture sur le pavé.

Ce bruit dura plusieurs minutes, et fut sensible, malgré celui de la chaise de poste qui roulait [...].

À Alençon, on avait entendu parler vaguement de ce phénomène, mais



Jean-Baptiste Biot.

on n'avait rien vu ; et aucun bruit extraordinaire ne s'était fait remarquer. Ce qui n'est pas étonnant dans une grande ville, au milieu du tumulte d'un jour de marché [...].

Le citoyen Laragdelaine, préfet, n'ayant pu me donner de renseignements par lui-même, me fournit avec beaucoup de complaisance tous les moyens d'en obtenir à L'Aigle et dans les divers endroits où je m'arrêterais. Je quittai Alençon le 10 messidor et me mis en route pour L'Aigle, avec un guide actif et intelligent.

TÉMOIGNAGES CONCORDANTS

Le premier endroit habité que nous rencontrâmes fut Seez, petite ville à dix lieues au Sud-Ouest de L'Aigle. On y avait entendu le bruit du météore ; on en indiquait précisément le jour, l'heure et les diverses circonstances. C'était comme un coup de tonnerre très fort qui semblait partir du côté Nord, et dont le roulement, accompagné de plusieurs explosions successives, dura cinq ou six minutes.

Des personnes crurent d'abord que c'était le bruit d'une voiture roulant sur le pavé ; elles ne furent désabusées qu'en ne voyant rien arriver, quoique le bruit continuât. Ces personnes furent d'autant plus étonnées que le ciel était parfaitement serein, sans le moindre nuage, et qu'on n'y remarquait rien d'extraordinaire. On disait de plus que des voyageurs venant de Falaise et de Caen avaient entendu exactement la même explosion, et qu'ils avaient eu grande peur [...].

Ces informations me donnaient lieu de penser que les effets du météore s'étaient étendus sur un espace beaucoup plus considérable que nous ne l'avions imaginé. Comme mon but était d'abord de circonscrire exactement cet espace, je suivis les indications que je venais de recevoir, et me dirigeai vers Argentan [...]. Sur la route j'interrogeai une foule de paysans, tant passagers que travaillant aux champs. Hommes, femmes, enfants, tous ont entendu l'explosion le même jour et la rapportent à la même heure, un mardi, entre midi et deux heures [...]. J'arrivais [à L'Aigle], le jour même de mon départ d'Alençon. Je sus que

toute la ville avait entendu au jour et à l'heure indiqués, un bruit effroyable. Il n'était point tombé de pierres à L'Aigle même, on en avait seulement entendu parler [...].

En rapprochant ces récits, faits par des hommes éclairés, de ceux que nous avons recueillis dans les campagnes sur une étendue de plus de dix lieues de rayon, nous voyons qu'ils sont absolument d'accord pour le jour, l'heure et la nature de l'explosion [...].

Je me suis maintenant à la question même de la chute des masses : et comme c'était là la partie la plus importante du phénomène, c'est celle aussi à laquelle je donne le plus de soin, de détail et de temps. Les premiers renseignements que je reçus à L'Aigle sur cet objet me furent donnés par le citoyen Humphroy et sont relatifs à une pierre pesant 3,56 kilogrammes, que l'on dit être tombée à la Vassellerie, village situé à une lieue au Nord de L'Aigle. [...]

J'ai examiné avec notre confrère Leblond le trou d'où cette masse a été tirée. Peut-on raisonnablement supposer qu'une masse aussi considérable eût existé depuis longtemps sans avoir été remarquée, dans un lieu où l'on passait fréquemment ; que tout à coup les enfants de la maison et les voisins se fussent réunis par un simple hasard,

pour affirmer qu'ils avaient entendu tomber dans le même lieu quelque chose de très lourd avec un très grand bruit ; que toutes ces circonstances eussent coïncidé avec ce qui se passait au même instant à deux lieues de là, et qu'enfin aucun des spectateurs ne se fût rappelé d'avoir vu précédemment cette pierre ? Voilà pourtant toutes les particularités dont il faudrait supposer la réunion pour infirmer la vérité de ce témoignage [...].

LES CONCLUSIONS DE L'ENQUÊTE

Si l'on s'approche, d'après les règles de la critique, des témoignages moraux et physiques que je viens de rapporter avec fidélité, on y trouvera une réunion de preuves dont l'accord ne convient qu'à la vérité même. En effet, considérons d'abord les témoignages physiques.

On n'a jamais vu, avant l'explosion du 6 floréal, de pierres météoriques entre les mains des habitants du pays. Les collections minéralogiques faites avec le plus de soin, depuis plusieurs années, pour recueillir les produits du département, ne renferment rien de semblable ; les mémoires que possède le Conseil des mines sur la minéralogie et la géologie des environs de L'Aigle n'en font aucune mention.

Les forges, les usines, les mines des environs que j'ai visitées, n'ont rien dans leurs produits ni dans leurs scories qui ait avec ces substances le moindre rapport. On ne voit dans le pays aucune trace de volcan. Tout à coup, et précisément depuis l'époque du météore, on trouve ces pierres sur le sol et dans les mains des habitants du pays ; elles sont si communes que l'on peut estimer le nombre de celles que l'on montre à deux ou trois mille.

Maintenant, si l'on consulte les témoignages moraux, que trouve-t-on ? Vingt hameaux dispersés sur une étendue de plus de

deux lieues carrées, dont presque tous les habitants se donnent pour témoins oculaires et attestent qu'une épouvantable pluie de pierres a été lancée par le météore. Dans le nombre se trouvent des hommes faits, des femmes, des enfants, des vieillards ; ce sont des



Sur cette carte des environs de L'Aigle, on a repéré les sites où l'on a retrouvé des météorites, après l'événement du 6 floréal de l'an 11 : la « limite de l'étendue sur laquelle des pierres ont été lancées » est une ellipse.

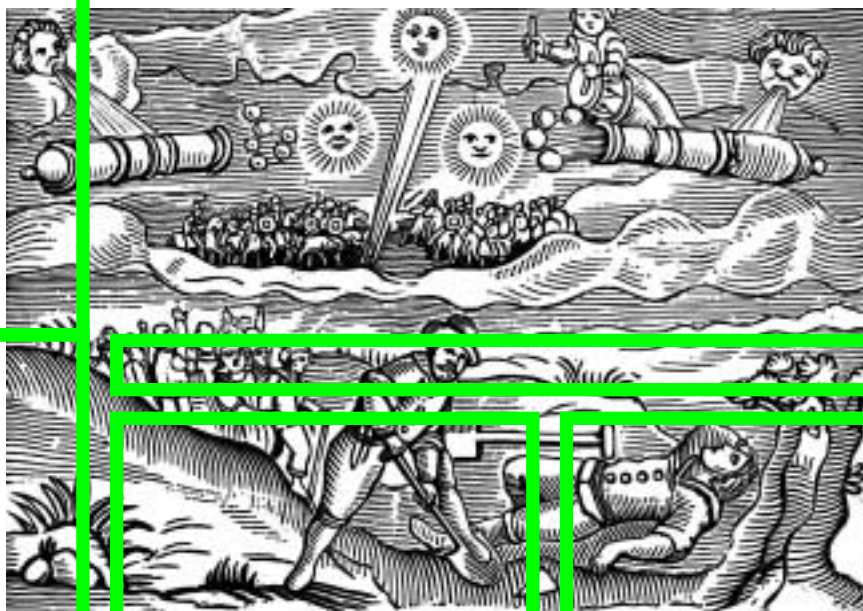
peysans simples et grossiers, qui demeurent à une grande distance les uns des autres ; des laboureurs pleins de sens et de raison ; des ecclésiastiques respectables, des jeunes gens qui, ayant été militaires, sont à l'abri des illusions de la peur : toutes ces personnes, de professions, de mœurs, d'opinion si différentes, n'ayant que peu ou point de relations entre elles, sont tout à coup d'accord pour attester un même fait qu'elles n'ont aucun intérêt à supposer : elles le rapportent toutes au même jour, à la même heure, au même instant, avec les mêmes circonstances, avec les mêmes comparaisons ; et ce fait, si universellement, si fortement attesté, n'est qu'une conséquence des preuves physiques rassemblées précédemment : il est tombé dans le pays des pierres d'une nature particulière, à la suite de l'explosion du 6 floréal.

Bien plus, on montre encore des traces des débris qui attestent matériellement la chute de ces masses, dont on ne parle qu'avec effroi. On dit les avoir vues descendre le long des toits, casser des branches d'arbres, rejaillir en tombant sur le pavé ; on dit qu'on a vu la terre fumer autour des plus grosses, et qu'on les a tenues brûlantes dans les mains.

Ces récits ne se font, ces traces ne se montrent que dans une étendue de terrain déterminée. C'est là seulement, qu'il est possible de trouver encore quelques pierres météoritiques ; on n'en connaît pas un seul morceau qui ait été trouvé sur le terrain hors de cet arrondissement, et il n'y a pas un seul témoin qui prétende avoir vu tomber des pierres ailleurs.

Enfin une troisième espèce de preuve résulte de certaines particularités physiques unanimement racontées par les habitants du pays, qui sont trop peu éclairés pour en avoir prévu les conséquences : je veux parler des changements successifs observés dans la dureté de ces pierres et dans l'odeur qu'elles exhalaient ; changements qui, au rapport des témoins, [...] se sont opérés dans l'espace de quelques jours après l'explosion du météore ; changements dont j'ai moi-même observé très sensiblement les traces en cassant des morceaux de dimensions différentes ; et ce nouveau rapprochement des témoignages et des faits ne sert qu'à montrer entre eux un nouvel accord.

Ainsi toutes les preuves, soit physiques, soit morales, qu'il a été possible de recueillir, se concentrent et convergent pour ainsi dire vers un point unique ; et si l'on considère la manière dont nous avons été conduits, par la comparaison des témoignages, au lieu de l'explosion, le nombre de renseignements pris sur les



Les représentations les plus fantaisistes de l'origine des météorites ont été imaginées : ici des canons projettent des pierres, que le personnage du premier plan tente de déterrer.

lieux, en eu accord avec ceux qui avaient été recueillis à dix lieues de là, la multitude des témoins, leur caractère moral, la ressemblance de leurs récits et leur coïncidence parfaite, de quelque part qu'ils soient venus, sans qu'il ait été possible de découvrir à cet égard une seule exception, on en conclura sans le moindre doute que le fait sur lequel ces preuves se réunissent est réellement arrivé, et qu'il est tombé des pierres aux environs de L'Aigle le 6 floréal, an 11.

Ainsi l'ensemble des témoignages donnera de ce phénomène la description suivante.

L'HISTOIRE RECONSTITUÉE

Le mardi 6 floréal an 11, vers une heure après-midi, le temps étant serein, on aperçut de Caen, de Pont-Audemer et des environs d'Alençon, de Falaise et de Vire, un globe enflammé, d'un éclat très brillant et qui se mouvait dans l'atmosphère avec beaucoup de rapidité. Quelques instants après, on entendit à L'Aigle et autour de cette ville, dans un arrondissement de plus de trente lieues de rayon, une explosion violente qui dura cinq ou six minutes. Ce furent d'abord trois ou quatre coups semblables à des coups de canon, suivis d'une espèce de décharge qui ressemblait à une fusillade ; après quoi on entendit comme un épouvantable roulement de tambours. L'air était tranquille et le ciel serein, à l'exception de quelques nuages, comme on en voit fréquemment.

Ce bruit partait d'un petit nuage qui avait la forme d'un rectangle et dont le plus grand côté était dirigé Est-Ouest.

Il parut immobile pendant tout le temps que dura le phénomène ; seulement les vapeurs qui le composaient s'écartaient momentanément de différents côtés par l'effet des explosions successives. Ce nuage se trouva à peu près à une demi-lieue au Nord-Nord-Ouest de la ville de L'Aigle ; il était très élevé dans l'atmosphère, car les habitants de la Vassolierie et de Boislaville, hameaux situés à plus d'une lieue de distance l'un de l'autre, l'observèrent en même temps au-dessus de leurs têtes.

Dans tout le canton sur lequel ce nuage planait, on entendit des sifflements semblables à ceux d'une pierre lancée par une fronde, et l'on vit en même temps tomber une multitude de masses solides exactement semblables à celles que l'on a désignées sous le nom de pierres météoriques. [...]

Je ne suis borné dans cette relation à un simple exposé des faits : j'ai taché de les dire comme tout autre les aurait vus, et j'ai mis tous mes soins à les présenter avec exactitude. Je laisse à la sagacité des physiciens les nombreuses conséquences que l'on peut en déduire ; je me contenterai de dire que j'ai réussi à mettre hors de doute l'un des plus étonnants phénomènes que les hommes aient jamais observés.»

Marcel WEYANT est géologue et chargé de recherches au CNRS, à l'Université de Caen.

Le texte intégral de J.-B. Biot a été réédité dans la revue *Patrimoine normand* (n°3, juin-juillet 1995, Éditions Heimdal).

Fibres et confitures

*La récupération des pectines
par cuisson-extrusion.*

Le spectre de la confiture qui ne prend pas plante les cuisinières et les cuisiniers dès l'hiver, quand se préparent les marmelades d'oranges : parfois le jus reste jus, au lieu de former la masse semi-solide attendue. Comment éviter cette Berezina culinaire ? Au Centre INRA de Nantes, Jean-François Thibault, Catherine Renard, Monique Axelos et Marie-Christine Ralet répondent à cette question, mais leur objectif et leur intérêt sont surtout industriels : ils montrent que la technique de cuisson-extrusion utilisée notamment pour préparer les petits biscuits pour apéritifs permet de récupérer une grande quantité de pectine, c'est-à-dire de la protéine gélifiante, de pulpes de citrons, d'oranges, de betteraves...

L'échec occasionnel des confitures semble paradoxal : les pectines sont des molécules qui, associées à la cellulose et à d'autres polysaccharides (de longues molécules formées par l'enchaînement de sucres simples), composent les parois végétales de la plupart des végétaux ; seules les céréales n'en comportent pas. Pourquoi ne parvient-on pas toujours à les extraire ? Parce que le chauffage modéré auquel on procède afin de ne pas évaporer les arômes volatils des fruits ne dissocie pas bien les parois cellulaires ; les pectines sont présentes, mais elles ne sont

pas libérées et, de ce fait, ne s'associent pas en un réseau qui occupe tout le volume de la solution, formant un gel.

Industriellement un problème différent se pose : les résidus de la pression des pommes, lors de la fabrication du jus de pommes ou du cidre, les pulpes de citrons et d'oranges qui proviennent de la préparation des jus de fruits, ou, enfin, les pulpes de betteraves, après l'extraction du sucre, laissent une quantité considérable de fibres végétales qu'on souhaiterait valoriser. Classiquement on récupère les pectines à partir de ces fibres en les traitant à l'acide, à chaud : on détache ainsi des pectines, que l'on doit ensuite purifier. La matière produite sert de gélifiant, d'épaississant ou d'enrobage des chips, et on envisage de l'utiliser pour dépolluer les eaux usées (les pectines se lient fortement aux ions métalliques qui polluent ces eaux).

Toutefois l'extraction à l'acide a plusieurs inconvénients : elle risque de dégrader les molécules de pectine, en coupant les liaisons entre les sucres constitutifs ou en modifiant les groupes chimiques portés par les sucres et responsables des propriétés de gélification, et elle pollue.

À Nantes, les physico-chimistes, qui étudient depuis plusieurs années la cuisson-extrusion pour le filage des viandes ou le traitement de l'amidon, ont

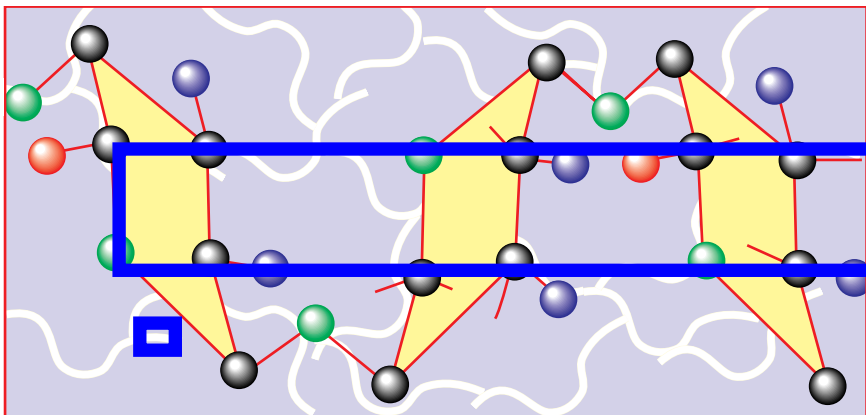
eu l'idée de reprendre le processus pour traiter les pulpes de fruits et extraire les pectines. Dans les appareils de cuisson-extrusion utilisés dans l'industrie agro-alimentaire (la méthode provient de l'industrie des polymères), une ou plusieurs vis d'Archimède à pas variable cisailent la matière en la convoyant vers une buse de sortie, où a lieu une détente rapide sur la longueur de l'appareil, plusieurs zones de chauffage portent la matière à des températures contrôlées.

Quelles matières végétales pouvaient fournir des pectines susceptibles de gélifier ? Les propriétés des pectines dépendent de leur composition chimique, qui varie selon les végétaux : si les pectines des citrons verts, des citrons, des oranges ou des pommes font de bons gélifiants, celles des pulpes de betteraves ne gélifient pas, mais permettraient de complexer les ions lourds ou de produire des gels supramoléculaires après modification chimique. Les différences de propriétés des pectines tiennent surtout à leur méthylation : les sucres dont l'enchaînement forme le squelette de la molécule portent des quantités variées de groupes latéraux méthoxycarboxyle ($-COOCH_3$), qui s'associent en milieu acide. Cette association assure la prise en gel. En conséquence, toute extraction destinée à produire des pectines gélifiants ou épaississants doit respecter ces chaînes latérales.

La cuisson-extrusion a plusieurs atouts : non seulement l'équipement est bien plus simple et bon marché que les installations d'extraction classique (les vis testées à Nantes mesurent un mètre de long seulement), mais le traitement est rapide et automatisable. Elle procure autant de pectine que le traitement classique, à l'acide et respecte la composition des molécules. Les chercheurs nantais ont observé que, lors de la cuisson-extrusion des matières végétales, le cisaillement est le facteur principal ; en évitant le chauffage, on respecte les pectines.

Comment tirer parti de ces résultats dans votre cuisine ? À froid, séparez le jus des fruits de la matière fibreuse et broyez finement cette matière, qui renferme les pectines (e.g. utilisez le robot-coupeur, utilisez le robot-coupeur) ; puis ajoutez la matière broyée au jus et cuisez doucement. Enfin, comme les molécules de pectine n'ont pas le temps de se lier plutôt aux atomes de cuivre de votre bassine qu'entre eux, ne laissez pas refroidir votre confiture dans la bassine : faites-la plutôt prendre dans des récipients en verre.

Hervé THIS



Les pectines sont de longues molécules composées par l'enchaînement de sucres simples (hexagones déformés). Les atomes de carbones, d'oxygène et les groupes hydroxyle (OH) sont respectivement en noir, vert et bleu ; les groupes méthoxycarboxyle ($-COOH_3$) (représentés par des boules rouges) assurent des liaisons entre molécules adjacentes, ce qui assure la prise en gel des confitures. En fond, on voit un cuiseur-extrudeur à deux vis, ouvert.

Prochain rendez-vous *France Info* et *Pour la Science*, le 27 février 1995, avec la chronique *Info Sciences* de Marie-Odile Monchicourt.

Un reptile dans une souris

La mutation d'un gène qui commande le développement d'un os de l'oreille, chez la souris, fait apparaître un os spécifique des reptiles.

Les biologistes ont observé que les structures de l'embryon d'animaux supérieurs ressemblent à celles d'espèces d'animaux antérieurs à partir desquels ils ont évolué : l'embryogénèse, disaient-ils, retrace la phylogénèse. Filippo Rijli, Manuel Mark, Pierre Chambon et leurs collègues de l'École de médecine de Strasbourg ont vérifié expérimentalement cette idée, montrant que les mammifères ont conservé dans leur patrimoine génétique des programmes présents chez les reptiles.

L'équipe de Strasbourg s'intéresse aux gènes *Hox* de souris, apparentés aux gènes «homéotiques» de la drosophile, qui commandent le développement de l'embryon. Chez la mouche, par exemple, ces gènes sont répartis sur l'ADN dans le même ordre que les organes de l'animal dont ils commandent l'assemblage, le long de l'axe tête-queue. Des expériences sur la drosophile ont montré que certaines parties du corps se développent là où elles ne devraient pas quand les gènes homéotiques sont mutés.

Les biologistes moléculaires ont provoqué des mutations d'un gène homéotique de la souris, le gène *Hoxa-2*, en y introduisant un autre gène qui sert de marqueur : le gène de la résistance à la néomycine (un antibiotique). Le gène modifié étant placé au contact de cellules souches de souris, l'application d'un champ électrique permet à la séquence d'ADN constituant ce gène de s'introduire dans les cellules et de remplacer le gène normal, par le phénomène de recombinaison homologique. Reste alors à sélectionner les cellules ainsi modifiées. On ajoute pour cela l'antibiotique au milieu de culture : toutes les cellules sont tuées, sauf celles qui résistent, en raison du gène marqueur introduit dans le gène *Hoxa-2*. Quand on injecte ces cellules à un embryon de souris au stade blastocyte, les cellules modifiées sont intégrées

dans les tissus, et des souris «chimériques» se forment, avec une mutation dans l'un de leurs deux allèles *Hoxa-2*. Ces souris sont viables, parce que le gène muté est récessif, mais, quand on les croise, elles ont, parmi leur descendance, des souris dont les deux allèles du gène sont mutés : en observant ces souris «homozygotes», on déduit la fonction du gène par la disparition de son activité.

Les souris homozygotes pour la mutation «*Hoxa-2* nulle» ne sont pas viables (elles meurent dans les 24 heures après la naissance), mais les biochimistes ont observé que le gène muté a de profondes conséquences sur le développement du deuxième arc branchial. Cette structure de l'embryon est responsable, chez les poissons, de la formation d'une paire de branchies ; chez les mammifères, elle com-

mande la genèse de certaines structures squelettiques de la face et du cou. Et chez les souris où le gène *Hoxa-2* est muté, certains éléments dérivés du deuxième arc branchial, tel l'étrier de l'oreille moyenne (un des osselets) sont absents et remplacés par d'autres os de l'oreille (l'enclume et le marteau), normalement formés à partir du premier arc branchial.

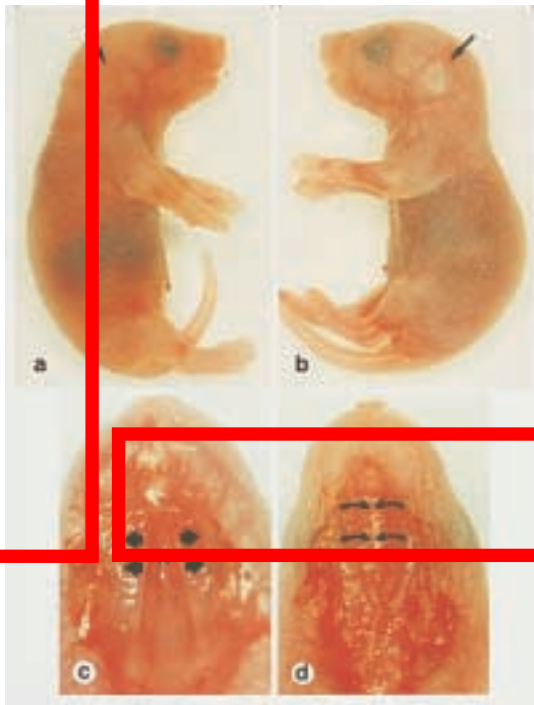
L'inactivation du gène *Hoxa-2* induit donc une transformation homéotique des éléments squelettiques dérivés du deuxième arc branchial en éléments du premier arc. Diverges autres anomalies ont été observées : une fente dans le palais empêche les souris de téter et, plus généralement, les anomalies montrent que le deuxième et le premier arc branchial ont un programme morphogénétique commun. En l'absence du gène *Hoxa-2*, le deuxième arc branchial forme des structures identiques à celles du premier.

APPARITION DE L'OS REPTILIEN

Mieux encore, un os que le second arc branchial engendre chez les reptiles (le «palatocarré») apparaît chez les souris mutées, alors qu'il est normalement absent chez les mammifères, où l'enclume a pris sa place au cours de l'évolution. Cette découverte intéresse les paléontologues : les cellules ont une mémoire génétique des temps où les mammifères n'existaient pas encore ; nos programmes génétiques ancestraux restent présents, mais ils ne sont pas réalisés, car ils ont été inhibés ou modifiés au cours de l'évolution.

Ces expériences livrent plusieurs autres conclusions : tout d'abord, le premier et le deuxième arc branchial ont un programme génétique commun ; d'autre part, les «homologies», c'est-à-dire les ressemblances entre séquences d'ADN, déjà connues entre la drosophile et l'homme, par exemple, correspondent à des ressemblances de fonction ; enfin, le gène homéotique agit comme un gène qui effectue une sélection dans un programme de base.

Les études se poursuivent aujourd'hui par la réalisation de mutations du gène *Hoxb-2*, sur un des quatre autres complexes homéotiques. La séquence du gène *Hoxb-2* ressemble à celle du gène *Hoxa-2* ; il est probablement dérivé du même gène ancestral. Quelles anomalies engendra son inactivation ? Quelle structure ancestrale réapparaîtra-t-elle ? □



Une souris mutante (à gauche) et une souris normale (à droite). La flèche montre la partie externe de l'oreille, absente chez la souris mutante. En bas, les images montrent le palais des animaux : la fente palatine est restée ouverte chez la souris mutante.

Vaccin plus stable contre la polio

Il est stabilisé par l'eau lourde

En 1988, l'Organisation mondiale de la santé a déclaré que la poliomyélite pouvait être éradiquée d'ici l'an 2000. Pourquoi cette maladie plutôt que la rage ou l'une des maladies parasitaires responsables d'une mortalité élevée ? D'une part, parce que l'on dispose d'un vaccin et, d'autre part, parce que l'homme est le seul hôte. Malheureusement le vaccin risque d'être inactivé par la chaleur, surtout dans les zones tropicales. En Afrique, par exemple. L'équipe de Radu Crainic, de l'Institut Pasteur, a découvert que l'utilisation d'eau lourde stabilise le vaccin.

Le virus de la poliomyélite résiste à l'acidité de l'estomac ; il se multiplie dans le pharynx et dans l'intestin, et est éliminé dans les selles. Cette première phase de la maladie n'est accompagnée d'aucun signe clinique spécifique. Puis, après avoir proliféré dans l'intestin, le virus passe dans le sang. Normalement, la barrière hémato-encéphalique protège le système nerveux central contre les micro-organismes pathogènes, mais quand la vémie est trop élevée ou que cette barrière n'assure pas sa fonction, des virus s'introduisent dans le système nerveux central (cerveau et moelle épinière).

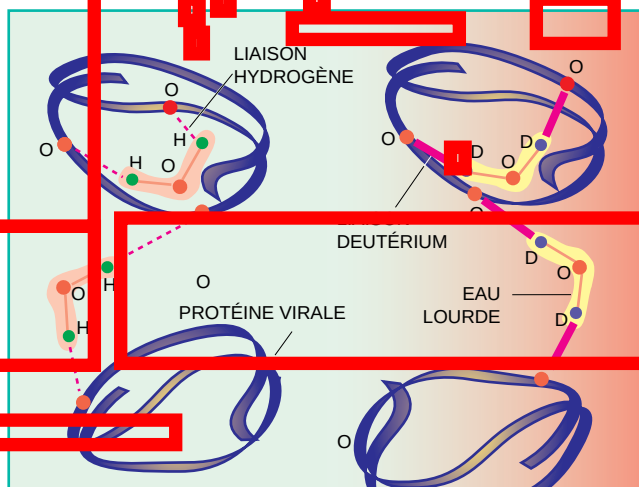
Un à deux pour cent seulement des personnes contaminées par le poliovirus ont une atteinte neurologique : une dizaine de jours après la contamination, une paralysie brutale s'installe. Les neurones portent des récepteurs sur lesquels se fixe le virus : lorsqu'il est à l'intérieur d'un neurone, le virus bloque tout mécanisme cellulaire qui n'est pas indispensable à sa propre réplication. Il « éprouve » les ressources neuronales et détruit notamment les neurones des cornes antérieures de la moelle épinière, qui commandent le mouvement.

Rejeté dans la nature, le virus disparaît progressivement, mais comme ce sont des dizaines de millions de particules qui sont produites par un

même individu, des quantités notables de virus, résistant aux conditions extérieures, persistent dans l'environnement. Dans les pays développés, les enfants, les plus exposés, sont systématiquement vaccinés. Le vaccin oral contient le virus vivant atténué qui se multiplie dans l'intestin comme le virus naturel. Il provoque seulement une infection intestinale, et déclenche les mécanismes immunitaires. Comme le virus est atténué, il ne traverse pas la barrière hémato-encéphalique.

Pour éradiquer le virus, on doit respecter une bonne couverture vaccinale, les conditions d'hygiène doivent être correctes et la promiscuité faible. Les pays nordiques ont ainsi réussi à éradiquer la maladie. En France, aucun cas n'a été enregistré depuis 1988. Dans le monde, on estime à 100 000 le nombre d'enfants qui ont été atteints de poliomyélite avec séquelles en 1993. 50 000 en Inde. Comment améliorer la couverture vaccinale ? Pour qu'un vaccin soit efficace, il doit apporter entre 100 000 et un million de particules virales vivantes atténuées.

Or, dans chaque dose vaccinale, la proportion de particules vaccinales diminue, une partie s'inactivant avec le temps.



Les liaisons hydrogène (en pointillés) au sein d'une molécule ou entre deux molécules stabilisent les solutions. Ces liaisons stabilisatrices sont plus fortes lorsque l'eau H_2O (à gauche) est remplacée par l'eau lourde, D_2O (à droite) ; les liaisons deutérium (traits roses épais) stabilisent le vaccin contre la poliomyélite, qui n'est plus dégradé par la chaleur.

et surtout avec la température. Afin de conserver vivantes et immunogènes suffisamment de particules virales, le vaccin doit être conservé au froid.

Afin de minimiser l'action de la température, on cherche à stabiliser le vaccin. Or, dans les années 1960, on a étudié le comportement de divers organismes, tels des bactéries ou des virus, et on a constaté qu'ils résistent bien aux températures élevées à condition d'être maintenus dans de l'eau lourde. L'eau est essentiellement constituée de molécules H_2O ; toutefois, l'hydrogène, H , a un isotope, le deutérium, D , qui a un électron comme l'hydrogène, mais dont le noyau contient un neutron de plus que l'hydrogène ; l'eau usuelle contient un mélange de H_2O (à 99,985 pour cent) et de D_2O (à 0,015 pour cent).

Des liaisons hydrogène s'établissent entre atomes d'oxygène et d'hydrogène du solvant et du soluté : les liaisons entre atomes de deutérium et atomes d'oxygène sont plus fortes que les liaisons hydrogène. Plus les interactions sont nombreuses et fortes, plus la solution est stable. C'est le cas lorsque les particules virales sont en solution dans de l'eau lourde pure.

LA FIN DE LA CHAÎNE DU FROID

On connaissait déjà un autre stabilisateur, le chlorure de magnésium, et lorsque l'on mélange ce chlorure et de l'eau lourde, on potentialise leur action respective ; on peut alors conserver le vaccin pendant sept jours à 37 °C tout en préservant son activité.

L'utilisation de l'eau lourde devrait entraîner un surcoût limité, de l'ordre de 10 pour cent, augmentation partiellement compensée par les économies réalisées sur la chaîne du froid. Après avoir pris un brevet sur cette méthode, l'équipe de Pasteur teste aujourd'hui l'efficacité d'un tel vaccin contre le virus de la fièvre jaune.

On peut espérer la disparition de la poliomyélite dans le monde entier, mais la couverture vaccinale doit être optimisée. Un vaccin efficace et stable, qui peut être conservé à température ambiante, devrait aider les médecins à vaincre ce fléau. En Chine, en 1994, 80 millions d'enfants ont été vaccinés en deux jours ; un seul cas a été enregistré en 1995. Une telle campagne de vaccination de masse est prévue en Inde. □

La combustion appriivoisée

Un composé inattendu d'hydrogène et d'oxygène apparaît à haute pression.

Il y a un peu plus de 200 ans, Lavoisier synthétisait de l'eau par combustion de l'hydrogène dans l'oxygène. Il découvrait là une réaction chimique fondamentale, utilisée aujourd'hui dans les moteurs cryogéniques des fusées et considérée comme le vecteur d'énergie du xx^{e} siècle : la réaction dégage, par unité de masse, une énergie plus importante qu'aucune autre réaction de combustion, et plus, sans pollution. À des pressions de plusieurs dizaines de milliers d'atmosphères, les mélanges d'hydrogène et d'oxygène ont toutefois des propriétés inattendues : en particulier, la réaction de formation de l'eau n'a pas lieu et, au-dessus de 76 000 atmosphères, les molécules forment un alliage solide dans la proportion de trois molécules d'oxygène pour quatre d'hydrogène.

Nous avons comprimé, à température ambiante, des mélanges d'oxygène et d'hydrogène en diverses proportions, dans une presse à enclumes de diamant. Les faibles volumes utilisés limitent les risques liés à d'éventuelles explosions.

La presse à enclumes de diamant, mise au point il y a une quinzaine d'années, est un instrument inégalé de recherche sur les hautes pressions. Le diamant est transparent aux rayonnements électromagnétiques : en analysant la lumière infrarouge d'un laser qui traverse l'échantillon, nous avons mesuré les énergies de vibration intramoléculaires, caractéristiques de chaque molécule.

Jusqu'à plus de 80 000 atmosphères, seules les molécules d'oxygène et d'hydrogène ont été détectées, mais pas d'eau ni de peroxyde d'hydrogène, les deux produits possibles d'une réaction chimique. En outre, on observe les mêmes transitions de phase à la montée et à la descente en pression, même après un mois de stabilisation. La vitesse de combustion de l'hydrogène devient très lente sous pression. Contrairement à ce qui était couramment admis, la réactivité des mélanges d'hydrogène et d'oxygène diminue avec l'augmentation de la pression.

Lorsque la pression augmente, on observe des transitions de phase du

mélange (il ne s'agit pas de réactions chimiques). Trois solides peuvent se former, pour des compositions différentes du mélange : l'oxygène, l'hydrogène et un composé de ces deux molécules. Les valeurs de la pression lors des passages entre les différents états (fluide homogène, équilibre entre un solide et le fluide, et équilibre entre deux solides), pour différentes concentrations, et la mesure du rapport des volumes des phases en équilibre nous ont permis de construire le diagramme de phases.

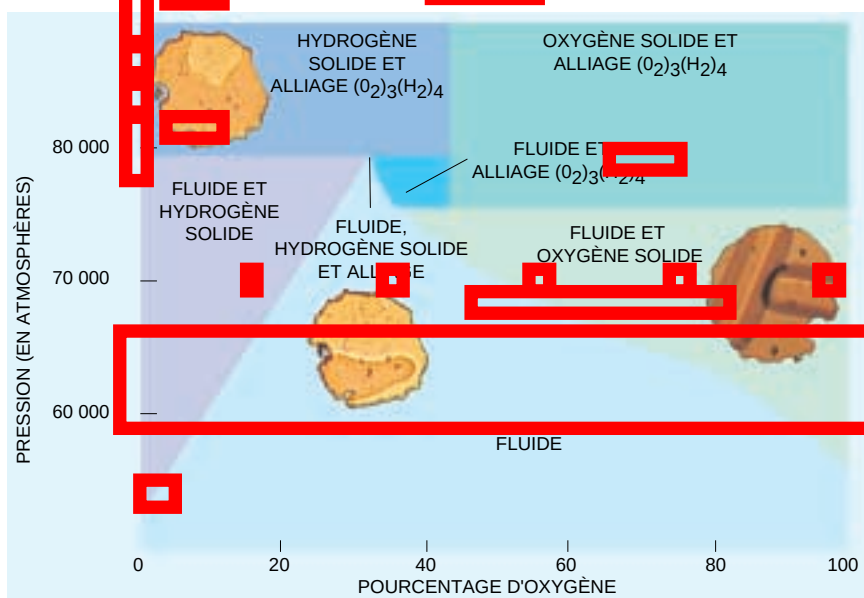
UN SOLIDE DE VAN DER WAALS

Nous avons aussi déterminé la concentration en oxygène du solide composé : environ 42 pour cent. Ce solide n'est pas un composé chimique, au sens classique du terme : sa cohésion n'est pas assurée par les liaisons covalentes, ioniques ni métalliques, mais par les forces à courte distance de van der Waals. Nous n'avons pas encore déterminé sa structure cristalline : les expériences de diffraction des rayons X, sous le fort flux d'un rayonnement synchrotron, ont entraîné sa transformation en eau. À haute pression l'alliage est donc une forme métastable des mélanges d'oxygène et d'hydrogène : l'eau reste la forme thermodynamiquement la plus stable, comme le graphite est la forme la plus stable du carbone malgré la formation de diamant à haute pression. La métastabilité de l'alliage proviendrait de la difficulté de la réaction en chaîne, qui régit la combustion à basse pression, à se propager lorsque les distances intermoléculaires sont proches du diamètre des molécules.

Cette découverte permettra de mieux comprendre la chimie sous pression, en particulier celle qui se produit à l'intérieur des planètes géantes gazeuses telles Jupiter, Saturne ou Neptune. Les conditions thermodynamiques y permettraient l'existence de composés de van der Waals, constitués de molécules simples telles l'oxygène, l'hydrogène ou le méthane, qui seraient les constituants de base de ces planètes, comme les silicates dans les planètes telluriques.

Utiliserons-nous l'alliage d'hydrogène et d'oxygène comme propulseur ou pour stocker de l'énergie ? De telles applications dépendent de la pression au-dessus de laquelle ce composé est stable à une température donnée. Il est encourageant de constater qu'à la température de l'azote liquide, 77 kelvins, cette pression est réduite à 5 000 atmosphères.

Paul LOUBEYRE et René LE TOULLEC
Laboratoire de physique des milieux condensés, CNRS, Université Paris 6



Les mélanges d'hydrogène et d'oxygène ne réagissent pas à haute pression. On observe l'apparition de différentes phases, dont la composition dépend de la pression et de la proportion d'oxygène. Au-dessus de 76 000 atmosphères, un alliage se forme : il contient trois molécules d'oxygène pour quatre molécules d'hydrogène.

Le laçage élucidé

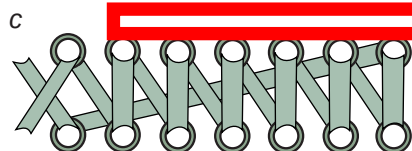
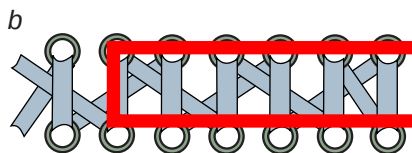
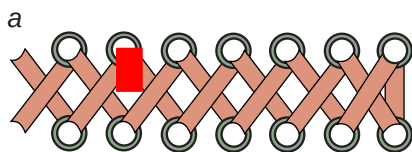
Le laçage en zigzag est le plus court.

Avant que les mathématiciens n'étudient le problème, le choix de la technique de laçage relevait des discussions de type gullivérien où les grosbottistes s'opposent aux petits-boutiens pour la manière de manger les œufs à la coque. Fallait-il utiliser la technique en zigzag (a), le laçage tous les deux trous (b) ou la technique rapide (c)?

Le problème était-il bien posé? Comment comparer les laçages? Le mathématicien John Halton, de l'Université de Californie à Berkeley, a examiné la question du point de vue de la longueur de lacet utilisée (*Mathematical Intelligencer*, automne 1995). Existait-il une réponse universelle quel que soit l'écartement des œillets et leurs nombres? Oui, répond John Halton avec force en s'appuyant résolument sur des graphiques et l'inégalité triangulaire, selon laquelle la somme des longueurs de deux côtés d'un triangle est supérieure à la longueur d'un côté.

Le laçage le plus économique quant à la longueur est le laçage en zigzag (a). Le plus mauvais le laçage rapide utilisé dans les magasins de chaussures (c). Et le problème est totalement résolu : il est prouvé que le laçage en zigzag est le moins long possible des laçages imaginables, et le seul à posséder cette propriété...

Qui a affirmé que les mathématiciens ne s'intéressaient pas au concret?



Les différents types de laçage, en zigzag (a), laçage tous les deux trous (b) et laçage rapide (c). Le laçage a est le plus court.

Un problème de cou

Le cou des sauropodes n'était ni souple ni mobile.

L'allure des dinosaures sauropodes nous est familière : ces herbivores quadrupèdes au long cou et à la longue queue, qui répondent aux doux noms de *Diplodocus* ou de *Brachiosaurus*, ont envahi les livres pour enfants. Le cou allongé de ces animaux fait parfois l'objet de représentations fantaisistes, montrant deux sauropodes tendrement enlacés par le cou, tels les serpents d'un caducée, ou, pour répondre à une contrainte de mise en page, l'ensemble du corps inscrit dans une S esthétique. Des squelettes mal montés de ces animaux sont aussi présentés dans des expositions : les vertèbres de certains dinosaures sont désarticulées pour suivre la courbe élégante en col de cygne imposée par une armature métallique. Selon l'étude anatomique et biomécanique, les sauropodes étaient plutôt des animaux lents dont le cou, à l'horizontale, leur permettait de brouter la végétation à des hauteurs intermédiaires. Ils avaient développé des systèmes originaux de circulation sanguine et de respiration.

Avec John Martin, du Muséum de Leicester, et Dino Frey, du Muséum de Karlsruhe, nous avons étudié l'anatomie des vertèbres cervicales des sauropodes et les propriétés biomécaniques des muscles et des ligaments du cou. Les

côtes cervicales allongées, des baguettes osseuses qui naissent à la face ventrale des vertèbres cervicales et longent le cou, en assuraient la rigidité. Dans certains cas, ces côtes se prolongent sur les deux ou trois vertèbres suivantes et se superposent à celles de ces vertèbres. Chez les genres de sauropodes à cou très long, tel *Mamenchisaurus*, où le cou mesurait 11 mètres de long pour une longueur totale de 22 mètres, la mobilité devait être très réduite et le cou relativement rigide. Chez les genres au cou moins allongé, la mobilité était peut-être plus grande.

Le cou était soutenu par un système ventral faisant intervenir les côtes cervicales et le puissant réseau de ligaments qui les relie. Un tel système maintient l'ensemble du cou du crocodile actuel. Le cou des sauropodes se comportait comme une poutrelle. La structure osseuse des vertèbres cervicales allie légèreté et résistance : l'économie de matériaux permet l'allègement de la structure.

La plupart des sauropodes auraient porté le cou horizontalement ; ils accédaient à la végétation comprise entre le niveau du sol et cinq mètres de haut environ. Toutefois, *Brachiosaurus* et les autres brachiosauridés, dont les longs membres antérieurs imposent à la colonne verté-

brale une courbure proche de celle que l'on observe chez la girafe, auraient eu un port plus redressé.

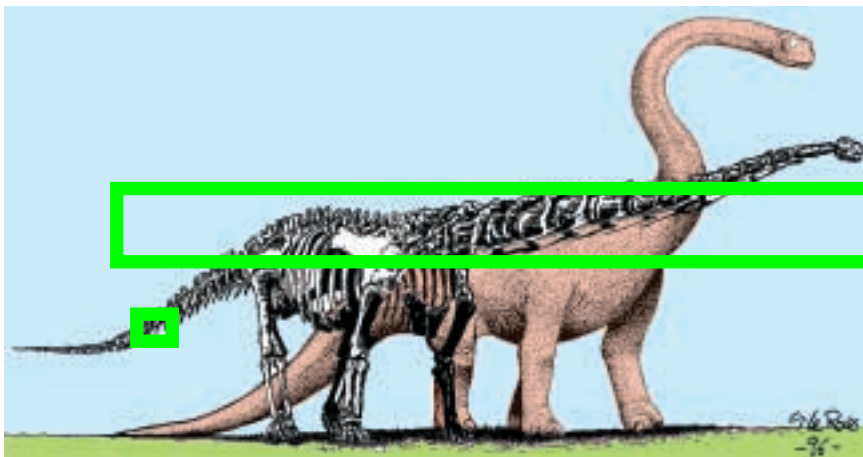
UNE AGILITÉ LIMITÉE

Nous avons évalué la locomotion des sauropodes à partir de celle de grands animaux actuels. L'observation du déplacement des éléphants donne une limite supérieure de la vitesse de cours : les sauropodes auraient marché, ou couru lentement. Étaient-ils agiles, capables de se tenir sur leurs membres postérieurs pour atteindre une végétation élevée ? La vision séduisante d'un animal d'une vingtaine de mètres de long dressé sur ses pattes postérieures est contredite par la résistance des membres : ils seraient soumis à des contraintes trop fortes. Hormis dans les cirques, les éléphants adoptent rarement une position bipède ; la bipédie ne nous semble pas non plus un comportement fréquent des sauropodes, même si elle pouvait se produire, lors de l'accouplement par exemple.

Quels systèmes circulatoire et respiratoire permettaient aux sauropodes de vivre avec un cou aussi long ? Comment le sang arrivait-il au cerveau et comment la pression sanguine était-elle adaptée aux changements de position ? Chez la girafe, une importante hypertension assure l'apport sanguin au niveau cérébral. Dans le cas des sauropodes, une telle solution aurait nécessité un système cardiaque très volumineux pour pomper un flot continu de sang. Des vaisseaux contractiles propulsant le sang de proche en proche tout le long du cou, sont plus probables. La membrane alaire des chauves-souris contient de tels vaisseaux contractiles.

Le type de respiration que l'on rencontre chez les mammifères présenterait, pour un cou très long, un phénomène d'espace mort. Ce phénomène empêche de plonger avec un tube de plusieurs mètres de long : l'air expiré, qui contient surtout du dioxyde de carbone, ne sort pas du tube et est réinspiré par le plongeur qui s'asphyxie progressivement. Le système respiratoire des oiseaux, en revanche, ne subit pas l'effet d'espace mort : l'air inspiré est stocké dans des sacs aériens, d'où un flux d'air constant alimente le poumon. Une partie des sacs aériens est contenue dans les os à structure alvéolaire. Comme de nombreux os des sauropodes ont une structure alvéolaire, leur système respiratoire ressemblait probablement à celui des oiseaux.

Valérie MARTIN-ROLLAND
Musée des dinosaures, Espéraza



Le cou des sauropodes était rendu rigide par les côtes cervicales allongées, des baguettes osseuses qui naissent sur la face ventrale des vertèbres cervicales. Les reconstitutions qui montrent de tels animaux avec un cou en col de cygne (en rose) sont purement fantaisistes.

La porte de l'antimonde

Pour la première fois, des physiciens créent des atomes d'antimatière.

Depuis les années 1950, on sait que chaque particule possède une antiparticule, son équivalent d'antimatière. Mises en présence, particule et antiparticule s'annihilent en libérant de l'énergie. Dans la théorie du Big Bang, l'Univers primordial contenait plus de matière que d'antimatière. Ce surplus n'ayant pas trouvé d'antimatière pour s'annihiler, il a subsisté et constitue la matière ordinaire de l'Univers actuel. Quelle est l'origine de cette dissymétrie primordiale ? L'antimatière a-t-elle un comportement similaire à celui de la matière ? Toutes ces questions sont encore sans réponse, mais, en synthétisant, au CERN, neuf atomes d'antihydrogène, une équipe de physiciens allemands, italiens et suisses vient d'entamer l'exploration de la Classification périodique des «anti-éléments».

Imaginons un miroir qui inverserait la charge des particules. Le positron, découvert dans le rayonnement cosmique en 1932, est l'image dans ce miroir de l'électron : il possède exactement la même masse, mais sa charge est positive et sa parité est inversée (le miroir inverse la gauche et la droite). Découvert dans

un accélérateur de particules en 1955, l'antiproton possède une charge négative et une parité opposée à celle du proton. De même que les particules forment des atomes de matière, on pensait que les antiparticules formeraient des atomes d'antimatière. Pour l'atome le plus simple, l'hydrogène, un unique électron gravite autour d'un seul proton tandis que pour l'atome d'antimatière le plus simple, l'antihydrogène, un positron graviterait autour d'un antiproton. Alors que l'on a déjà créé ou observé les antiparticules de nombreuses particules connues, aucun atome d'antimatière n'avait été observé.

Aujourd'hui, non seulement on sait produire des antiprotons en quantité, mais on sait également les stocker. Au CERN des antiprotons sont produits par collision de protons sur des fils métalliques. Ils sont stockés dans un anneau, le LEAR (l'acronyme de *low energy antiproton ring* soit «anneau d'antiproton de basse énergie»). Dans cet anneau carré de 20 mètres de côté, aux angles arrondis, un paquet contenant 10 milliards d'antiprotons est stocké durant plusieurs heures. En octobre 1995, les

physiciens des particules ont émis un jet de xénon à travers le faisceau d'antiprotons du LEAR. À proximité du champ électrique des noyaux de xénon, les antiprotons peuvent convertir une partie de leur énergie en une paire électron-positon. C'est un processus dont la section efficace (la probabilité d'interaction) est proportionnelle à la quantité de mouvement des antiprotons. Pour rendre cette quantité maximale, on utilise des antiprotons qui possèdent une vitesse égale aux 9/10 de la vitesse de la lumière.

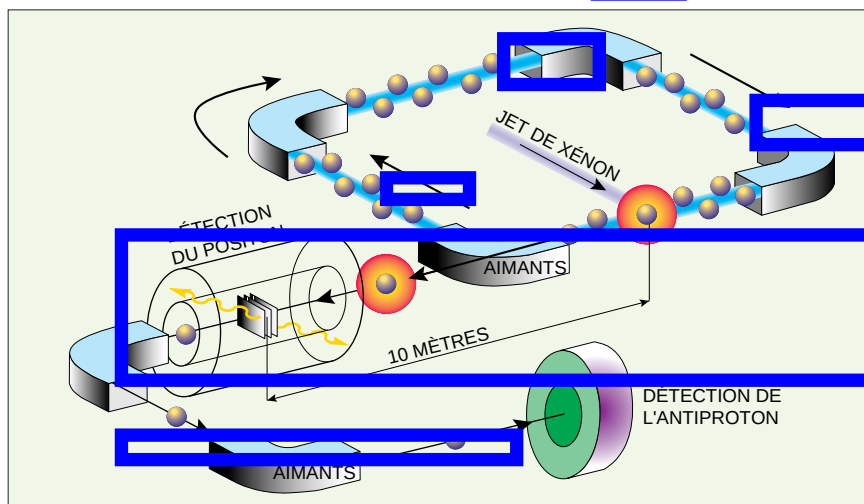
Il est arrivé, lorsque la vitesse d'un positron était suffisamment proche de celle d'un antiproton incident, que les deux antiparticules s'unissent et forment ainsi un atome d'antihydrogène. La probabilité, pour un antiproton traversant le jet de gaz, de former un atome d'antihydrogène est de 10^{-20} .

Durant les 15 heures qu'a duré l'expérience, seuls 11 événements ont été enregistrés comme étant produits par des atomes d'antihydrogène. Les atomes synthétisés de cette manière étant neutres, ils n'étaient pas courbés par le champ magnétique des aimants du LEAR et ont subsisté durant 40 milliardièmes de seconde avant de percuter le détecteur, situé dix mètres plus loin. Dans ce dernier, les atomes d'antihydrogène se cassaient. D'une part, chaque positron s'annihilait avec un électron du silicium formant deux photons d'énergie égale à 0,511 million d'électronvolts émis dans des directions opposées et détectés en coïncidence ; d'autre part, comme le proton détecté possède bien l'énergie maximale du faisceau, on discriminait entre la formation d'antihydrogène et l'annihilation d'un antineutron, une autre antiparticule créée par ce mécanisme. Le bruit résiduel était de deux événements.

Isolée de la matière, les atomes d'antihydrogène devraient être aussi stables que l'hydrogène ordinaire. Malheureusement, leur brève durée de vie rend irréalisable toute expérience sur les propriétés de ces atomes d'antimatière : on ne sait pas les ralentir sans les casser.

En revanche, d'autres méthodes de ralentissement sont envisagées. En particulier, des physiciens espèrent ralentir suffisamment des antiprotons en tirant le faisceau à travers une série de feuilles métalliques. Ainsi, on pourrait les confiner dans des pièges électromagnétiques

et les combiner avec des positons piégés de la même manière. Si les propriétés des atomes d'antimatière venaient à différer de celle de la matière et, en particulier, si leur spectre n'était pas identique (ce qui pourra se vérifier avec une précision extrême), le Modèle standard, qui est la théorie de physique des particules la plus aboutie aujourd'hui, devrait être révisé. □



On tire un jet de xénon sur des milliards d'antiprotons qui tournent dans le LEAR. La collision entre les antiprotons et le xénon peut créer un positon qui possède la vitesse adéquate pour se mettre en orbite autour de l'antiproton. Un atome d'antihydrogène est ainsi créé qui va sortir de l'anneau et être cassé dix mètres plus loin, en rencontrant une cible de silicium. Dans cette dernière, le positon émet deux photons dans des directions opposées, tandis que l'antiproton poursuit et est détecté dans une chambre à fils.

Syphilis en Europe

Elle y aurait été présente dès l'Antiquité.

Depuis près de cinq siècles, l'origine de la syphilis vénérienne est une question vivement débattue. Les textes de la fin du ^{xv}^e siècle et de la première moitié du ^{xvi}^e siècle décrivent l'explosion épidémique d'une maladie aiguë, mortelle, très contagieuse et de transmission vénérienne, peu après le retour triomphal de l'amiral Colomb à Barcelone, en 1493 : ce mal s'est ensuite rapidement propagé à travers toute l'Europe. Ces deux événements – la découverte d'un monde nouveau et l'apparition simultanée d'une maladie en apparence nouvelle – ont été associés par certains médecins de l'époque, d'autres prétendant que la maladie était déjà présente avant le premier voyage : le débat était né et ces deux théories n'ont cessé de s'opposer.

Le modèle de l'origine américaine de la maladie a progressivement acquis une valeur de théorie officielle. Deux piliers soutiennent ce dogme : l'apparente explosion en Europe d'une maladie qui semblait inconnue auparavant et l'absence d'ossements antérieurs à la date fatidique de 1493 et présentant des signes indiscutables de syphilis osseuse. Au contraire, les cas paléopathologiques décrits dans le Nouveau Monde abondent.

Un demi-millénaire après le retour du premier voyage du grand amiral de la mer océane, une découverte relance le

débat : Marc Borréani, Jean-Pierre Brun et Michel Masqualini, du Centre archéologique du Var, ont mis au jour, à Costebelle, dans le Var, un habitat rural antique et une nécropole dont une sépulture du ^{iv}^e siècle de notre ère contient les restes osseux parfaitement conservés d'une femme enceinte, avec le squelette de son fœtus encore en place dans la cavité pelvienne.

Le squelette de la mère présente quelques lésions osseuses qui évoquent une probable infection. Le squelette fœtal, âgé d'environ sept mois, est quasiment complet et présente un ensemble de lésions osseuses d'origine infectieuse. Ces lésions diffuses sont localisées sur la voûte crânienne, sur la face et sur les os longs. Après avoir examiné les très rares maladies susceptibles de provoquer des lésions ostéo-articulaires chez un fœtus de sept mois, nous avons conclu que la seule maladie associant l'ensemble de ces lésions ne pouvait qu'être une syphilis congénitale précoce, conséquence d'une contamination *in utero* de l'enfant.

La découverte de Costebelle a été présentée et analysée à plusieurs reprises, et, au cours du Colloque international de Toulon *L'origine de la syphilis en Europe – avant ou après 1493?*, nous avons découvert que le fœtus de Costebelle n'est pas un cas isolé : de nouvelles données ostéo-archéologiques plaident pour l'existence d'une tréponématose en Europe avant 1493 (les Tréponèmes sont les micro-organismes responsables de la syphilis, maladie vénérienne et de deux autres formes non vénériennes, le pian et le bétel).

En Italie, en France et en Angleterre, des anthropologues ont identifié des lésions qui évoquent des infections à Tréponèmes sur des squelettes des anciennes colonies grecques de Métaponte et de Héraclée (Italie, ^{vi}^e-ⁱⁱⁱ^e siècles avant notre ère), dans une nécropole du Bas-Empire de Lisieux, dans le Calvados (contemporaine de celle de Costebelle), et dans deux sites d'époque médiévale en Angleterre, antérieurs à 1493.

Par ailleurs, les données du Nouveau Monde ont été révisées : si les tréponématoses faisaient bien des ravages en Amérique précolombienne, il s'agissait, probablement, d'une maladie non vénérienne. Les signes indiscutables de la syphilis vénérienne, telles des lésions dentaires dues aux infections congénitales, sont présents seulement sur les squelettes pos-



Homme atteint de «grosse vérole» (gravure sur bois d'Albrecht Dürer, datant de 1490).

térieurs à la conquête : la syphilis vénérienne y aurait été introduite par les Européens ou par les esclaves africains.

La syphilis, le bétel et le pian sont tous trois responsables de lésions osseuses très semblables. Pour les deux formes non vénériennes, le contact avec le Tréponème a lieu dès l'enfance ; l'immunité acquise précocement empêcherait les contaminations fœtales, que l'on observe seulement lors d'une infection vénérienne chez la femme enceinte : l'atteinte congénitale est spécifique de la syphilis vénérienne.

UNE ORIGINE AFRICAINE?

Si les récentes découvertes plaident en faveur de l'existence d'une infection à Tréponèmes dans l'Ancien Monde avant 1493, on ignore encore s'il s'agissait d'une forme vénérienne. L'atteinte congénitale de Costebelle semble fournir un argument pour une transmission vénérienne. L'application de matériel génétique bactérien, par PCR, à partir d'ossements anciens devrait permettre aux anthropologues de préciser leur diagnostic.

L'épidémie de 1493 a été particulièrement meurtrière : cette virulence tient-elle seulement à une absence d'immunité des populations européennes face à un germe qui semblait pourtant pré-exister ? L'équipage de Colomb aurait-il rapporté une autre maladie, de contamination vénérienne, de gravité extrême, et qui aurait disparu au bout de quelques décennies ? La date de 1493 est-elle bien celle du début de l'épidémie de «grosse



Squelette du fœtus de Costebelle, présentant de nombreuses lésions osseuses, attribuées à une syphilis congénitale précoce.

vérole», bien que des cas aient été rapportés avant cette date ? Dès lors, cette épidémie n'aurait pas déferlé sur l'Europe à partir des Amériques, avec l'équipage de Colomb, mais elle aurait été introduite, vers 1460, dans la péninsule ibérique par les marins portugais fréquentant les côtes africaines.

L'explosion de l'épidémie de la fin du XV^e siècle et le retour de Colomb ne seraient alors que pure coïncidence, et l'Afrique serait le berceau de toutes les tréponématoses. On a récemment montré que des restes fossiles d'*Homo erectus* africain portent des lésions osseuses dues à une tréponématose qui ressemble au pian. Ainsi, cette maladie humaine aurait plus de un million d'années.

L'hypothèse d'un foyer africain concomitant des premières migrations humaines expliquerait une diffusion en Asie et en Amérique. On devrait donc trouver les diverses formes de tréponématoses répandues partout dans le monde depuis la Préhistoire. Une origine africaine pourrait expliquer les poussées limitées des tréponématoses en Europe dans l'Antiquité. Rappelons que dès le VI^e siècle avant notre ère, les Phéniciens, puis les Carthaginois et les Grecs ont exploré les côtes de l'Afrique occidentale, au moins jusqu'en Mauritanie ; plus tard, sous l'Empire romain, les contacts avec l'Afrique noire se multiplièrent, aiguillonnés par la recherche de l'or, d'épices, d'animaux sauvages destinés à l'amphithéâtre et d'esclaves africains.

L'absence de cas entre la fin de l'Antiquité et la fin du Moyen Âge peut tenir à une absence de recherche systématique, mais elle peut également être liée à la conjonction de plusieurs phénomènes : l'interruption des relations directes avec l'Afrique noire à la fin de l'Empire ; le ralentissement, puis l'arrêt presque total du grand commerce méditerranéen après le VII^e siècle ; la forte dépopulation due aux désordres économiques et militaires et à des épidémies de peste au VI^e siècle ; le renouvellement des populations par des peuples venus des pays froids et de l'Orient, apparemment non porteurs de tréponématoses. Le développement de la colonisation péennne, autorisé par la rupture du dogme colombien, pourrait, dans un avenir proche, permettre de compléter nos connaissances sur l'histoire des infections à Tréponèmes en Europe.

O. DUTOUL et C. BAËLE, CNRS URA 164

Faculté de médecine de Marseille
J.-P. BRUN, Centre archéologique du Var

L'origine de la syphilis en Europe, avant ou après 1493 ? Centre archéologique du Var, 1994, Éditions Errance.

Un crapaud envahisseur

Après l'avoir introduit sciemment, des biologistes australiens envisagent de l'éradiquer.

Le Laboratoire australien de santé animale fait circuler dans le monde entier une lettre surprenante : il propose à tout scientifique spécialiste de pathogènes, de parasites ou de maladies des amphibiens de collaborer à « l'important projet international : contrôler, voire supprimer les populations de crapauds de la cane à sucre ». Le laboratoire étudie déjà les pathogènes bactériens, et il souhaite avoir accès à d'autres souches bactériennes, virales, fongiques... mortelles pour les amphibiens. Le pullulement de l'animala, certes, de quoi déplaire, mais les mesures employées sont-elles judicieuses ?

Originaire d'Amérique du Sud, le crapaud de la cane à sucre, *Bufo marinus*, est le plus grand représentant du genre *Bufo*, avec un corps de longueur parfois supérieure à 30 centimètres. Connu de longue date pour sa voracité, il a été plusieurs fois introduit, notamment en Floride, en Louisiane et dans diverses îles des Caraïbes ou du Pacifique, pour lutter contre les pullulations d'insectes. En 1932, un rapport sur les résultats encourageants obtenus à Porto Rico per-

suada les planteurs de cane à sucre australiens de son utilité, leurs plantations étant ravagées par deux espèces de hannetons. Malgré quelques protestations locales, une centaine d'individus sont relâchés en 1935 dans une dizaine de plantations disséminées sur mille kilomètres de la côte Est. Rapidement, l'expérience est, du point de vue des planteurs, un échec : *Bufo marinus* ne peut escalader les tiges de cane, où se développent les insectes ravageurs. Dédaignant ces proies inaccessibles et un milieu dont le couvert végétal ne lui convient pas toute l'année, il quitte les plantations et envahit la côte du Queensland. Vorace et opportuniste, il mange aussi bien des insectes que des amphibiens, des lézards, des serpents et même, de petits marsupiaux. Très résistant, il s'accommode de tous les milieux, des prairies aux dunes côtières, des forêts aux faubourgs des cités. *Bufo marinus* prolifère et, 40 ans après son introduction, il occupe près d'un demi-million de kilomètres carrés. Là où il s'installe, les espèces à qui il dispute les aliments ou les sites de ponte disparaissent, ainsi que la plupart des pré-

dateurs habituels des amphibiens... qui meurent empoisonnés : le venin qu'il excrète violemment lorsqu'on le saisit est si nuisant qu'il cause des troubles graves voire mortels. Dépourvu de prédateur naturel (le serpent *Amphiesma mairii* semble le chasser occasionnellement), très prolifique, il pullule, fragilisant des espèces et démiques sensibles. Enfin il gêne les habitants, qui subissent régulièrement ses invasions et les appels incessants des mâles, en période de reproduction.

La décision du Laboratoire australien de santé animale a donc quelques fondements, mais elle inquiète : *Bufo marinus* étant le seul représentant du genre *Bufo* en Australie, l'agent pathogène choisi ne sera sans doute pas spécifique de l'espèce, de sorte qu'un individu contaminé, qui réussira à gagner un autre continent, risquera de propager une épidémie. Même si l'exploit semble biologiquement inconcevable (*Bufo marinus*, contrairement à ce qu'indique son nom, ne survit pas aux bains d'eau de mer), des introductions plus ou moins volontaires d'animaux pourraient être désastreuses.

Or de telles introductions sauvages d'amphibiens ne sont pas rares, et la dernière en date semble avoir eu lieu en France : on rencontrerait en effet, dans la région de Bordeaux, des grenouilles dont le corps atteindrait une vingtaine de centimètres de long, à l'appétit féroce et capables de capturer de petits mammifères. L'introduction de cette grenouille taureau, *Rana catesbaiana*, ne constitue pas une tentative biologique, mais serait le fait d'un touriste qui aurait rapporté quelques spécimens d'un voyage en Amérique. La grenouille taureau qui, comme la grenouille verte européenne, est très liée au milieu aquatique, semble s'être fort bien adaptée ; son aire de répartition s'étend, et l'on craint que les faunes de grenouilles locales pâtissent de sa concurrence.

Saurons-nous tirer à temps les leçons de la triste histoire de *Bufo marinus* ; ayant appris à mesurer les conséquences d'une introduction malheureuse, serons-nous plus prudents ? L'exemple de la vente, toujours légale en France, de « tortues de Floride », dont on sait le danger qu'elles représentent, ou la récente décision de l'Australie d'introduire une nouvelle espèce de scarabée afin d'éliminer les déjections canines des plages, dénotent une même vision à court terme et n'incitent guère à l'optimisme.

Sylvain DUFFAUD

Laboratoire de paléontologie des vertébrés et de paléontologie humaine, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI



Le crapaud *Bufo marinus* envahit l'Australie. Ici deux animaux s'accouplent.

Moécule de sommeil

Des lipides synthétisés dans le cerveau sont des narcotiques.

En 1994, Richard Lerner et ses collègues de la Clinique Scripps ont isolé du liquide céphalo-rachidien de chats privés de sommeil pendant 22 heures une molécule formée d'un long acide gras (une chaîne dont le squelette est composé seulement d'atomes de carbone, liés à des atomes d'hydrogène), terminé par un groupe amide. Après une difficile analyse chimique, l'administration à des animaux de laboratoire d'une molécule conforme à la formule identifiée a provoqué le sommeil. On a alors montré que la molécule est rapidement dégradée, dans le cerveau, en acide oléique.

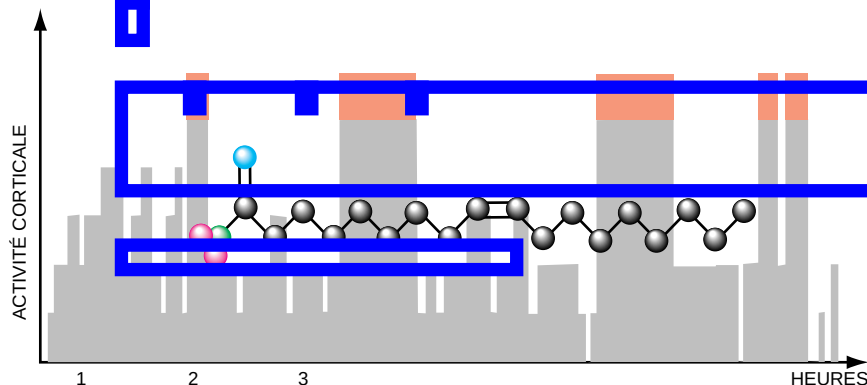
Ainsi se confirme une intuition du Français Henri Piéron, qui, au début du siècle, avait postulé l'existence d'une substance somnifère endogène, qui s'accumulerait progressivement au cours de la journée, déclencherait le sommeil au-delà d'un seuil de concentration et serait détruite lors du sommeil (Piéron avait recueilli du liquide céphalo-rachidien de chiens qui avaient été privés de sommeil, et l'avait injecté dans le cerveau d'autres chiens, obtenant leur endormissement dans les deux à six heures).

Toutefois la découverte de R. Lerner ne résout pas le problème de l'endormissement. Il y a une trentaine d'années, Michel Jouvet étudiait déjà des molécules analogues, mais beaucoup plus courtes (quatre atomes de

carbone au lieu de 17, sur le squelette), qui provoquaient le sommeil paradoxal (caractérisé par des mouvements oculaires rapides) chez le chat, et, depuis, les physiologistes ont découvert de nombreuses molécules qui induisent un sommeil analogue au sommeil naturel, avec des alternances de sommeil paradoxal et de sommeil léger : la prostaglandine D, le peptide somnifère delta, l'interleukine 1, l'interféron alpha 2, la sérotonine, le facteur de nécrose des tumeurs... Simultanément on observait que les barbituriques et l'alcool éthylique, au contraire, suppriment le sommeil paradoxal, et que les benzodiazépines réduisent le sommeil léger. Des centres cérébraux variés sont activés par les diverses substances, et des injections de composés qui bloquent les récepteurs de ces dernières, ou inhibiteurs, provoquent des insomnies.

L'amide découvert par R. Lerner et ses collègues n'est-il qu'une molécule de plus dans la longue liste des somnifères endogènes? Selon Jean-Pierre Sastre de l'Université Claude Bernard, à Lyon, la molécule marque une nouvelle étape dans l'étude de ces composés. Après 30 ans d'éclipse, les lipides réapparaissent en physiologie du sommeil (les acides gras sont des lipides). En outre, W. Dement et ses collègues ont observé qu'un autre amide acide carboxylique à longue chaîne suscite les mêmes réactions physiologiques et comportementales que la molécule active de l'marijuana et du haschisch,

dont la structure est différente. On sait que les membranes cérébrales peuvent synthétiser ce nouvel amide à partir des molécules de phospholipides qui constituent les membranes cellulaires, de sorte que, si l'on a perdu l'espoir de trouver un centre du sommeil unique, dans le cerveau, on espère néanmoins élucider une voie de biosynthèse d'une molécule somnifère de l'organisme.



Une molécule constituée d'un long acide gras (les boules noires représentent les atomes de carbone) et d'un groupe amide (à gauche) est somnifère. Elle provoque un sommeil normal, avec une alternance de phase de sommeil léger et de sommeil paradoxal (en orange).

Microscopie et chimie

Des programmes aident à interpréter les images de molécules formées par microscope à effet tunnel

Les chimistes ont cru que le microscope à effet tunnel, inventé par H. Rohrer et G. Binnig, aux Laboratoires de recherche IBM à Zurich, réaliserait un vieux rêve : leur montrer les molécules avec une résolution quasi atomique. Pourtant l'étude de molécules même simples les a surpris : le benzène, molécule hexagonale, est apparu sous la forme d'un motif triangulaire, l'éthylène, qui comprend deux atomes de carbone, ne montre qu'une bosse dans l'image. Alors ?

Alors les physiciens ont progressivement compris que le microscope à effet tunnel ne fournit pas une image de la forme des molécules, mais une représentation complexe de leur structure électronique. Le problème de l'interprétation des images a limité son application à la chimie jusqu'à ce que, récemment, des techniques de simulation permettent d'interpréter ces images et de comprendre comment l'aspect du motif moléculaire est relié à la structure électronique chimique des molécules étudiées.

Dans les nouveaux microscopes à effet tunnel, une pointe très fine (quelques atomes de diamètre à l'extrémité) est approchée d'un échantillon, de sorte qu'un courant électrique «tunnel»

s'écoule entre la pointe et le matériau : en mesurant ce courant, qui augmente quand la pointe se rapproche de l'échantillon, on détermine le relief de ce dernier. Par un balayage de la pointe au-dessus de la surface, on obtient des cartes de l'objet étudié.

Ces cartes ne représentent pas exactement le relief atomique, car ce sont des «vues électroniques», qui dépendent à la fois de la géométrie des surfaces et de la probabilité de présence, sur la pointe, des électrons de conduction issus du matériau. Ainsi S. Chiang et ses collègues du Centre de recherche IBM d'Almaden ont étudié un arrangement ordonné de molécules de benzène (molécule hexagonale) sur du rhodium : chaque motif observé représentait une molécule de benzène, mais il comportait trois lobes arrangés en triangle équilatéral avec une petite dépression en son centre. Pourquoi ne voyait-on pas plutôt un hexagone à six lobes ?

Paul Weiss et Don Eigler, également à Almaden, ont obtenu des images de la même molécule, mais isolées sur une surface de platine (voir la figure 1) : une première image ressemble à celle qui a été obtenue par S. Chiang, avec trois bosses en triangles ; une deuxième

image est une simple bosse ; et la troisième est comme un volcan cylindrique, avec une petite dépression à son sommet. Le même problème d'images multiples et difficiles à interpréter se pose pour le monoxyde de carbone.

DES ÉLECTRONS PROPAGÉS

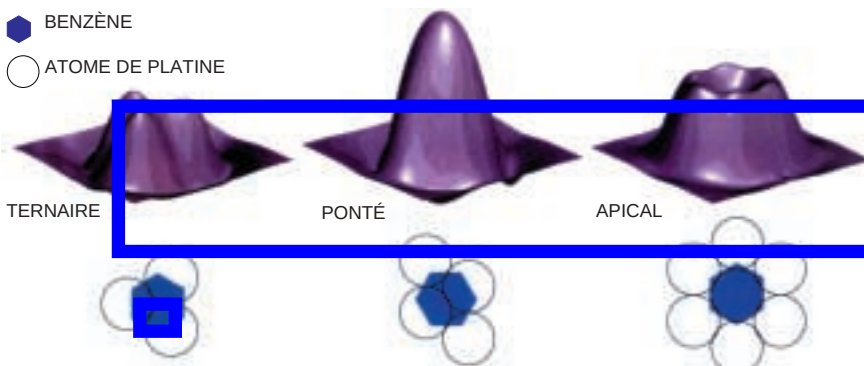
Afin d'explorer de tels mystères, Christian Joachim, du CNRS à Toulouse, et nous-mêmes avons mis au point une méthode de simulation numérique qui calcule le courant tunnel entre une pointe et une surface où a été placée une molécule. Nous considérons que le courant tunnel résulte de la diffusion des électrons et nous calculons la probabilité que ces électrons soient réfléchis ou transmis dans l'espace pointe-surface. Ainsi que le montre la figure 2, nous représentons l'échantillon comme la répétition semi-infinie d'une cellule de base, avec au-dessus une couche de surface et la molécule. La pointe est constituée par un agégat (4 à 13 atomes), surmonté par d'autres répétitions de la cellule de base. On «recolle» les extrémités gauche et droite afin d'éviter les effets de bord.

À cette échelle, la nature quantique des phénomènes impose de calculer la probabilité de transmission à partir de la fonction d'onde associée aux électrons de conduction. Pour simplifier le calcul, on utilise des «propagateurs spatiaux» qui permettent, quand on connaît la fonction d'onde d'un électron sur une partie du système, d'obtenir de proche en proche la valeur de la fonction d'onde sur la totalité de celui-ci. Cette approche permet de déterminer la valeur du courant tunnel tout en évitant de résoudre complètement l'équation de Schrödinger. On effectue alors un balayage de la pointe au-dessus de la surface à l'identique de la procédure expérimentale, calculant le courant tunnel à chaque position pour constituer l'image simulée.

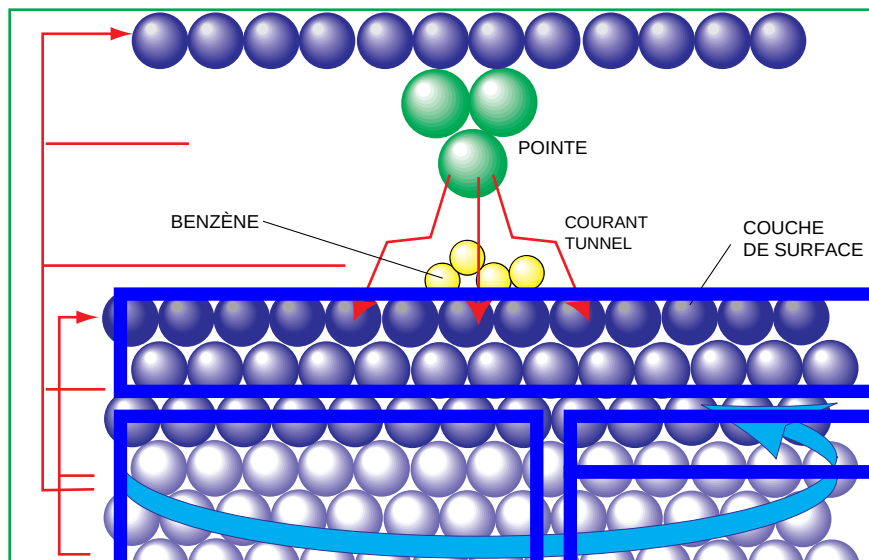
Dans notre programme, nous avons calculé les images correspondant à de nombreuses observations : atomes de soufre sur des surfaces de rhénium et de platine, molécules de benzène sur du rhodium, monoxyde de carbone sur du platine, etc. Nous examinerons ici comment ces calculs expliquent les images obtenues par l'étude du benzène sur du platine.

BENZÈNE SUR PLATINE

Pourquoi le benzène peut-il former trois types d'images différentes ? Parce qu'il peut se disposer de plusieurs façons sur une surface. La physico-chimie des sur-



1. Trois calculs par ordinateur de l'image de la molécule de benzène qui devrait être donnée par la microscopie à effet tunnel. Pour chaque image, on considère l'adsorption du benzène en un site différent du réseau métallique : site ternaire, ponté ou apical. Ces images ont une taille latérale de 1,2 nanomètre de côté et leur hauteur est respectivement 0,05, 0,1 et 0,06 nanomètre. Elles démontrent que l'image d'une molécule n'est pas univoque, mais dépend fortement de la symétrie de son interaction avec la surface.



2. Pour calculer le courant tunnel, on représente les molécules comme une répétition d'un motif de base. On recolle les bords latéraux afin d'éviter les conditions aux limites et l'on calcule la fonction d'onde des électrons de proche en proche, groupe d'atomes par groupe d'atomes (flèches rouges à gauche).

faces indique que la molécule se place à plat sur la platine, car cette position correspond à une énergie d'interaction minimale. Cependant les monocristaux de platine ne sont pas parfaitement plats et uniformes, à l'échelle atomique : dans les cristaux utilisés par D. Eigler, la surface apparaît comme un arrangement triangulaire d'atomes. Ainsi la molécule de benzène peut disposer son motif hexagonal au-dessus de plusieurs sites (de symétries différentes) du platine.

Les positions de haute symétrie, qui minimisent l'énergie d'interaction entre le benzène et la surface, sont : un site ternaire, où le benzène est lié à trois atomes de platine : un site « ponté », où le benzène est lié à deux atomes ; et un site « apical », où la molécule est au-dessus d'un atome de platine seulement. Pour chaque site, plusieurs orientations du benzène sont possibles, mais l'examen des modèles atomiques ne prévoit pas de déformation du benzène sur les différents sites, alors que les trois images expérimentales sont très différentes.

Les simulations expliquent les images : avec les sites ternaires, on obtient des images simulées qui possèdent une forte symétrie d'ordre trois ; pour une orientation du benzène par rapport au métal, on obtient des images à trois lobes, et pour une autre orientation, l'image calculée présente une seule bosse, mais de forme triangulaire. Lorsque la molécule est en position pontée, l'image présente une bosse simple très proche de la deuxième image expérimentale, tandis que le site apical conduit à une image avec une symé-

trie d'ordre six et une apparence proche d'un voca.

Ces études ne se limitent pas à expliquer les images surprenantes qui avaient été obtenues ; elles révèlent en outre les mécanismes de la formation des images et notamment, du courant tunnel. Ce dernier est composé de deux parties : le courant qui « passe par la molécule », c'est-à-dire qui résulte de l'interaction de la pointe avec les orbitales de la molécule adsorbée, et qui n'est important que lorsque la pointe est juste au-dessus de la molécule, et le courant qui « passe par la surface », uniforme loin de la molécule, mais modifié à son voisinage. L'image donnée par le microscope résulte de la combinaison de ce courant par la surface et du courant par la molécule, lequel dépend de son interaction avec les atomes de la surface et explique la structure du motif moléculaire en fonction de la symétrie du site.

Cet exemple démontre que les simulations donnent plus à voir que les images seules : assistée par la simulation, la microscopie à effet tunnel est une sorte d'exceptionnelle, qui renseigne indirectement sur la constitution atomique des surfaces et de leurs adsorbats. Elle indique en outre la probabilité de présence électronique pour les niveaux moléculaires proches de l'énergie de Fermi de la surface. Cette information est cruciale pour comprendre la réactivité potentielle de la molécule et les mécanismes atomiques des réactions chimiques sur les surfaces.

Philippe SAUTET et Marie-Laure BOCQUET
École normale supérieure de Lyon
et Institut de recherches sur la catalyse

FRANCE
Culture
Palais de la découverte

SCIENCE

VOUS INVITENT
À L'ENREGISTREMENT
PUBLIC

DE L'ÉMISSION :
L'IMPOSSIBLE

**Les impossibles
de
l'agriculture**

avec
GUY PAILLOTIN
président de l'INRA

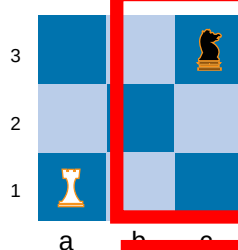
LE SAMEDI 9 MARS 1996
À 15 HEURES
AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
SALLE DE CINÉMA
AVENUE FRANKLIN D. ROOSEVELT
75008 PARIS

LE JEU-CONCOURS N°20

par Pierre TOUGNE

TOUR CONTRE CAVALIER

Aux échecs, le Cavalier, du fait de son déplacement particulier, échappe toujours, sauf dans quelques positions particulières, à une pièce à longue portée comme la Tour. Cependant, sur un échiquier plus petit, il n'en est pas de même. Ainsi sur un échiquier 3×3 , la Tour étant sur la case a1 et jouant la première prend un Cavalier situé sur la case c2 en au plus trois mouvements.



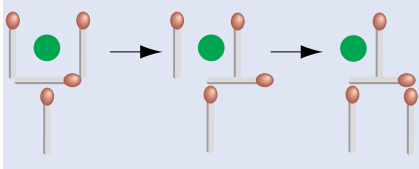
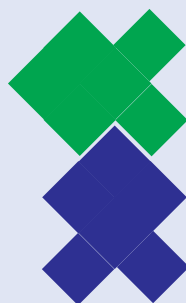
1. Tc1;Ca2
2. Tc2;Cc2 (ou Cc3)
3. Tx.C.

Pour ce jeu-concours, sauriez-vous trouver le nombre maximal de mouvements et la stratégie d'une Tour jouant la première à partir de la case en bas et à gauche de l'échiquier pour capturer un Cavalier partant de la case en haut et à droite de l'échiquier sur des échiquiers 4×4 , 5×5 et 6×6 ?

Envoyez vos réponses à Pour la science, 8, rue Férussac, 75006 Paris. Parmi les réponses reçues en février 1996, dix gagnants recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°18

Au premier problème, les lecteurs ont trouvé une autre solution, symétrique, mais pas superposable.



L'origine des rayons cosmiques

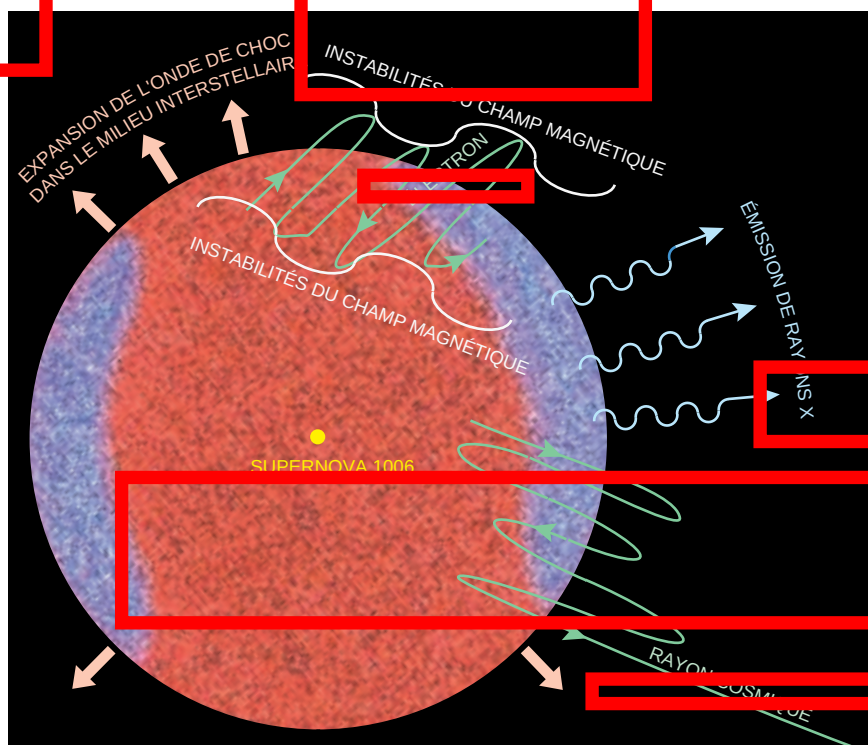
Les supernovae sont des sources de rayons cosmiques de haute énergie.

Malgré leur nom trompeur, les rayons cosmiques sont des particules ; ce sont même les particules les plus énergétiques de l'Univers. Depuis leur découverte au début du siècle, deux mystères ont confondu les astrophysiciens. Le premier est l'origine des rayons cosmiques galactiques, et le second la cause de leurs fabuleuses énergies. En utilisant le satellite X japonais ASCA pour observer les restes d'une étoile qui a explosé en l'an 1006, nos collègues ont détecté au bord de la sphère dispersée l'onde de choc d'une supernova ou explosion stellaire de rayons X engendrés par des électrons accélérés jusqu'à 10^{14} électronvolts.

Les rayons cosmiques galactiques sont des noyaux atomiques, principalement d'hydrogène (des protons), mais

aussi de tous les autres éléments de la Classification périodique ; des électrons et quelques antiparticules sont également présents dans ce flux cosmique. Sur la Terre, le nombre de ces particules par unité de surface et par unité de temps est proportionnel à leur énergie à la puissance $1/2$, (loi de puissance), à partir d'une énergie de l'ordre de 10^8 électronvolts (aux énergies inférieures, ils sont noyés dans le flot de particules produites par le Soleil) jusqu'à plus de 10^{20} électronvolts, soit une dizaine de joules. Une telle énergie est inégalée sur la Terre : l'énergie maximale à laquelle le futur grand collisionneur européen accélère les particules est dix millions de fois inférieure.

On détecte les rayons cosmiques soit à partir de satellites, soit, pour les plus énergétiques, par les produits de leur



L'onde de choc de la supernova 1006 (bord du disque) se propage à grande vitesse dans le milieu interstellaire. Des rayons cosmiques (flèches vertes), créés par la supernova, sont accélérés en rebondissant de part et d'autre de l'onde de choc, entre des instabilités du champ magnétique. Les électrons ainsi accélérés émettent des rayons X (zones violettes) par un mécanisme différent de celui qui s'observe au centre du reste de supernova (zone rouge). Les rayons cosmiques finissent par s'échapper de la région accélératrice.

collisions avec les molécules de l'atmosphère. Malheureusement, les rayons cosmiques chargés électriquement, ont une trajectoire hélicoïdale autour des lignes de champ magnétique du cosmos, de sorte qu'il est impossible d'en discerner la provenance.

L'ACCÉLÉRATION DES RAYONS COSMIQUES

Comment ces rayons cosmiques sont-ils produits ? Lorsqu'une balle rebondit entre deux raquettes qui se rapprochent, son énergie cinétique augmente. La théorie de l'accélération des rayons cosmiques, proposée en 1977, se fonde sur le même phénomène : les particules acquerraient leur énergie en rebondissant entre des zones où le champ magnétique est irrégulier, de part et d'autre de l'onde de choc d'un reste de supernova en expansion dans le milieu interstellaire. À l'intérieur de la bulle formée par la sphère en expansion, les irrégularités sont produites par la turbulence ambiante. Dans le milieu interstellaire, ce sont les rayons cosmiques eux-mêmes qui engendrent les instabilités nécessaires aux rebonds. Cette théorie explique le flux observé jusqu'à 10^{14} électronvolts.

Le satellite ASCA a observé deux composantes dans l'émission X du reste de la supernova 1006. Au centre, une émission résulte du rayonnement thermique d'un plasma à une température de 20 millions de degrés. Cette température est atteinte par la matière qui se trouve derrière l'onde de choc, laquelle se propage dans le milieu interstellaire à plusieurs milliers de kilomètres par seconde. Aux bords du reste de supernova, des rayons X ont, comme les rayons cosmiques un spectre en loi de puissance. Ce spectre, qui s'étend jusqu'à 10 000 électronvolts, est caractéristique de l'émission d'électrons se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière. En estimant le champ magnétique dans l'onde de choc (un milliardième de tesla soit 40 000 fois moins que le champ magnétique terrestre) on trouve, pour les électrons émettant les photons X observés, une énergie maximale d'environ 10^{14} électronvolts.

À ces énergies, les protons et les autres ions sont accélérés par le même mécanisme. Cette observation est donc la première confirmation observationnelle de la théorie de l'accélération. Pour le moment, la supernova 1006 est l'unique exemple d'accélération des rayons cosmiques jusqu'à une énergie de 10^{14} électronvolts, mais les astrophysiciens prévoient d'utiliser les prochains satellites X, afin de rechercher d'autres sources de rayons cosmiques. □

La myrrhe

Elle contient des substances analgésiques.

Les Rois mages ont offert à l'Enfant Jésus de l'or, de l'encens et de la myrrhe. La myrrhe était utilisée par les Égyptiens pour les embaumements, et par les Juifs comme huile d'onction. Hippocrate la recommandait pour accélérer la cicatrisation des plaies et les Romains pour traiter les infections oculaires et buccales, ou encore la toux. Du vin contenant de la myrrhe a été offert au Christ avant la Crucifixion.

Cette résine aromatique tirée du balsamier, un arbuste des régions chaudes, est-elle réellement des vertus thérapeutiques ? Pour le savoir, Piero Dolara de l'Université de Florence, a administré à des souris une solution contenant de la myrrhe et a observé leurs réactions : placées sur une plaque chauffante, elles résistent plus longtemps à la douleur que les souris témoins. L'équipe italienne a ensuite analysé par diverses méthodes les constituants d'une telle solution. Elle a découvert des sesquiterpènes, des molécules connues, mais dont on ignorait les effets biologiques.

Le composé le plus abondant du mélange (60 pour cent) est le furanoeudesma 1, 3-diène : les deux autres sont le curzène et le furanodiène. Ce dernier n'a pas d'action analgésique, mais les deux autres semblent interagir avec les récepteurs cérébraux des opiacés ; le furanoeudesma 1, 3-diène a une action analgésique proche de celle de la morphine (à concentrations équivalentes). La présence de deux analgésiques dans la myrrhe confirmerait la sagesse des Anciens.



La résine de myrrhe (en brun), qui suinte du tronc, contient deux analgésiques.

Réformes de l'orthographe

Depuis 300 ans, la moitié des mots ont changé d'orthographe.

Faut-il simplifier l'orthographe ? Les adversaires des réformes essaient d'en retenir la « pureté de la langue » en organisant des concours de dictée où ils accumulent les difficultés et les exceptions. Plus de la moitié des mots de la première édition du *Dictionnaire de l'Académie française*, en 1694, ne nous sont toutefois parvenus qu'après une ou plusieurs modifications graphiques. Les arbitres des concours d'orthographe auront donc fort à faire si les candidats se réclament du *Dictionnaire historique de l'orthographe française* (1995, éditions Larousse, par N. Catach, J. Golfand, O. Meltas, L. Pasquas-Biedermann, C. Sorin et S. Baddeley) qui rassemble l'histoire de ces transformations. Ces variantes témoignent de l'hésitation et de la lutte entre le courant d'orthographe étymologique, et une graphie simplifiée et modernisée.

Nous avons étudié les modifications graphiques des 17 241 entrées de la première édition du *Dictionnaire de l'Académie française*. L'orthographe de ces mots a été comparée à celle sous laquelle ils apparaissent dans les sept éditions postérieures, dont la dernière date de 1935 (la publication d'une nouvelle édition est en cours), ainsi que dans les trois premiers dictionnaires français qui précédaient : le *Dictionnaire francoislatin* de Robert Estienne paru en 1549, sa révision par Thierry en 1564 et le *Thresor de la langue françoise, tant ancienne que moderne*, publié par Nicot en 1606.

Les modifications graphiques qui concernent l'accentuation sont, de loin, les plus fréquentes : 27,69 pour cent du nombre total. L'introduction de l'accent aigu, comme dans *délit*, ou en remplacement de l'ancien s muet, comme

dans *dépit*, représente 21,22 pour cent de l'ensemble des modifications répertoriées.

Cette mise en place des accents correspond à la modernisation du système graphique du français, mettant en jeu les deux grands principes qui caractérisent l'histoire de son écriture. Le principe d'écriture phonogrammique assure un meilleur accord entre le son et la graphie, et facilite l'écriture et la lecture. Le principe d'écriture sémiographique, ou distinctif, qui explique par exemple l'introduction des accents dans les homophones grammaticaux (tels à et a, où et ou) répond au souci de la distinction des sens au moyen de la gra-

phie, écrite ainsi en 1549 et 1564, le d muet final du masculin, d'origine étymologique (du latin *viridis*), que l'on retrouve dans *verdure* par exemple, s'aligne au XVIII^e siècle sur le féminin et devient *verte* / *verte*.

En revanche, la série des finales développées du féminin en *-isse* ou en *-ive*, du type *apprentif* / *apprentive*, *apprenti* / *apprentissage*, que l'on trouve en 1694, disparaît au début du XIX^e siècle au profit de la finale courte du féminin en *-ie*, alignée sur l'ancien masculin en *-i*. L'opposition entre le masculin et le féminin en *-ie* qui, aux XVIII^e et XIX^e siècles, reposait sur une opposition de durée perceptible à l'oral a été réduite à une opposition graphique.

Les mots composés ont aussi subi de nombreuses modifications. La tradition ancienne d'écriture soudée (les signes auxiliaires tels que l'apostrophe et le trait d'union n'étant pas en usage avant le XV^e siècle) s'est opposée à l'écriture en termes séparés qui met en valeur la composition.

Pour un mot du vocabulaire courant, tel *plafond*, du XVI^e siècle, composé de *plat* et de *fond*, Thierry et Nicot retiennent la forme soudée, au pluriel, *plafonds*, avec maintien de la consonne finale muette du

premier élément. En

1694, l'Académie retient le mot au singulier et présente cinq variantes graphiques :

plafond, *plafond*, *plat fond*, *plat-fond* et *pla-fond*.

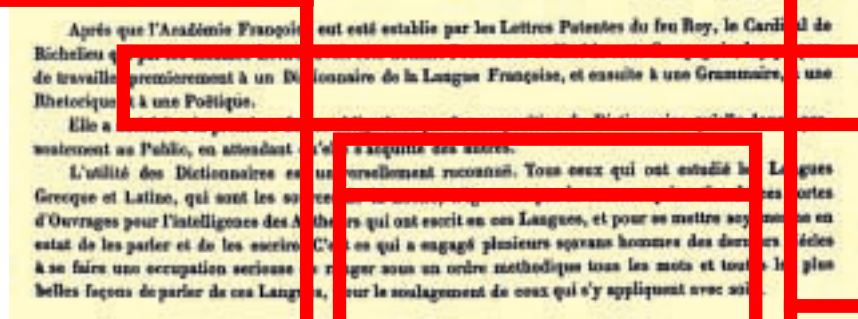
L'édition de 1718 retient la forme soudée, *plafond* et la forme en deux

termes avec trait d'union, *plat-fond*, qui fait apparaître la composition mor-

phologique. Ces deux variantes sont soudées dans l'édition de 1740 : *plafond*, *plafond*. La soudure, accompagnée de la suppression de la consonne finale du premier élément, conformément à la prononciation, l'a emporté en 1762.

Une dernière victoire du courant d'orthographe modernisée mérite d'être mentionnée : en 1833, l'Académie admet l'écriture en *ais* / *ait* des désinences de l'imparfait (il *allait*), en remplacement des formes anciennes en *ois* / *oit* (il *alloit*). Les traités de grammaire attestent que ce choix n'est que le reflet d'un usage de prononciation en cours depuis le XVII^e siècle. Près de deux siècles ont été nécessaires pour que l'écrit, ici, rejoigne l'oral.

Liselotte BIEDERMANN-PASQUES
CNRS – HESO



La préface de la première édition du *Dictionnaire de l'Académie française*, en 1694 (ici reproduite dans l'édition de 1970) permet de mesurer l'évolution de l'orthographe du français.

phie, présent dans les plus anciens traités d'orthographe.

Les changements de catégorie grammaticale entrent pour 12,39 pour cent dans les modifications orthographiques. Ils concernent l'histoire de la notation du pluriel, du genre, le changement de désinence et l'apparition de nouvelles désinences du féminin ou du masculin.

DISTINGUER LE MASCULIN DU FÉMININ

Les modifications des marqueurs de genre sont particulièrement intéressantes. Elles vont souvent dans le sens de l'apparition d'une marque audible pour noter l'opposition entre le masculin et le féminin. Dans des adjectifs tels que *verd* /

Chémokines

*Elles bloquent
la réplication du VIH.*

Le virus de l'immunodéficience humaine, le VIH, responsable du SIDA, endommage le système immunitaire jusqu'à le détruire. Dès 1986, Jay Levy, à l'Université de San Francisco, avait montré que les lymphocytes CD₈ (une catégorie de globules blancs) peuvent empêcher le virus de se multiplier, mais la (ou les) substance(s) responsable(s) de cette inactivation n'avait pas encore été identifiée. Elle l'est aujourd'hui : une combinaison de trois molécules vient d'être identifiée comme étant le «facteur de Levy».

J. Levy avait montré que les lymphocytes CD₈ inhibent la réplication du VIH, en libérant des facteurs solubles, et que le pouvoir inhibiteur des lymphocytes CD₈ des patients avant atteint le stade SIDA diminue. Robert Gallo, à l'Université de Maryland, et Paolo Lusso, à l'Institut Saint Raphaël de Milan, ont cherché à savoir quels sont ces facteurs : ils ont analysé les molécules libérées par une lignée particulière de lymphocytes CD₈, et ont identifié trois chémokines (des molécules qui participent aux mécanismes inflammatoires) : RANTES, M1P1 α et M1P1 β .

Effectivement, ces molécules bloquent *in vitro* la réplication des lymphocytes CD₄ infectés par le VIH ; RANTES a une action supérieure à celle des deux autres facteurs, mais un mélange des trois facteurs est notablement plus efficace que chacun des facteurs pris séparément. De surcroît, ces facteurs agissent à faible concentration.

Simultanément, Reinhard Kurth, de l'Institut Paul Ehrlich, à Langen, en Allemagne, a montré qu'un messenger chimique récemment découvert, l'interleukine 16, inhibe aussi la réplication du VIH.

Plusieurs questions restent ouvertes : ces chémokines sont-elles bien les facteurs de Levy ? Dans quelle mesure contrôlent-elles la multiplication virale, *in vivo* ? Leur concentration détermine-t-elle la durée de la phase asymptomatique ? Et surtout, quelles sont les applications thérapeutiques potentielles de ces molécules ? Quoi qu'il en soit, tandis que l'on mesure les limites des traitements antiviraux dont on dispose aujourd'hui, et qu'un vaccin contre le VIH reste encore hypothétique, ces molécules semblent être une voie de recherche à explorer. □

Hipparcos : premiers résultats

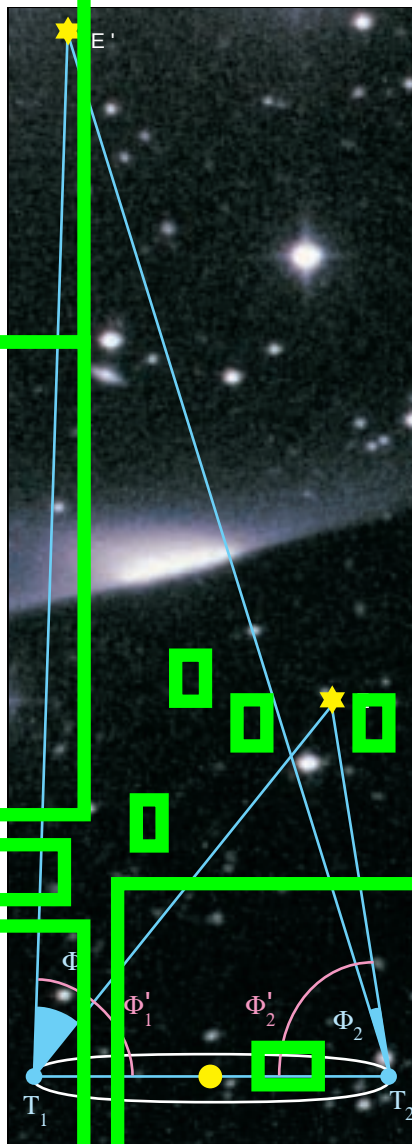
De nombreuses étoiles de notre voisinage sont plus éloignées et, donc, plus lumineuses et plus massives qu'on ne le croyait.

Empoignant la première mission spatiale dédiée à des mesures astronomiques, et lancé par *Ariane 4* en août 1989, le satellite HIPPARCOS a accumulé les observations pendant 37 mois. Depuis qu'il s'est arrêté de fonctionner, deux équipes se sont employées à réduire, par des méthodes indépendantes, la gigantesque quantité de données accumulées ; elles viennent de publier un premier aperçu de leurs résultats, parfaitement concordants : la précision des mesures est excellente, meilleure même que celle que l'on espérait au départ, avant le malheureux événement qui, peu après le lancement, avait failli réduire à néant la mission. Les premiers résultats portant sur les distances sont spectaculaires : plus du tiers des étoiles que l'on situait jusqu'ici à moins de 85 années de lumière se révèlent nettement plus éloignées.

On s'en souvient, le moteur qui devait placer le satellite sur l'orbite géostationnaire, à 36 000 kilomètres d'altitude, n'a pas fonctionné et HIPPARCOS est resté sur une orbite très excentrique, avec tous les inconvénients que cela entraîne : traversée régulière (quatre fois par jour) des ceintures de radiations dommageable au télescope, relativement longues périodes pendant lesquelles les observations ne sont plus possibles, nécessité d'équiper deux autres stations au sol, de telle sorte qu'il y en ait au moins une, à chaque instant, susceptible d'observer le satellite et, donc, de recueillir les données qui ne peuvent être stockées à bord.

PRÉCISION DE MESURE ACCRUE SUR SATELLITE

L'une des missions principales d'HIPPARCOS était de mesurer la distance des étoiles avec une précision inégalée, due au fait que la turbulence atmosphérique ne brouille plus les images, comme c'est le cas au sol, et que l'état d'impensable réduit beaucoup les déformations mécaniques subies par le télescope et les instruments de mesure. Alors qu'on



La méthode classique pour mesurer la distance d'une étoile E consiste à mesurer deux angles de visée Φ pour deux positions de la Terre à six mois d'intervalles. L'angle Φ est l'angle que fait la direction de visée de l'étoile par rapport à une étoile lointaine dont on connaît l'éloignement. De la valeur de ces deux angles Φ_1 et Φ_2 , on détermine la distance de l'étoile E . HIPPARCOS mesure directement les angles Φ'_1 et Φ'_2 avec suffisamment de précision pour déterminer le triangle ET_1T_2 , sans passer par une étoile E' .

Connaissant jusqu'ici de façon relativement précise la distance de quelques centaines d'étoiles, HIPPARCOS vient d'effectuer cette mesure pour 118 000 étoiles : les astronomes sont maintenant en passe de connaître la distance et, en conséquence, les propriétés physiques telles que la masse ou la luminosité de l'ensemble de ces étoiles.

Les astronomes déterminent les distances des étoiles relativement proches en mesurant leurs parallaxes ; pour cela, ils mesurent les positions angulaires des étoiles à six mois d'intervalle : connaissant la distance entre les deux positions diamétralement opposées de la Terre sur son orbite (300 millions de kilomètres) et les deux angles de visée, ils résolvent le triangle formé par l'étoile et les deux positions de la Terre, ce qui permet d'en déduire l'éloignement de l'étoile (voir la figure). Évidemment, plus l'étoile est éloignée et moins la mesure est précise ; grâce à HIPPARCOS, le nombre d'étoiles dont la distance est connue à mieux que 20 pour cent est passé de quelques centaines à plus de 30 000... Un tel accroissement du volume d'espace arpenté permet d'atteindre, pour la première fois, les étoiles rares, parce qu'elles ont une durée de vie courte, et, en particulier, celles de grande luminosité.

L'étude préliminaire des données accumulées pendant les 30 premiers mois d'observation montre que, parmi les 1 770 étoiles observées par HIPPARCOS et que l'on pensait plus proches que 85 années de lumière, 718 d'entre elles sont en fait plus éloignées : la luminosité qu'on leur attribuait, en fonction de leur éclat apparent et de leur distance sous-estimée, était donc trop faible. Un tel effet était prévisible, les mesures de distances étant affectées d'erreurs importantes ; parmi l'ensemble des étoiles dont on pensait que leur éloignement était inférieur à 85 années de lumière, un nombre important sont plus éloignées, leur distance a été sous-estimée. On ne s'attendait pas à ce que les différences soient aussi importantes.

Comme les étoiles très lumineuses sont justement celles qu'il est possible d'observer individuellement dans les galaxies extérieures, on conçoit que cette découverte ait une conséquence importante sur la mesure des distances extragalactiques ; si la luminosité des étoiles est plus grande que ce qu'on imaginait, cela signifie que leur éclat apparent, tel qu'on l'observe dans ces galaxies, résulte d'une distance supérieure à celle qu'on avait évaluée jusqu'alors. Il faut attendre les études plus détaillées pour connaître l'importance de cet effet sur l'échelle des distances extragalactiques et l'âge de l'Univers.

Lucienne GOUGUENHEIM

L'imaginaire monstrueux

JEAN-LOUIS FISCHER

Pendant plusieurs millénaires, l'homme a imaginé que des êtres monstrueux vivaient dans des contrées reculées. Nés de l'imagination ou repris de récits fabuleux, ces monstres exerçaient à la fois fascination et crainte.

Quand, au XVIII^e siècle, Carl von Linné entreprend sa monumentale classification des espèces, il laisse une place à *Homo monstruosus*, une espèce rattachée à *Homo sapiens*, mais de caractéristiques notablement différentes. Comme nombre de ses prédécesseurs, Linné pense que des contrées lointaines sont peuplées de créatures semi-humaines. Rapportés par les explorateurs et les grands voyageurs, ces récits étaient vraisemblablement fondés sur l'observation de personnes difformes et d'enfants anormaux, mort-nés ; quelque exagération n'allait sans doute du désir de briller devant l'auditoire. Les monstres foisonnaient : personnages à tête minuscule, à tête de dauphin, sans tête, à tête de chien, d'éléphant, à bec d'oiseau, etc. Pourquoi l'homme a-t-il imaginé ces monstres ? Quelle en a été la fonction ? Quelle en est l'interprétation ?

L'historien des sciences divise l'étude des monstres en trois grandes périodes, définies par Isidore Geoffroy Saint-Hilaire (1805-1861) : une période fabuleuse, une période positive-préscientifique et une période scientifique. La première, longue, concerne les monstres, décrits de la haute antiquité jusqu'à la fin du XVII^e siècle. La deuxième époque correspond au siècle des Lumières et la dernière période commence dans les années 1820.

Au cours de la première période, d'après les textes anciens, le monstre est un « signe envoyé par les dieux » ou un

« prodige qui annonce une guerre » ; le monstre tient du merveilleux et de l'extraordinaire. De plus, le monstre est rare, et la rareté étonne. Hérodote décrit une race d'hommes aux pieds de chèvre, une autre d'hommes hibernant pendant six mois, d'autres mi-hommes mi-lions, ou mi-hommes mi-aigles. Les cyclopes ont été contés tant par Hérodote que par Homère. Alexandre le Grand rapporte avoir battu des « hommes qui ont six pieds et trois yeux », des « hippocentaures », des « acéphales » ou des « sciapodes ». Plusieurs auteurs romains ont perpétué cette tradition du monstre et, comme les auteurs s'inspiraient souvent des anciens textes, les récits ne faisaient

qui rejettent toute intervention de Dieu dans les formations monstrueuses). Au XVIII^e siècle, la tératologie fait l'objet de débats qui favoriseront l'étude des monstres : si percer les secrets de la monstruosité est l'occasion de découvrir pour certains savants une production divine, et pour d'autres les phénomènes de la vie, c'est, dans tous les cas, donner une réalité aux monstruosité.

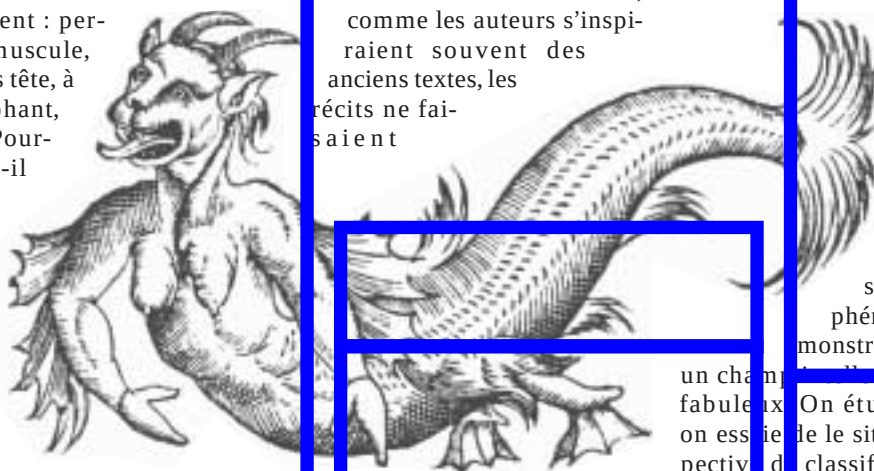
Le premier cas est illustré par les prises de position, au début du XVIII^e siècle, de l'anatomiste français Joseph Duverney, qui, traitant des monstres,

fait l'éloge de la « richesse de la mécanique du Créateur ». Vers la fin du siècle des Lumières, Albrecht von Haller, physiologiste et embryologiste suisse, s'émerveille de ces phénomènes naturels. Le monstre est alors placé dans

un champ fabuleux. On étudie son anatomie, on essaie de le situer dans une perspective de classification, on le rationalise. Le monstre n'étonne plus et prépare son entrée dans sa période scientifique. Décrire, nommer et classer les monstres furent les objectifs des

Geoffroy Saint-Hilaire.

C'est en 1800 qu'Isidore Geoffroy Saint-Hilaire nomme la science des monstres la tératologie. Objet de science, le monstre devient objet de comparaison, de réflexion en anatomie, en embryologie et dans l'élaboration des théories transformistes qui ont précédé les théories de l'évolution.



La période positive commence au moment où les « savants » ne considèrent plus le monstre comme un prodige, mais comme une production naturelle qui répond soit à des lois d'ordre divin (pour ceux qui pensent que Dieu est responsable des naissances monstrueuses), soit à des raisons d'ordre mécanique (pour ceux

D'abord descriptive, la tératologie devient science expérimentale à la fin des années 1850 avec le médecin Camille Dareste. On applique la méthode expérimentale pour expliquer la genèse des monstruosités. Aussi l'embryologie se fonde-t-elle, dans les années 1880, sur les résultats obtenus en tératologie expérimentale : expérimentale ou naturelle, l'embryologie produit des monstres en grande quantité, non pour l'étude exclusive du défaut, mais pour déceler les rouages d'une mécanique du développement normal.

Monstres et merveilles aux XVI^e et XVII^e siècles

Dans la littérature des XVI^e et XVII^e siècles, de nombreux ouvrages, chroniques et notices sur les monstres présentent descriptions et réflexions tératologiques. Héritière d'une tradition dont l'Antiquité grecque et romaine, influencée par le dogme théologique de la religion chrétienne, la période des XVI^e et XVII^e siècles marque le passage d'une représentation imaginaire du monstre et du discours fabuleux qui l'accompagne au graphisme réel commenté dans un esprit pré-scientifique.

Dès le XVI^e siècle, une tradition culturelle en matière de monstres s'installe ; elle s'enrichira et se diversifiera au fil des siècles. L'homme n'a pu se dispenser du monstre. Devant les représentations des monstres, l'homme s'interroge sur sa nature, sur l'existence réelle de ces créatures, sur leur origine, sur leur signification.

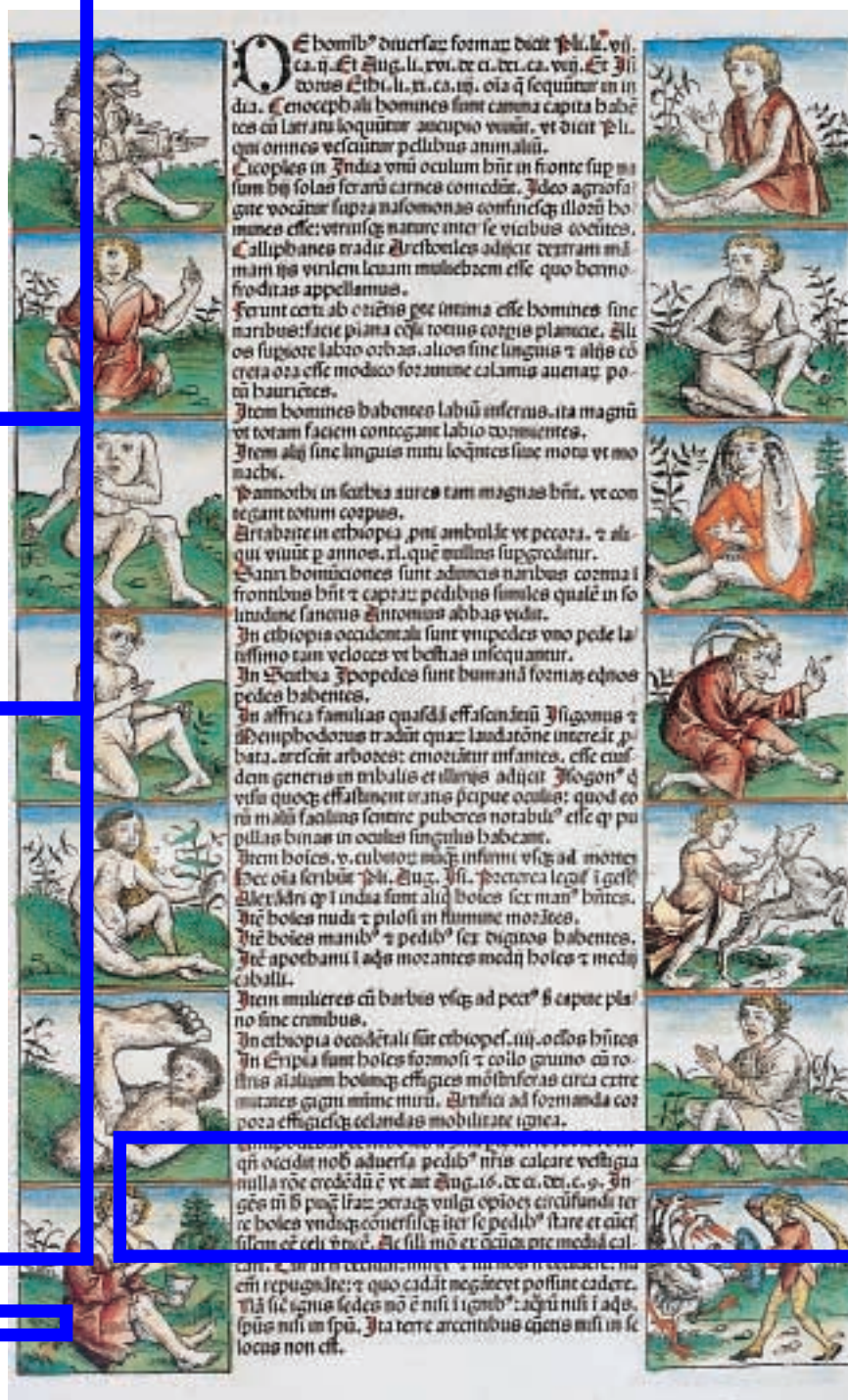
Aristote qualifie déjà la femme de monstre parce qu'elle diffère de l'homme : c'est un monstre nécessaire à la perpétuation de l'espèce, tandis que les vrais monstres ne se reproduisent pas ! Puis le monstre est devenu le symbole de la faute : il incarne le péché, évoque la sexualité, la femme. Celle-ci est non seulement responsable de la faute, elle a « un sexe dangereux, une bouche qui peut appeler et tuer », selon l'historien contemporain Claude Kappeler.

La femme devient objet d'anathème en raison de sa fonction sexuelle. Les représentations de diables hermaphrodites, diables à seins de femmes, apparaissent à la fin du Moyen Âge, à une époque où le symbolisme féminin

se charge de culpabilité et de malédiction. Progressivement les sorcières se font monstres.

Aux XVI^e et XVII^e siècles, les monstres gardent une fonction sociale et culturelle. Les derniers écrivent l'histoire des monstres, les rendent plus familiers ; ils tentent d'expliquer leur existence, d'ordonner les productions de la nature.

Ainsi Pierre Boaistuau, né au début du XVI^e siècle et mort en 1566, traite des monstres de façon exemplaire. À la lecture de son œuvre, on saisit comment les monstres étaient perçus par la société de la Renaissance, les chroniqueurs, les écrivains, les médecins et les chirurgiens. Originaire de Nantes, Boaistuau, publie en 1560



1. CERTAINS MONSTRES DE LA CHRONIQUE DE NUREMBERG, publiée en 1493, ressemblent à ceux qu'Alexandre le Grand prétendait avoir affrontés lors de ses conquêtes : cyclopes, hommes sans tête, à une jambe, à tête de chien ou de bouc, etc. Devant ces descriptions ou représentations, l'homme s'interrogeait sur l'existence de tels monstres, sur leur signification, et sur sa propre nature. (La gravure originale était en noir et blanc ; elle a été colorée ultérieurement.)

ses *Histoires prodigieuses*. De 1560 à 1594, cet ouvrage, qui eut un succès notable, a été réédité neuf fois, complété, annoté par d'autres auteurs. Les éditions poursuivront après 1594, et Boais-tuau sera traduit en anglais et en néerlandais. Il y avait un public pour ces histoires de monstres, de prodiges, de merveilles et d'abominations, tous suscitant admiration et terreur. L'existence des monstres n'est pas mise en doute, mais on cherche à en expliquer la présence, la fonction, la genèse.

À cette époque, le combat entre le bien et le mal, Dieu et le Diable sont les principaux responsables des naissances monstrueuses ou, plus exactement, Dieu seul dans la mesure où l'on considère que le Diable est sous son autorité. La première fonction des monstres est alors évidente pour Boais-tuau : ils résultent de la colère divine.

À la vue de ces œuvres ainsi « mutilées » et « conquêtes », « nous sommes contraints d'entrer en nous-mêmes, frapper au marteau de notre conscience, épilucher nos vices et avoir en horreur nos méfaits », écrit Boais-tuau. Le lecteur est ainsi instruit de la raison des monstres.

de son discours se référant régulièrement soit à la Bible, soit à des auteurs incontestés, tels saint Augustin et sa *Cité de Dieu*, Jérôme Cardan et Conrad Lycosthènes, qui ont publié des histoires aussi merveilleuses que prodigieuses, monstrueuses et abominables.

Que le premier des monstres soit Satan ne surprend pas. Aussi Boais-tuau commence-t-il ses histoires par les « Prodiges de Satan ». Ne se manifestant que par la volonté de Dieu, Satan prend différentes figures et exerce des fonctions diverses, comme celle de roi de l'une des plus opulentes et fameuses cités des Indes, Calicut. Le roi de Calicut est figuré dans l'ouvrage de

un trône, coiffé d'une tiare, il a une tête de chat, ses doigts sont pourvus de griffes, ses pieds sont ceux d'un coq, il a des seins de femme et son sexe est représenté par une tête dont la bouche est ouverte, une queue prolongeant cette tête. Être composite, herma-

phrodite, physiquement repoussant, mais attirant par la bonhomie de sa figure souriante, ce Satan a toutes les qualités requises pour susciter à la fois dégoût et séduction.

Le monstre de Cracovie

Proche du diable, le monstre de Cracovie, « prodige d'un horrible monstre de notre temps », comme le décrit Boais-tuau, fait partie des monstres possibles. Toutefois cette représentation monstrueuse incite le conteur

d'histoires prodigieuses à s'interroger sur la réalité de la représentation de ce monstre, à se pencher sur son origine. Certes ce monstre n'est pas une pure imagination puisqu'il est né en Pologne, à Cracovie, en février 1543 ou 1547 ; ses parents étaient humains.

quatre heures à sa naissance. Même si la date reste incertaine, de nombreux détails donnent réalité à cette naissance monstrueuse.

Avant de mourir, ce monstre a dit : « Veille, le Seigneur vient. » Boais-tuau le présente comme un messenger chargé de paroles divines. C'est pour cela que sa nature hideuse a été « anoblie et

décorée de beaucoup de doctes plumes », c'est-à-dire décrit par des auteurs célèbres.

Selon Boais-tuau, Dieu crée certains monstres pour punir les pêcheurs de leurs fautes et il en crée d'autres pour éblouir les hommes de sa puissance créatrice. La fonction première du monstre : expiation de la faute, inspire la terreur, mais, enfant de la toute-puissance divine, il force l'admiration. Le monstre de Cracovie a peut-être été voulu par Dieu, mais Boais-tuau ne se prononce pas, car devant la présence d'une queue fourchue, symbole satanique, il s'interroge : comment peuvent-ils engendrer ?

Certains pensaient alors que les incubes (diables ou démons mâles) et les succubes (diables ou démons femelles) pouvaient s'accoupler avec

monstrueux naissent de tels accouplements. Boais-tuau réfute cette croyance par des arguments théologiques : si Dieu a permis aux diables et aux démons d'abuser sexuellement des femmes et des hommes, toujours pour punir ces derniers de leurs péchés, il ne leur a pas donné la faculté d'engendrer un être, fût-il un monstre.

Les êtres vivants sont engendrés uniquement par la semence, et les « malins » en sont dépourvus. De surcroît, ils n'ont pas de sexe. Chez les diables, il n'y a ni hommes ni femmes, mais ils peuvent en prendre l'apparence, ou se montrer sous la forme d'un bouc, ou encore se transfigurer en « Anges de lumière ». Les démons étant immortels, il n'ont pas besoin de descendants.

Parmi les monstres fabuleux décrits par Boais-tuau, deux sont particulièrement étonnants : l'enfant-chien et le monstre de Ravenne. Le premier aurait été engendré en 1493 par une femme ayant commis l'acte de bestialité avec un chien. Catherine de Sienne, religieuse de l'époque, une telle naissance est œuvre de Dieu qui frappe et punit ainsi les actes contre nature, tout comme il fustige l'adultère et les « sodomites ». Aussi l'enfant-chien sera-t-il envoyé au pape, « afin qu'il fût expié et purgé ».



2. LE ROI DE CALICUT figurait le diable : il a une tête de chat, des doigts crochus, des pieds de coq, des seins de femme et son sexe est représenté par une tête prolongée par une queue.

Les monstres composites, dont une partie est humaine et l'autre animale, ont marqué l'esprit de l'homme, car la naissance de tels êtres ne pouvait résulter que d'un mariage entre un homme ou une femme avec un animal. Certains témoignages historiques relatent ces relations contre nature, pratiquées lors de rituels sacrés. Durant son voyage en Égypte, Hérodote fut témoin du culte du bélier d'Osiris : des femmes s'enfermaient avec un bouc pour y accomplir le « rite générateur ».

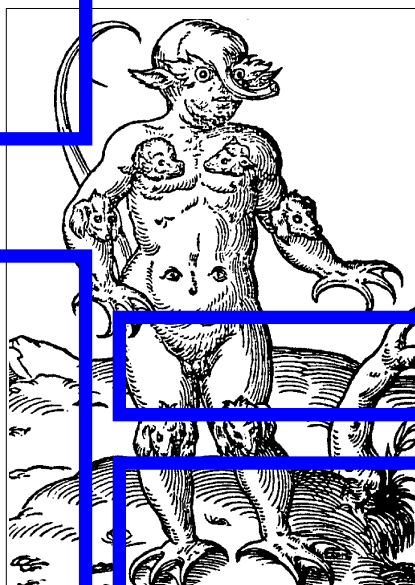
La condamnation de l'acte de bestialité

Ces pratiques, répandues dans diverses régions de l'Égypte, ressemblent à ce que l'on trouve aussi ainsi les Dionysies chez les Grecs et les bacchanales chez les Latins. De tels actes rendaient crédible la procréation d'êtres composites. Les satyres de la mythologie grecque et les faunes des Romains sont des hommes-boucs issus de l'imaginaire inspiré par ces pratiques sacrées qui dégénéraient en rites orgiaques.

Les Israélites s'inquiétaient de ces accouplements : aussi Moïse édictait-il des commandements visant les actes de bestialité : « Tu n'auras commerce avec aucun animal pour te souiller avec lui. Une femme qui s'approche d'un animal ; c'est une abomination » (Lévitique, 18(23)). L'acte de bestialité était puni par la mort : « Si un homme a commerce avec un animal, il sera puni de mort ; et vous tuerez l'animal lui-même. Si une femme s'approche de quelque animal pour se prostituer à lui, tu feras mourir la femme ainsi que l'animal » (Lévitique, 20 (15-16)).

Au cours des siècles, les auteurs coupables de telles pratiques échappèrent souvent à la peine capitale et les produits monstrueux en résultant témoignaient de l'ire de Dieu. Cela explique pourquoi, dans la cathédrale d'Auxerre, qui date du XIV^e siècle, une sculpture représente une jeune femme en train de se prostituer à un animal. Boaistuau est en accord avec cette tradition qui explique la naissance d'un enfant-croco-

Le monstre de Ravenne, un autre exemple de la colère divine, est détaillé dans l'édition de 1512 de la *Chro-*

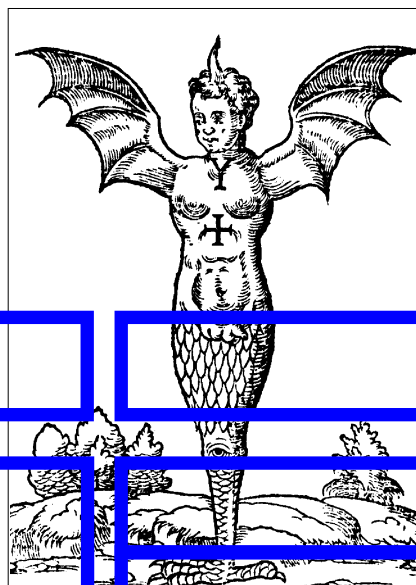


1. LE MONSTRE DE CRACOVIE est né vers 1540 en Pologne ; il ne survécut que quatre heures à sa naissance, mais fut décrit par de nombreux auteurs.

nique d'Épiphane de Césarée. Évoquant ce monstre, Boaistuau craignait de ne pas être cru ; on pouvait douter de l'existence d'un être si monstrueux et si éloigné de toute humanité. Des monstres plus terribles encore ayant été précédemment décrits, pourquoi ne pas croire à la réalité du monstre de Ravenne, d'autant que des témoins avaient déclaré l'avoir rencontré ? Ce monstre serait né en 1512, à Ravenne en Italie, au temps du pape Jules II.

Symbolique puisqu'elle coïncidait avec la bataille de Ravenne, le 11 avril 1512, où les Français affrontèrent les Espagnols et les troupes pontificales, cette naissance est interprétée comme posant : une corne qui représente l'orgueil et l'ambition ; les ailes, la légèreté et l'inconstance ; l'absence de bras, le refus de participer aux bonnes œuvres ; le pied d'oiseau de proie, « rapine, usure et avarice » ; l'œil situé sur le genou, l'« affection des choses terrestres » ; les cornes, la sodomie, l'orgueil, l'ambition, l'inconstance, l'avarice, etc.

Le monstre de Ravenne concentrait tous ces défauts, et dont la guerre fut le châtiment puisque les Français sortirent vainqueurs de la bataille. Les Italiens n'avaient pas tenu compte du signe « Y », placé au-dessus de la poitrine du monstre, signifiant un désir de vertu, ni de la croix située au-dessous, les exhortant à se convertir à Jésus-Christ, seul moyen de retrouver la paix et de « modérer l'ire du seigneur, qui était enflammée contre leurs péchés ».



4. LE MONSTRE DE RAVENNE serait né en 1512 en Italie. Selon Boaistuau, « Il concentrait tous les péchés qui régnaient de ce temps en Italie ».

ver la paix et de « modérer l'ire du seigneur, qui était enflammée contre leurs péchés ».

Les récits tératologiques d'alors. Dieu est omniprésent, et les références à la Bible ne sont pas omises. La génération a été voulue par Dieu pour permettre aux espèces de se perpétuer — les espèces animales ou l'homme lui-même —, car les productions divines ne sont pas immortelles. La génération se faisant par accouplement, toute déviation dans la pratique de cet acte sera punie par Dieu.

À côté des monstres fabuleux qui alimentent les histoires de Boaistuau, des monstres réels et identifiables existent. Ils correspondent, dans la majorité des cas, aux monstres viables, ce qui permettait aux dessinateurs et aux graveurs de les représenter d'après nature et non d'après des témoignages indirects, éloignés de la réalité. C'est le cas des monstres doubles (les siamois), des odomes, des hétéradelphes, des céphalopages frontaux, etc., et des monstres simples, des cœlosomiens, etc. Les odomes sont des monstres à

constitués d'un sujet normal et d'un sujet parasite, beaucoup plus petit, qui peut être complet ou sans tête ; les céphalopages sont des monstres doubles dont les deux composants sont attachés par la tête ; les cœlosomiens ont les viscères extérieurs, parce que la paroi ventrale ne s'est pas fermée durant l'embryogenèse.

donné naissance à un fœtus, fœtus innocent, on prétendait que c'était un effet de l'imagination de cette princesse, car le portrait d'un Maure était accroché sur son lit. Cette croyance en un effet de l'imagination de la femme enceinte sur le fœtus s'est maintenue dans la tradition populaire jusqu'au XX^e siècle ; on pensait notamment qu'elle expliquait les taches de naissance.

Chez Boastua, le monstre est ambivalent, car il correspond à la fois à une production de la nature et à un signe du créateur ; il résulte de causes naturelles et surnaturelles. Selon Jean Céard, professeur à l'Université de Bordeaux, « le problème n'est pas d'apprendre à saisir ce qui distingue et sépare le monde d'en bas et le monde d'en haut, mais, tout au contraire, d'apercevoir les mille relations qui unissent et subordonnent le premier au second ». La nature étendue à l'ensemble du monde, ou presque tout, devient possible et procède d'explications logiques.

Reprenant plusieurs des explications déjà mentionnées, Ambroise Paré envisage le rôle du « démon » et de l'irrepressible de Dieu aux actions des démons et des diables, en passant par l'effet de l'imagination de la future mère, la petitesse de la matrice, le mélange des semences, etc. Paré cherche plus à expliquer l'origine des naissances monstrueuses qu'à en trouver une signification. Il s'intéresse plus au « comment » qu'au « pourquoi ».

© POUR LA SCIENCE - N° 220 FÉVRIER 1996

encore représentés avec les deux sexes l'un à côté de l'autre.

Au cours des premières décennies du XVII^e siècle, le monstre perd sa fonction de signe divin. Le traité du médecin et philosophe Fortunio Liceti sur les monstres, *De monstrorum natura, causis et differentiis*, illustre cet abandon. L'ouvrage paraît en 1616, et est réédité plusieurs fois en français et en latin jusqu'en 1708. Liceti, qui enseigna dans les universités de Pise et de Padoue, réunit dans son ouvrage un grand nombre de monstres fabuleux et de monstres «normaux». Le médecin, pour qui tout, ou presque tout, est possible, ne fait pas de distinction entre le monstre réel, qu'il a peut-être observé, et le monstre fabuleux cautionné par de lointains témoignages.

Les monstres décrits par Liceti sont classés, non plus comme chez Paré d'après les causes qui les produisent, mais d'après les formes qui les caractérisent. Parmi les nombreuses causes responsables des naissances monstrueuses, Liceti élimine celle de Dieu ; «la plupart des monstres étant des productions de la nature, il est un

blasphème de dire que le Bon Dieu voulut se servir de ce moyen pour avertir les hommes de ce qu'ils doivent faire». Déjà dans ses *Essais* (1580-1588) Montaigne affirmait que «ce que nous appelons monstres ne le sont pas à Dieu».

En revanche, pour Liceti, le Diable n'hésite pas, si le malin plaisir lui en prend, à placer dans la matrice d'une

femme enceinte des parties de fœtus d'animaux qu'il soude aux fœtus humains. Le Diable peut aussi glisser dans la matrice chacune des causes qui sont à l'origine des monstruosité. Il peut transformer le fœtus dans le ventre de la mère en lui ajoutant des cornes, des ailes d'oiseaux de proie ou une queue.

C'est pour le fœtus chèrement payer un plaisir que le Diable inflige à la mère. Le médecin ne peut expliquer et débiter longuement sur la genèse d'un monstre qu'il n'a jamais vu et qu'il n'a jamais touché. C'est à l'époque des monstres fabuleux s'achève, le discours qui rend compte de l'être monstrueux ne sera pas pour autant débarrassé de problématique théologique.

Les théories de la génération

Boastu ou, Paré et Liceti, comme de nombreux médecins et savants des XVI^e et XVII^e siècles, pensaient que la génération s'effectuait par la fécondation d'une semence mâle avec une semence femelle.

théorie dont les sources essentielles se trouvaient chez Hippocrate et chez Aristote. Les années 1660-1670 sont marquées par la découverte des œufs de mammifères et des «animalcules spermatiques», et par l'élaboration du dogme de la préexistence des germes.

Selon ce dogme inspiré des écrits bibliques, les œufs des femmes et des

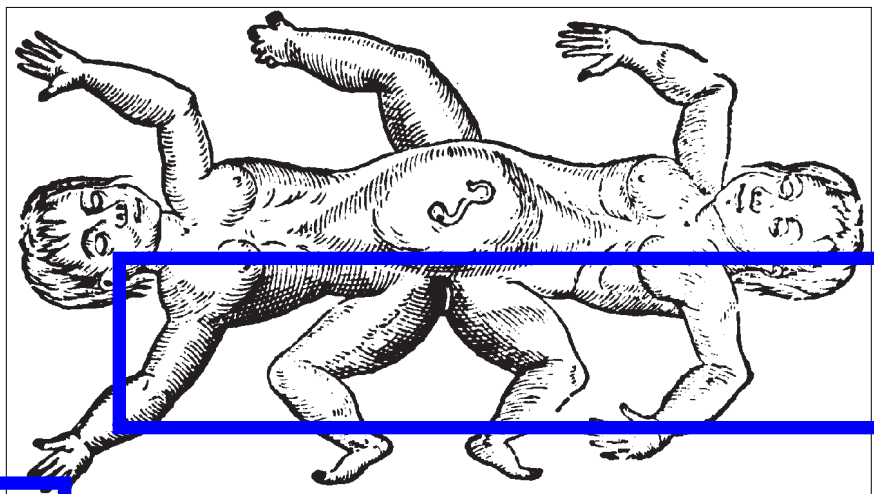
femelles animales contiennent une série de germes emboîtés qui assurent la descendance et la pérennité de l'espèce.

L'oignon nait du pépin de pomme, le pommier, l'œuf de papillon comme la chenille et la chrysalide, le papillon. Dans ce système, la fécondation réveille le germe qui doit évoluer, c'est-à-dire passer d'un état d'invisibilité à une structure reconnaissable, mais qui préexistait déjà dans sa forme définitive et parfaite.

Le dogme de la préexistence des germes est posé par le naturaliste hollandais Jan Swammerdam dans son *Histoire des insectes*, en 1669, et le philosophe théologien français Nicolas Malebranche participe à sa diffusion par son ouvrage *De la recherche de la vérité* (1674-1675), réédité plusieurs fois. Dans le système de la préexistence des germes, c'est la semence mâle qui provoque le développement des germes préexistants dans l'œuf, et l'autre la thèse animalculiste : ces derniers refusent de laisser privilège au sexe féminin et de limiter la fonction du sexe masculin au simple rôle de fécondation.

dans l'image biblique de la naissance d'Ève, sortant du flanc d'Adam, une image de cette préexistence.

Les exposés de la génération et notamment le dogme de la préexistence des germes sont complexes, car chaque théoricien (ou presque) ajoutait une note personnelle au dogme général, et ne manquait jamais d'évoquer l'origine

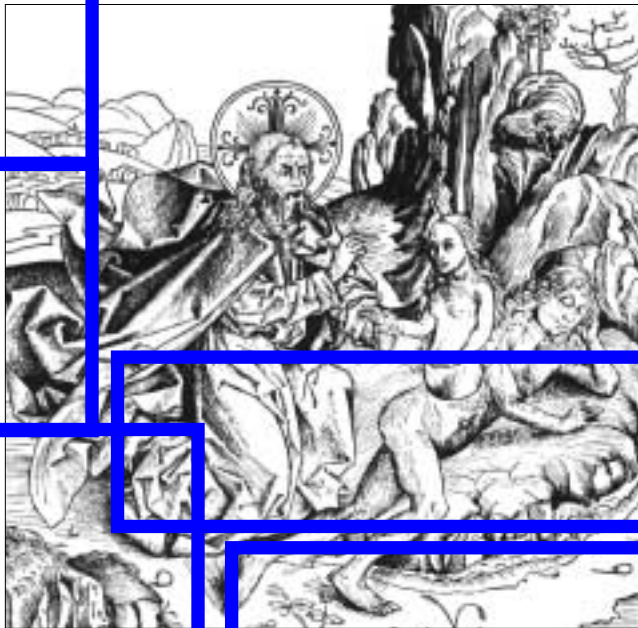


6. LES NAISSANCES MONSTRUEUSES ont incité les médecins à proposer diverses théories de la génération et de l'embryologie. Ainsi, selon Ambroise Paré, les embryons doubles (*ci-dessus*) résulteraient d'une surabondance de semence. Cette théorie de la semence explique aussi l'origine des hermaphrodites ; selon lui, la dominance de la semence impose le sexe : quand la semence de l'homme domine celle de la femme, il naît un garçon, et inversement ; les hermaphrodites traduisent une égalité entre les semences. Ils sont souvent représentés avec un sexe masculin et un sexe féminin (*ci-contre*).

et la formation des monstres. La préexistence des germes posait la question de la responsabilité de Dieu dans les naissances monstrueuses. Si les monstres sont bien réels, en est directement responsable, et le théologien peut-il admettre que Dieu ait produit des créatures imparfaites? Toutefois, comme les monstres sont bien réels, Dieu peut ne pas en être directement responsable, bien qu'il ait permis qu'ils existent.

Durant la seconde moitié du XVII^e siècle, le discours sur les monstres évolue par rapport aux témoignages de Boissieu. À l'époque de Malebranche, la certitude fait place au doute, et l'on s'interroge : le monstre est-il ou non créé par Dieu?

Selon Malebranche, seul l'effet de l'imagination est responsable des naissances monstrueuses, et il n'a pas été dans le dessein de Dieu de faire des monstres. Toutefois, tout imparfait que puisse paraître un tel être, il ne rend pas, pour le Créateur, ou «indigne de la sagesse du Créateur». En 1690, l'anatomiste Pierre-Sylvain Régis défend la préexistence des monstres dans son système de philosophie : «Rien ne nous empêche de croire que les germes des Monstres ont été produits au commencement comme ceux des Animaux parfaits.» En revanche, on pouvait, comme le fit



7. CETTE NAISSANCE D'ÈVE ÉMERGEANT DU FLANC D'ADAM A SANS DOUTE INSPIRÉ LE DOGME DE LA PRÉEXISTENCE DES GERMES : LES ŒUFS DES FEMMES CONTIENNENT UNE SÈME DE GERMES ÉMBRYONNAIRES QUI ASSURENT LA PÉRENNITÉ DE L'ESPÈCE. LA FÉCONDATION RÉVEILLE LE GERME QUI GROSSIT POUR PASSER DE L'ÉTAT D'INVISIBILITÉ À UNE STRUCTURE RECONNAISSABLE QUI PRÉEXISTAIT DANS SA FORME PARFAITE. DE MÊME, ÈVE PRÉEXISTAIT DANS ADAM.

Louis Jérome à partir de 1724, être un farouche partisan de la préexistence des germes et refuser toute intervention divine dans le processus de la vie.

Quoi qu'il en soit, le monstre devient, à partir des années 1670, un être qui obéit aux lois de la Nature. Si les «savants» les désignent comme des jeux de la nature, ils sont assurés, comme Fontenelle l'affirmait en 1703, que la Nature produit des «ouvrages extraordinaires»

Aux XVI^e et XVII^e siècles, les monstres jouent un rôle symbolique dans le cadre des pratiques sociales et théologiques. Que les monstres soient entrés au XVIII^e siècle dans une période pré-scientifique et, depuis le début du XIX^e, dans une période scientifique n'a pas totalement effacé les rôles qu'ils ont joués auprès des hommes pendant la période de la tératologie fabuleuse.

Aujourd'hui, les monstres gardent une fonction symbolique. Mais, depuis 1974, il ne s'agit plus de monstres du type de celui de Ravenne, invitant les pêcheurs au rachat, mais de monstres qui symbolisent les risques que l'homme peut faire encourir à son espèce. Depuis 1974, un réseau international de surveillance, localisé à Helsinki, recueille les informations concernant les monstruosité et les

malformations observées chez les nouveau-nés. Une proportion anormale d'anomalies graves avertit de la présence d'un facteur tératogène qui fait immédiatement l'objet d'enquêtes. Les monstres servent aussi de modèles dans certaines recherches, notamment celles de Nicole Le Douarin, au CNRS de Nogent-sur-Marne. Normalement, deux espèces ne sont pas interfécondes. Pourtant, par des manipulations génétiques,

on parvient à créer des «monstres», des chimères mi-cailles mi-poulets. Ces animaux hybrides servent notamment à étudier la migration des cellules lors de l'embryogenèse et à comprendre l'origine de certaines malformations.

Enfin, aujourd'hui, les monstres ont cédé la place à

l'astrologue, au numérologue et au tireur de cartes : tous comblent le désir d'irrationalité de l'homme. Comme les monstres d'hier, ils jouent un double rôle dans la société actuelle : ils conjuguent le désir de curiosité et la crainte de savoir.

Jean-Louis FISCHER enseigne à l'Université Paris 8 ; il est chercheur au Centre Alexandre Koyré d'histoire des sciences et des techniques (EHESS-CNRS-MNHN) et chargé de conférences à l'École des hautes études en sciences sociales (EHESS).

Dudley WILSON, *Signs and Portents, Monstrous Births from the Middle Ages to the Enlightenment*, Routledge, Londres et New York 1993.

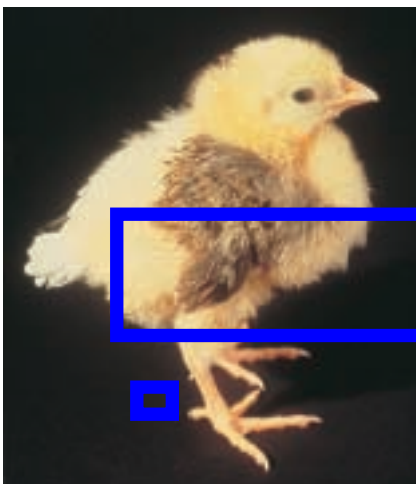
Rudolf WITKOWER, *L'Orient fabuleux*, traduit de l'anglais par Michèle Hechter, préface d'André Chaste, Thales et Hulsman Paris, 1991.

Jean CÉARD, *La nature et les prodiges. L'insolite au XVI^e siècle, en France*, Genève, Librairie Droz, 1977.

Claude KAPPLER, *Monstres, démons et merveilles à la fin du Moyen Âge*, Paris, Payot, 1980.

Jean-Louis FISCHER, *Monstres. Histoire du corps et de ses défauts*, Paris, Syros-Alternatives, 1991.

Laurent PINON, *Livres de zoologie de la Renaissance. Une anthologie (1450-1700)*, Paris, Klincksieck, 1995.



8. CE «MONSTRE», NÉ DU MÉLANGE, NORMALEMENT INTERDIT PAR LA NATURE, DE DEUX ESPÈCES, EST UNE CHIMÈRE CAILLE-POULET. CES CHIMÈRES SERVENT À ÉTUDIER COMMENT SE CONSTRUISSENT LES EMBRYONS.

L'allaitement maternel protège le nourrisson

JACK LEWMAN

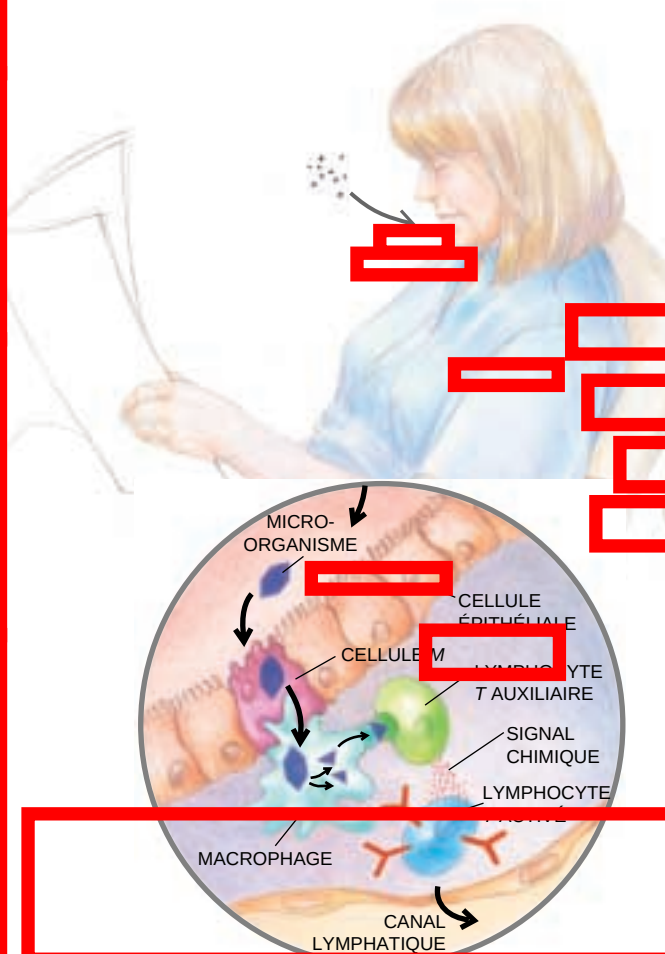
Certaines molécules et cellules du lait humain protègent les nourrissons contre les infections.

Depuis longtemps, les médecins savent que les nourrissons qui bénéficient de l'allaitement maternel sont moins souvent infectés que ceux qui sont nourris avec du lait maternisé. Mais pendant longtemps, la plupart d'entre eux pensaient que l'avantage du lait maternel résultait simplement de sa pureté bactériologique ; *a contrario*, le lait maternisé, que l'on doit mélanger avec de l'eau et verser dans un biberon, aurait été facilement contaminé. Cette hypothèse pêchait, car même les nourrissons auxquels on donne du lait maternisé qui a été préparé avec le plus grand soin souffrent plus fréquemment de méningites et d'infections intestinales, respiratoires ou urinaires.

On démontre aujourd'hui que le lait maternel protège activement le nouveau-né contre les maladies. Il est particulièrement bénéfique au cours des premiers mois de la vie, lorsque le nouveau-né n'a pas encore de défenses efficaces contre les micro-organismes étrangers. Aussi, comme les réactions immunitaires n'atteignent leur pleine efficacité que vers cinq ans, l'UNICEF et l'Organisation mondiale de la santé préconisent l'allaitement maternel « jusqu'à l'âge de deux ans au moins ».

Tous les enfants reçoivent, en effet, au cours de la grossesse, les anticorps de la mère sont transmis au fœtus à travers le placenta. Ces protéines circulent dans le sang du nouveau-né pendant quelques semaines à quelques mois, neutralisant les micro-organismes pathogènes ou préparant leur destruction par les cellules immunitaires de l'enfant. Les nouveau-nés nourris au sein reçoivent une protection supplémentaire grâce aux anticorps, aux protéines immunostimulantes et aux cellules immunitaires du lait maternel.

Après leur absorption, ces molécules et ces cellules évitent la colonisation des intestins par les micro-organismes. Certaines molécules se lient aux micro-organismes dans les intestins, empêchant de se fixer sur la muqueuse et de traverser cette couche de cellules. D'autres molécules diminuent la disponibilité de sels minéraux et de vitamines dont les bactéries pathogènes ont besoin pour survivre dans le système digestif. Certaines cellules immunitaires du lait humain attaquent directement les micro-organismes, d'autres libèrent des substances qui stimulent les réactions immunitaires du nourrisson.



1. UNE MÈRE qui absorbe un micro-organisme (à gauche) produit des molécules d'anticorps nommées immunoglobulines A sécrétatoires, qui passent dans le lait maternel (au centre) et contribuent à protéger les enfants allaités contre les micro-organismes pathogènes de leur environnement (à droite). Plus précisément, les micro-organismes sont captés par les cellules M de la mère

Les anticorps du lait maternel

Les anticorps sont des molécules de la classe des immunoglobulines, c'est-à-dire de protéines de cinq types : G, A, M, D et E. Tous les types sont présents dans le lait maternel, mais la catégorie

celle des immunoglobulines A et, notamment, les immunoglobulines A sécrétoires, que l'on trouve en grande quantité dans les systèmes respiratoire et digestif de l'adulte. Ces anticorps sont composés de deux molécules d'immunoglobuline A, associées à une «composante sécrétoire», qui semble protéger les molé-

cules d'anticorps contre la dégradation par les enzymes digestives de l'estomac et de l'intestin. Jusqu'au moment où les nouveau-nés produisent eux-mêmes des immunoglobulines A sécrétoires, c'est-à-dire plusieurs semaines ou plusieurs mois après la naissance, les

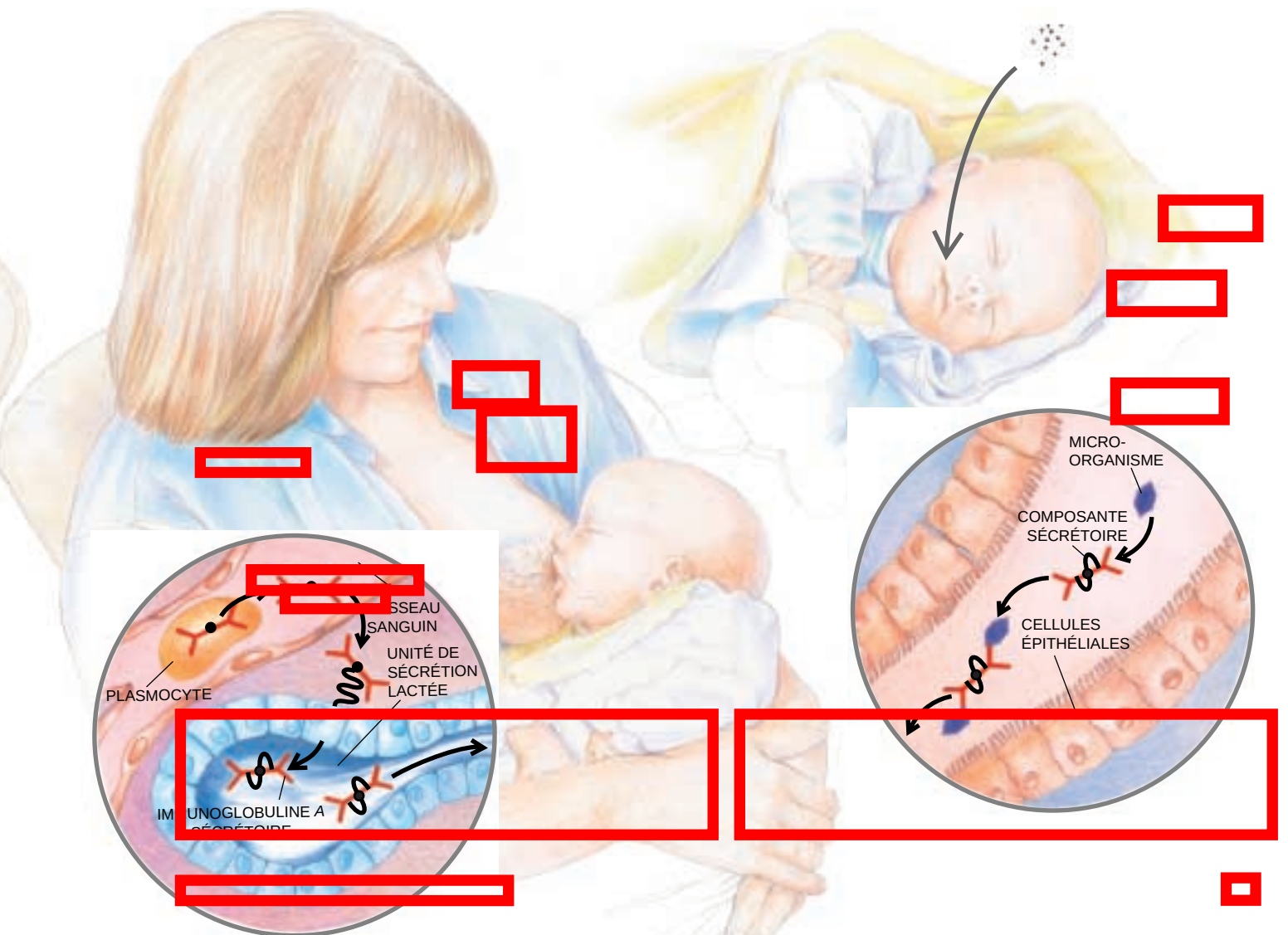
de défenses contre les agents pathogènes ingérés.

Les immunoglobulines A sécrétoires apportées par l'allaitement maternel ont d'autres fonctions. Tout d'abord, les anticorps transmis à un nourrisson sont spécifiquement dirigés contre les agents pathogènes présents dans l'environnement immédiat

de la mère et, donc, de l'enfant : la synthèse des anticorps lorsqu'elle rencontre des agents pathogènes, soit par contact, soit par absorption, soit par inhalation. Chaque anticorps se lie à un antigène (molécule étrangère ou micro-organisme) : il ne se lie qu'à

attaquer des substances anodines. Comme la mère ne fabrique d'anticorps que contre les agents pathogènes de son environnement, elle donne à son enfant une protection adaptée au cadre de vie.

D'autre part, les anticorps transmis à l'enfant ne sont pas actifs contre les bactéries non pathogènes, normale-



(cartouche de gauche), des cellules spécialisées de l'épithélium intestinal, et transmis aux cellules immunitaires nommées macrophages. Ces derniers dissocient le micro-organisme et le présentent, entier ou par fragments, à d'autres cellules immunitaires nommées lymphocytes T auxiliaires, qui sécrètent des composés qui activent des lymphocytes B. Ces lymphocytes B se

transforment en plasmocytes, qui traversent l'épithélium du sein et libèrent des anticorps (cartouche central). Certaines de ces molécules passent dans le lait maternel et sont absorbées par l'enfant. Dans le système digestif de celui-ci (cartouche de droite), les anticorps, protégés par une composante sécrétoire, évitent les infections infantiles.

Avantages immunitaires de l'allaitement maternel

Éléments	Action
Globules blancs	
Lymphocytes B	Produisent des anticorps dirigés contre des microbes spécifiques.
Macrophages	Tuent les microbes directement dans l'intestin du nourrisson, produisent du lysozyme et activent d'autres composants du système immunitaire.
Neutrophiles	Phagocytose des bactéries dans le système digestif du nourrisson.
Lymphocytes T	Tuent les cellules infectées ou émettent des messages chimiques pour activer d'autres défenses. Prolifèrent en présence d'organismes pouvant induire de graves maladies chez le nourrisson. Synthétisent également des composés renforçant la réaction immunitaire du nourrisson.
Molécules	
Anticorps de la classe des immunoglobulines A sécrétoires	Se lient aux micro-organismes dans les voies digestives du nourrisson, les empêchant ainsi de traverser la paroi intestinale et d'atteindre d'autres tissus de l'organisme.
Protéine de liaison B12	Réduit la quantité de vitamine B12 accessible aux bactéries.
Facteur bifidus	Favorise la croissance de <i>Lactobacillus bifidus</i> , une bactérie inoffensive présente dans les voies digestives du nourrisson. Le développement de telles bactéries limite la prolifération des espèces dangereuses.
Acides gras	Attaquent les membranes entourant certains virus et les détruisent.
Fibronectine	Amplifie l'activité antimicrobienne des macrophages ; contribue à réparer les tissus endommagés par les réactions immunitaires dans l'intestin du nourrisson.
Interféron gamma	Augmente l'activité antimicrobienne des cellules immunitaires.
Hormones et facteurs de croissance	Accélèrent la maturation du système digestif du nourrisson. Après le développement des membranes, initialement perméables, de l'intestin, le nourrisson devient moins vulnérable aux micro-organismes.
Lactoferrine	Fixe le fer, dont nombre de bactéries ont besoin pour survivre. En réduisant la quantité de fer disponible, la lactoferrine contrecarre la croissance des bactéries pathogènes.
Lysozyme	Tue les bactéries en dissociant leur paroi cellulaire.
Mucines	Adhèrent aux bactéries et aux virus, les empêchant ainsi de se fixer à la surface des muqueuses.
Oligosaccharides	Se lient aux micro-organismes et leur interdisent de se fixer à la surface des muqueuses.

ment préservée chez le bébé à l'âge
tif de l'enfant. Cette flore intestinale est
utile parce qu'elle limite la crois-
sance des micro-organismes patho-
gènes. Les médecins ignorent comment
le système immunitaire maternel évite
de s'attaquer à cette flore, mais le
processus favorise l'installation de bac-
téries bénéfiques dans le système diges-
tif du nourrisson.

Les immunoglobulines A sécrétoires
protègent en outre le nouveau-né
contre les infections respiratoires et
à la plupart des autres anticorps, elles
enrayent l'infection sans causer d'in-
flammation, phénomène de destruc-
tion des micro-organismes qui s'attaque
parfois aussi aux tissus de l'organisme.
Dans le système digestif de l'enfant,
la muqueuse est fragile, de sorte qu'un
excès de ces composés serait très dom-
mageable.

Les immunoglobulines A sécré-
toires protègent probablement d'autres
muqueuses que celles de l'intestin.
Dans de nombreuses régions du
Moyen-Orient, d'Amérique du Sud
et d'Afrique du Sud, les femmes mé-
tent du lait dans les yeux de leurs
enfants afin de traiter les infections oculai-
res. J'ignore si l'efficacité de ce
remède a été rigoureusement testée,
mais des raisons théoriques laissent
penser qu'il devrait être efficace, du
moins dans certains cas.

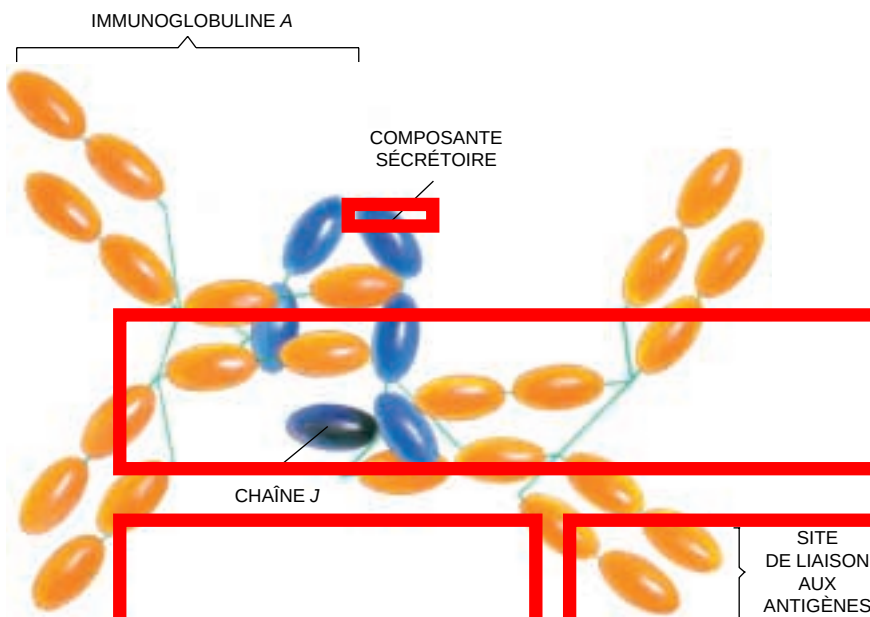
Une profusion de molécules utiles

Plusieurs autres molécules du lait
maternel empêchent les micro-orga-
nismes de se fixer sur la muqueuse
intestinale des nouveau-nés. Des oli-
gosaccharides, molécules composées
par l'enchâssement de quelques molé-
cules de sucres simples, comprennent
souvent des domaines qui ressemblent
aux sites de liaison qu'utilisent les bac-
téries pour s'introduire dans les cel-
lules du système digestif : ces
oligosaccharides empêchent les
bactéries, formant des complexes
insolubles, que le nouveau-né peut
excréter.

Le lait maternel contient de grosses molécules de
«mucine», composées principalement
d'une partie protéique et d'une partie
glucidique ; ces molécules se lient éga-
lement aux bactéries et aux virus,
contribuant à les éliminer.

Les molécules du lait, d'autre part,
ont diverses fonctions protectrices.
Toutes les molécules d'une protéine





2. LES IMMUNOGLOBULINES A SÉCRÉTOIRES sont composées de deux molécules d'immunoglobuline A liées par une protéine nommée chaîne J. La composante sécrétoire (en bleu) s'enroule autour des molécules associées. Les extrémités des bras représentent les domaines fonctionnels des protéines. Chacun des quatre bras des anticorps contient un site de liaison aux antigènes.

nommée lactoferrine, par exemple, fixent deux atomes de fer, bloquant la multiplication de nombreuses bactéries pathogènes en les privant d'un élément indispensable à leur croissance. Ce mécanisme empêche la prolifération de micro-organismes qui causent des maladies graves des nourrissons, tels que *Staphylococcus aureus*. Les molécules de lactoferrine perturbent, en outre, le mécanisme par lequel les bactéries digèrent les glucides, limitant ainsi leur croissance. De même, la protéine de liaison B12 prive les micro-organismes de vitamine B12.

Le facteur bifidus, un facteur de résistance à la maladie connu depuis très longtemps, favorise la croissance d'un organisme bénéfique, *Lactobacillus bifidus*. Les acides gras libres, dans le lait, peuvent endommager les membranes des virus dont le matériel génétique est défectueux. Les anticorps, composés de protéines. L'interféron que l'on trouve notamment dans le colostrum (la sécrétion jaune pâle que produit la mère avant l'allaitement) possède également une forte activité antivirale.

Défenses cellulaires contre les bactéries et les virus

Enfin les molécules de fibronectine, présentes en grande quantité dans le colostrum, stimulent certains phagocytes, qui deviennent alors capables

d'englober les micro-organismes, même si ceux-ci n'ont pas été préalablement marqués par des anticorps. Comme les immunoglobulines A, les molécules de fibronectine minimisent la migration et semblent contribuer à réparer les tissus endommagés par l'inflammation.

Tout comme les molécules défensives, les cellules immunitaires sont abondantes dans le lait humain. Ainsi les globules blancs combattent l'infection et activent d'autres systèmes de défense. Ces cellules sont très abondantes dans le colostrum. La plupart sont des neutrophiles, qui ont une activité de phagocytose, c'est-à-dire qu'ils peuvent conserver leur activité de phagocytose dans le système digestif des nourrissons, mais ils sont moins actifs que les neutrophiles sanguins et disparaissent du lait maternel environ six semaines après la naissance. Ils semblent également protéger les seins contre les infections.

Ils sont également très abondants dans le colostrum : ils représentent environ 40 pour cent des leucocytes. Ils sont beaucoup plus actifs que les neutrophiles et semblent alors bien plus mobiles que dans le sang. Outre leur activité de phagocytose, ils sécrètent du lysozyme, une enzyme qui détruit les bactéries en endommageant leur paroi cellulaire.

Dans le système digestif de l'enfant, les macrophages peuvent recruter les lymphocytes afin d'activer la lutte contre les intrus. Dix pour cent des globules blancs du lait sont des lymphocytes. Un cinquième d'entre eux sont des lymphocytes T, qui synthétisent les anticorps, et les autres sont des lymphocytes B, qui tuent directement les cellules infectées. Ils reçoivent des messages chimiques qui activent d'autres constituants du système immunitaire. Les lymphocytes du lait semblent se comporter différemment des lymphocytes sanguins.

Notamment ils prolifèrent en présence de la bactérie *Escherichia coli*, qui peut provoquer de graves maladies des nourrissons. Ils synthétisent également plus de lymphocytes T que les lymphocytes sanguins et des agents moins dangereux. Les lymphocytes du lait synthétisent également plus de lymphocytes T, de l'interféron gamma, qui inhibe la migration des macrophages, et le facteur chimiotactique des monocytes, qui renforce la réaction immunitaire du nourrisson.

Des bénéfices à explorer, des facteurs inconnus

Plusieurs études récentes ont indiqué que des facteurs du lait maternel accélèrent la maturation du système immunitaire du nourrisson. Les nouveau-nés allaités par leur mère produisent plus d'anticorps, quand ils sont infectés ou vaccinés. De plus, certaines hormones, telles que le cortisol, et de petites protéines, tels le facteur de croissance épidermique, le facteur de croissance des nerfs, le facteur de croissance de type insuline et la somatomédine C, contribuent à resserrer la muqueuse encore perméable du nouveau-né et à la rendre plus étanche aux agents pathogènes.

Des études d'animaux de laboratoire ont ainsi montré que le développement postnatal de l'intestin est plus rapide chez les animaux nourris au lait maternel, et encore meilleur chez des jumeaux nourris seulement au colostrum, qui contient encore davantage de facteur de croissance épidermique.

D'autres composés encore inconnus, dans le lait humain, stimulent apparemment la production par l'enfant de l'immunoglobuline A, de la lac-

toferrine et du lysozyme. Des molécules de ces trois types sont plus abondantes dans le lait maternel que dans celui des femmes allaitées que dans celle d'enfants nourris au lait maternisé. Pourtant les enfants allaités ne peuvent absorber ces molécules à partir du lait maternel ; aussi pense-t-on que ces molécules sont produites par les muqueuses des voies urinaires et que l'allaitement maternel induit une immunité locale de ces voies.

Cette hypothèse semble confirmée par des études récentes : on a observé que, chez le nourrisson, le risque d'infections urinaires est réduit. Un facteur important est que le lait maternel semble, notamment, faire produire plus de fibronectine à l'organisme des enfants allaités qu'à celui des enfants nourris au biberon. Au total, le lait maternel est donc un liquide tout à fait remarquable : il nourrit, et il protège les enfants jusqu'à ce que ceux-ci soient capables de se protéger tout seuls.

Jack NEWMAN a fondé plusieurs cliniques pédiatriques à Toronto. Il est professeur de pédiatrie à l'Université de Toronto.

H.B. SLADY et S.A. SCHWARTZ, *Mucosal Immunity: The Immunology of Breast Milk*, in *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 80, n° 3, pp. 348-356, septembre 1987.

Immunology of Milk and the Neonate, sous la direction de J. Mestecky et al., Plenum Press, 1991.

Allan S. CUNNINGHAM, *Breastfeeding and Health in the 1980's: A Global Epidemiologic Review*, in *Journal of Pediatrics*, vol. 118, n° 5, pp. 659-666, mai 1991.

A.S. GOLDMAN, *The Immune System of Human Milk: Antimicrobial, Anti-inflammatory and Immunomodulating Properties*, in *Pediatric Infectious Disease Journal*, vol. 12, n° 8, pp. 664-671, août 1993.

Ruth A. LAWRENCE, *Host-Resistance Factors and Immunologic Significance of Human Milk*, in *Breastfeeding: A Guide for the Medical Profession*, Mosby Year Book, 1994.

Bernard THIS, *Neuf mois dans la vie d'un père*, InterEditions, 1995.

Jean-François BACH, *Traité d'immunologie*, Éditions Flammarion.

J. BROSTOFF, G.K. SCADDING, D. MALE et I.M. ROITT, *Immunologie clinique*. Éditions de Boeck-Université.

La confidentialité des communications

THOMAS BRENNAN

Un nouveau protocole cryptographique utilisant des «passerports numériques» assure la sécurité des réseaux informatiques en permettant l'authentification des correspondants.

«Mes chèvres peinent à être dans la forêt, prenez bien garde au loup, car s'il entrait, il vous dévorait tout crus. Le vaurien se déguise souvent, mais vous le reconnaîtrez sans peine à sa voix rauque et à ses pattes noires.»

Grimm,
Le loup et les sept chevreux.

La chèvre essaie de protéger ses petits au moyen de ce qu'un expert en sécurité informatique nommerait un protocole de contrôle d'accès : ne laissez entrer que ceux qui possèdent une voix douce et des pattes blanches. Cette méthode est efficace, car elle est fondée sur l'aspect physique. Mais elle a aussi le défaut d'entrer ; néanmoins, dans le conte, elle est mise en défaut, parce que la quantité d'information utilisée est insuffisante : la distinction entre un loup et une chèvre est aisée si le corps tout entier est observable, mais ici, les chevreux n'ont été programmés que sur la reconnaissance de la voix et de la couleur des pattes.

Les ordinateurs échangent tant d'argent et d'informations précieuses que des pirates de l'informatique essaient de capter leurs messages. Pourtant, ceux qui

nées sont moins prudents que la chèvre du conte : ils cherchent à distinguer les «bons» des «méchants» en utilisant uniquement des suites de symboles.

La puissance croissante des ordinateurs et l'anonymat offert par les réseaux effraient les gouvernements, qui prévoient une recrudescence des piratages informatiques. De nom-



1. CETTE MONTRE cryptographique fabriquée par la Société autrichienne Skidata Computer, contient un émetteur-récepteur ainsi qu'un micro-ordinateur.

breuses nations ont réagi en proposant des remèdes draconiens, qui sont quelquefois pires que le mal. Mes collègues et moi-même ne pensons avoir trouvé une solution à mi-chemin entre les dangers d'un contrôle étatique absolu et une liberté laissant le champ libre aux abus des pirates.

Toute personne communiquant à l'aide d'ordinateurs requiert un système de sécurité répondant à trois critères : la confidentialité, l'authentification et la non-répudiation.

Les méthodes de retirer de l'argent d'un distributeur automatique sont fondées sur la confiance. Le système opère alors en sens unique : en demandant un mot de passe secret, la machine s'assure que la personne qui a introduit la carte en est bien le propriétaire légitime, mais celui qui retire de l'argent doit aveuglément faire confiance à la machine

et supposer qu'elle n'est pas corrompue. Bien que ce modèle autoritaire ait été approprié, il est naïf de supposer que les machines qui participent aux transactions actuelles ne sont jamais manipulées.

Tant qu'une même institution assure les communications, elle peut garantir l'authentification et la confidentialité par le principe des protocoles d'échange de clés et de certificats gérés par un serveur central. Le système Kerberos du réseau Athena, à l'Institut de technologie du Massachusetts, utilise ce principe (voir *Réseaux informatiques et sécurité*, par Jeffrey Schiller, *Pour la Science*, janvier 1995).

Une telle méthode pour les millions d'utilisateurs du réseau *Internet*. Tout d'abord, il serait impossible de constituer et de gérer un serveur de fichier centralisé qui contiendrait toutes les informations nécessaires aux échanges confidentiels. Ensuite, une telle concentration de données importantes serait une proie des plus tentantes.

En outre, sur un réseau public, les vérifications d'identité à l'aide de mots de passe ne sont pas sûres. Des programmes espions qui enregistrent les communications

et leurs mots de passe peuvent en faire un usage antérieur et frauduleux. De tels programmes ont été utilisés dans des dizaines de piratages graves aux États-Unis et en Europe. On ne doit donc pas imposer aux utilisateurs des réseaux de révéler leur mot de passe ou une quelconque caractéristique personnelle qui pourrait être copiée. Idéa-

lement, les programmes d'identification devront poser des questions afin de vérifier que l'utilisateur possède un secret (un mot de passe, par exemple) sans le révéler.

À l'Université de Karlsruhe, nous avons mis au point un système de sécurité des réseaux nommé SELANE, l'acronyme de *Secure local area network*, soit «réseau local sécurisé». Ce nom est aussi une allusion à la déesse grecque de la Lune, Séléné, qui est l'égale dans le ciel de son frère, le Soleil.

Le système SELANE est utilisable par n'importe quel réseau commercial ou universitaire. Nous avons également créé une carte à puce qui sécurise les opérations nécessaires à chaque utilisateur.

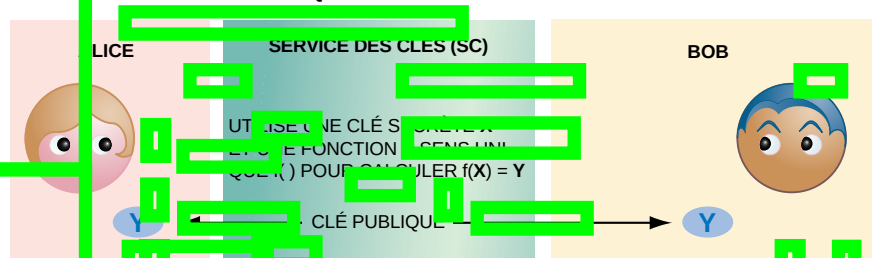
Partager des clés secrètes

La cryptographie moderne considère que les textes peuvent être transformés en une chaîne de bits. Les chaînes de bits peuvent être interprétées comme des nombres. Le chiffrement n'est alors que l'application d'une fonction mathématique permettant de transformer une chaîne de nombres écrite en clair en une chaîne inintelligible, qui ne peut être lue que par une personne connaissant la fonction et la clé de déchiffrement.

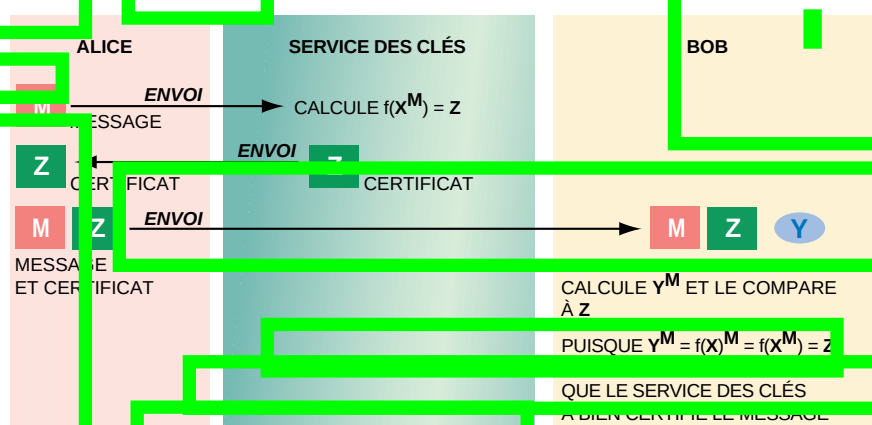
La confidentialité est la première nécessité d'un réseau sécurisé. Comment Alice et Bob (noms génériques donnés par les cryptographes aux deux correspondants d'une communication) peuvent-ils échanger un message confidentiel en utilisant une ligne sur écoute? Au minimum, ils doivent échanger une clé qui servira à chiffrer ou à déchiffrer les messages.

Cette méthode est fondée sur l'emploi de «fonctions à sens unique possédant une trappe», que l'on calcule aisément, mais qui sont quasi impossibles à inverser : même si un pirate connaissait le résultat de la transformation d'un nombre par une telle fonction, il ne pourrait retrouver le nombre

DISTRIBUTION D'UNE CLÉ PUBLIQUE



AUTHENTIFICATION DES MESSAGES

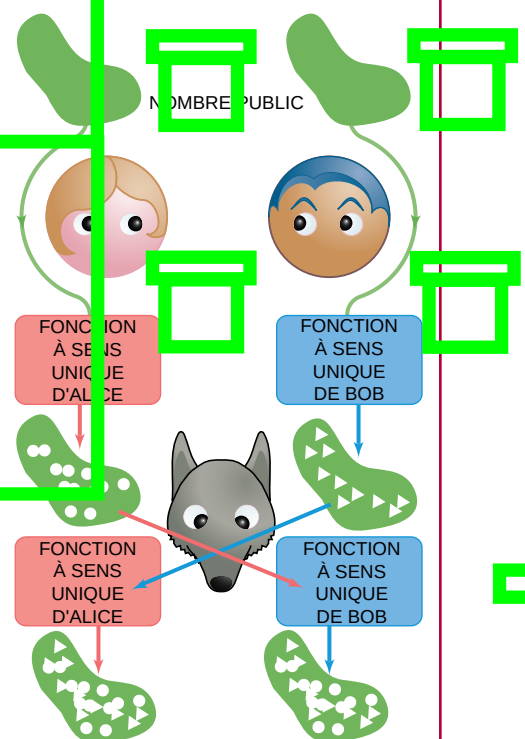


2. LES PROTOCOLES d'authentification reposent sur une séquence secrète de bits connue seulement par les deux correspondants. Ce système ne publie qu'une version chiffrée de sa séquence secrète, mais il donne la possibilité de vérifier que c'est bien lui qui a signé un document donné.

Des fonctions à sens unique pour vaincre les oreilles indiscrettes

Le procédé d'échange de clés de Diffie-Hellman permet à deux correspondants de communiquer de manière sûre, même en utilisant une ligne sur écoute. Cet échange est fondé sur des fonctions à sens unique nommées exponentielles modulaires. Pour appliquer ce procédé à un message, on élève une constante (par exemple, 3) à une puissance représentant le message sous forme numérique puis on prend le reste de la division par un grand nombre premier. Par exemple, pour chiffrer le nombre 66, on calcule le reste de la division de 3^{66} par 127 (en pratique, on choisit un nombre premier long de 300 chiffres environ).

Bob et Alice appliquent leurs fonctions à sens unique à une suite de bits publique (*en haut*). Dans un cas, Alice applique d'abord sa fonction ; dans l'autre, c'est Bob qui applique sa fonction en premier. Le résultat ne dépend pas de l'ordre d'application, mais les exponentielles compliquent les données au point d'empêcher tout intrus de déterminer les exposants secrets de Bob ou d'Alice, ou la suite de bits finale (la clé) qui leur servira dans les communications futures.



souhaitant que les nombres qui constituent la signature sont bien engendrés par la chaîne privée et par le document émis. Ces dix dernières années, de nombreuses versions de cette technique ont été mises au point.

À la place de cette technique, nous avons cherché comment, pour chaque réseau local d'ordinateur, un service

sit une chaîne de bits secrète et permanente, et publie la transformée de ce nombre par une fonction mathématique modulaire. La procédure de signature d'un document est la suivante :

- choisir une fonction exponentielle
- former et résoudre une équation
- transmettre le document

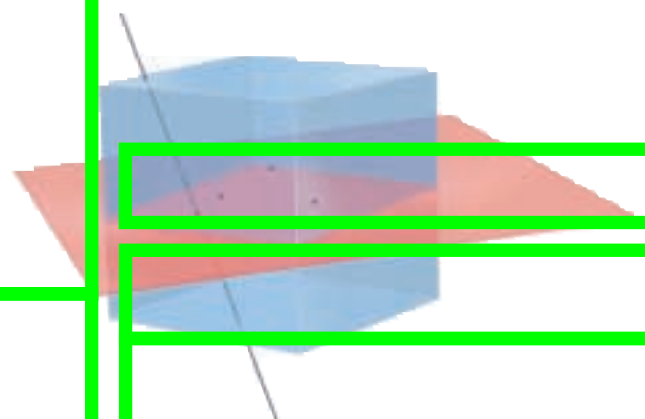
que les nombres qui constituent la signature sont bien engendrés par la chaîne privée et par le document émis. Ces dix dernières années, de nombreuses versions de cette technique ont été mises au point.

À la place de cette technique, nous avons cherché comment, pour chaque réseau local d'ordinateur, un service

Quand les écoutes téléphoniques deviennent nécessaires

Les techniques de chiffrement que nous avons mises au point satisfont à la fois les particuliers, qui veulent conserver la confidentialité de leurs messages, et les services de police, qui veulent surveiller les échanges. Craignant que les écoutes téléphoniques ne puissent capter que des messages inintelligibles, le gouvernement des États-Unis a réglementé l'acquisition et l'exportation des logiciels de chiffrement. Il promeut également un réseau téléphonique sécurisé qui utilise une puce de chiffrement nommée *Copper*. Le gouvernement contrôle les clés de cette puce, qui peuvent être obtenues sur demande par des agents officiels. Les détails de ce réseau demeurent secrets. Ce réseau n'inspire guère confiance, car les clés, partagées par les services de police de plusieurs pays, seront difficilement gardées. Ensuite, il peut exister des méthodes de déchiffrement en dehors du cadre des services de police.

En revanche, les méthodes que nous avons mises au point à Karlsruhe peuvent servir de base à un système qui mettrait les utilisateurs et les experts gouvernementaux en cryptographie sur un pied d'égalité. Il fournit un outil puissant pour les échanges de clés et l'authentification qui pourrait fonctionner avec le circuit *Clipper* ou avec d'autres dispositifs de chiffrement plus robustes. Afin d'aug-



À PARTIR DE TROIS DONNÉES DE TROIS POINTS (un plan) et d'une droite, on calcule les coordonnées du point d'intersection. Ces coordonnées forment une clé secrète à trois parties.

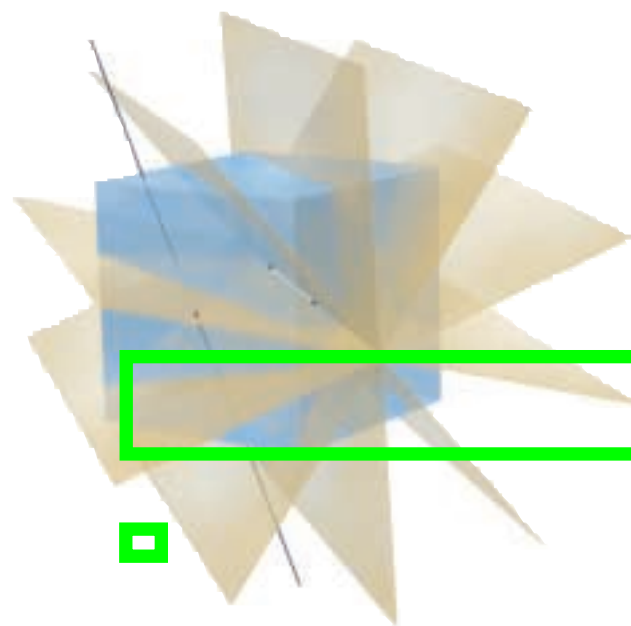
menter la confiance accordée au procédé, on pourrait établir des clés numériques nécessitant la coopération de différents services pour autoriser les écoutes téléphoniques.

Pour comprendre comment ce garde-fou pourrait fonctionner, imaginons que la séquence de bits qui code la clé soit constituée non pas d'un seul nombre, mais de trois ou plus. Gustavus Simmons, des Laboratoires Canada, a eu l'idée d'encoder trois fractions de la clé secrète comme coordonnées d'un point dans un espace à trois dimensions.

Toute clé secrète serait composée de trois nombres appartenant à une droite dans cet espace. Cette droite, connue de tous, serait néanmoins sûre en raison du nombre infini de ses points. On effectuerait le partage de l'information concernant le point secret en faisant passer un plan par ce point et en choisissant trois autres points au hasard sur ce plan. Ces points seraient utilisés pour reconstruire le plan et trouver son intersection avec la droite.

Chacun des membres de la commission d'autorisation des écoutes téléphoniques recevrait les coordonnées de deux des points. Deux membres en accord pourraient alors déterminer le point secret. Toutefois, grâce à SELANE, ils obtiendraient les coordonnées précises sans connaître le nombre secret, ce qui compromettrait la sécurité du système. S'ils donnent à leurs partenaires la version chiffrée de leur point, la même relation mathématique existera entre les points et l'image de la droite codée qu'entre les vrais points et la véritable droite sur laquelle se trouve le point secret.

Ce principe est généralisable quelle que soit la taille de la commission et le quorum nécessaire. Des responsabilités réparties de cette façon compliquent n'importe quelle tentative de percer le secret, que ce soit par la violence, le chantage ou la corruption. Je pense que le monde des affaires accepterait volontiers un tel système, qui éviterait la mainmise de l'État. Les gouvernements pourraient également l'accepter pour éviter la prolifération des codages robustes, ce qui se produit aujourd'hui.



LA CONNAISSANCE DE TROIS POINTS peut être répartie entre plusieurs personnes, de manière qu'aucune d'entre elles ne puisse, à elle seule, déduire un point secret. Il existe en effet une infinité de plans passant par deux points confiés à chacune des personnes.

des clés pourrait remplacer les services de délivrance des passeports. Avant d'attribuer le premier identificateur, le service des clés élabore ses propres clés de signature : un nombre secret et la version publique, obtenue à l'aide d'une exponentielle modulaire. Qui-conque désire vérifier les identificateurs attribués par le service des clés a juste besoin d'une copie de la clé publique.

Le service des clés fournit un certificat (une puce électronique résistante aux altérations et placée dans une carte de crédit ou dans une montre spéciale) à chaque personne, terminal ou ordinateur de son réseau. Ce certificat peut être utilisé par tout utilisateur. Lorsque Alice demande un numéro d'identification au service des clés, elle obtient un certificat dont la mémoire contient le message suivant : «Le propriétaire de cette carte est Alice Wunderkind, professeur d'informatique à l'Université de Paris», suivi d'une signature du type ElGamal fondée sur ce message.

Ultérieurement, afin de convaincre Bob que son numéro d'identification est valide, Alice utilise son certificat pour lui envoyer un message ainsi que le témoin de sa signature. En utilisant ces valeurs et la clé publique du service des clés, Bob calcule la partie de la signature que le certificat n'a pas révélé. Pour s'assurer que l'identificateur est valide, Bob dialogue avec le certificat en lui posant des questions dont les réponses sont justes seulement s'il connaît la partie secrète de la signature.

Mes collègues et moi-même avons conçu un protocole qui intègre l'authentification et la vérification avec l'échange de clés. Si l'authentification est réussie, la clé est distribuée par un microprocesseur placé dans une carte à puce. Si l'authentification échoue, les deux partenaires terminent leur premier échange par une clé commune qui servira dans les transactions futures. Si l'authentification échoue, chacun reçoit une séquence différente sans utilité aucune.

Chaîne de confidentialité

Cette méthode d'identification repose sur la confiance que Bob accorde au service de délivrance des clés d'Alice. Pour vérifier le numéro d'identification, on devra connaître la signature de tous les services des clés. Dans le cas des transactions internationales,

cette méthode n'est utilisable que si les services des clés sont hiérarchisés : chacun d'entre eux devrait se légitimer en se procurant un identificateur d'un service des clés supérieur.

Une station de distribution centrale devrait garantir la confiance que l'on accorde à chacun des services des clés universitaires, qui, à leur tour, garantissent les services des clés internes. Ce schéma est extensible à un nombre quelconque de niveaux. Une station centrale française pourrait se légitimer en utilisant l'identificateur numérique d'un centre européen qui, à son tour, serait validé par une organisation mondiale. La carte à puce détenue par une personne pourrait contenir une cascade de messages : une identification individuelle signée par le service des clés, une identification de l'institution signée par l'autorité régionale, et ainsi de suite. La vérification d'un identificateur ne nécessite de connaître que la signature numérique d'un petit nombre d'autorités et de leur faire confiance. Ainsi pourrait-on échanger des informations à distance avec autant de confiance que si le correspondant était présent.

Thomas BETH est professeur d'informatique à l'Université de Karlsruhe et directeur de l'Institut européen des systèmes de sécurité.

Taher ELGAMAL, *A Public Key Cryptosystem and a Signature Scheme Based on Discrete Logarithms*, in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 31, n° 4, pp. 469-472, juillet 1985.

T. BETH, *Efficient Zero-Knowledge Identification Scheme for Smart Cards*, in *Advances in Cryptology : EUROCRYPT '88*, sous la direction de Christoph Günther, Springer-Verlag, 1988.

Public Key Cryptography : State of the Art and Future Directions, sous la direction de T. Beth, M. Frisch et G.J. Simmons, Springer-Verlag, 1992.

Gustavus J. SIMMONS, *Contemporary Cryptology : The Science of Information Integrity*, IEEE Press, 1992.

T. Beth, *Keeping Secrets a Personal Matter or the Exponential Security System*, in *Cryptography and Coding III*, sous la direction de M.J. Ganley, Oxford University Press, 1993.

H. DANISCH, *RFC 1824 : The Exponential Security System TESS* in European Institute for System Security World Wide Web site at <http://avalon.ira.uka.de/eiss/indexe.html>.

Qu'est-ce que la conscience ?

DAVID CHAI MERS

Les neurobiologistes et les philosophes explorent l'un des plus grands mystères de l'existence. La connaissance des mécanismes physiques du cerveau semble insuffisante pour comprendre la nature de la conscience.

La conscience est la chose à la fois la plus familière et la plus mystérieuse. Nous la connaissons plus directement que quoi que ce soit d'autre, mais cette connaissance est difficile à concilier avec nos autres savoirs. Pourquoi existe-t-elle ? Que fait-elle ? Comment résulte-t-elle de mécanismes neuronaux ?

D'un point de vue objectif, nous comprenons assez bien le fonctionnement du cerveau : lorsque nous regardons cette page, des photons frappent nos rétines, des signaux électriques sont transmis par les nerfs optiques à différentes régions de notre cerveau et, finalement, nous réagissons par un sourire, un froncement de sourcil ou une remarque. L'aspect subjectif est plus complexe. Quand nous regardons la page, nous ne voyons pas des photons, nous ressentons directement les images et les mots comme une partie de notre vie mentale intime. Les couleurs des fleurs ou du ciel nous émeuvent, tandis que nous ressentons peut-être une émotion et que nous formulons des pensées. Ensemble, ces expériences constituent la conscience, la vie interne, subjective de l'esprit.

Les chercheurs qui étudient le cerveau et la pensée ont longtemps laissé la conscience de côté : la science, qui repose sur l'objectivité, ne pouvait traiter de quelque chose d'aussi subjectif que la conscience. Le courant behavioriste, qui a dominé la psychologie au début du siècle, se concentrait sur le comportement externe et interdisait de parler des processus mentaux internes. Plus tard, l'émergence des sciences cognitives a focalisé l'attention sur les mécanismes cérébraux, mais l'étude de la conscience restait exclue ; à peine évoquait-on le problème après les dîners bien arrosés.

Depuis quelques années, un nombre croissant de neurobiologistes, psychologues et de philosophes a décidé de violer ces interdits et d'explorer les secrets de la conscience. Ils ont proposé de nombreuses théories, variées et parfois opposées, souvent fondées sur des acceptions différentes des concepts fondamentaux. Seul le raisonnement philosophique permettra de sortir de cette confusion.

Autant de positions, autant de chemins. À la position réductionniste, selon laquelle la conscience est explicable par les méthodes des neurosciences et de la psychologie, et la position « mystérieuse », selon laquelle on ne comprendra jamais la conscience. L'analyse montre que ces deux positions sont fausses et que la vérité est probablement quelque part en chemin.

Contrairement aux réductionnistes, je pense que les outils des neurosciences, aussi performants soient-ils, ne peuvent pas rendre pleinement compte de la conscience. Contre la position « mystérieuse », je soutiens que la conscience est explicable par le cerveau type de la théorie ; nous ne pouvons pas en parler en détail, mais nous pouvons l'esquisser. Cette théorie contiendra de nouvelles lois fondamentales, et le concept d'information y jouera un rôle central. Elle aura des conséquences surprenantes sur notre façon de voir l'Univers, et de nous voir nous-mêmes.

Il n'y a pas une « conscience » à de nombreuses acceptions. Quels problèmes

1. UNE NEUROBIOLOGISTE qui connaîtrait tout sur la manière dont le cerveau traite les couleurs mais vivrait dans une pièce en noir et blanc, ne saurait pas ce que c'est que de voir les couleurs. La connaissance du cerveau n'apporte pas la connaissance complète de la conscience.

sont regroupés derrière ce mot? Distinguer d'abord des «problèmes faciles» et des problèmes difficiles. Les problèmes faciles sont aussi ardus que la plupart de ceux que traitent la psychologie biologique, car le mystère du mystère est la solution du problème difficile.

Problèmes faciles et problème difficile

Les problèmes faciles sont, par exemple, les suivants : comment un sujet humain perçoit-il des stimuli sen-

soriels et comment y réagit-il de manière appropriée? Comment le cerveau assemble-t-il des informations provenant des sens? Comment utilise-t-il ces informations pour...

Pourquoi pouvons-nous verbaliser nos états internes? Toutes ces questions sont faciles, parce qu'elles concernent le fonctionnement objectif du système cognitif. La poursuite des études de psychologie cognitive et de neurosciences devrait les résoudre.

Le problème difficile consiste à comprendre comment les processus phy-

siques cérébraux engendrent la conscience subjective. Ce problème concerne les aspects profonds de la pensée et de la perception ; il se rapporte aux sentiments que les choses nous inspirent.

bleu vif, le son ineffable d'un hautbois lointain, une douleur intense, une étincelle de bonheur ou la qualité méditative d'un instant de réflexion, tout cela fait partie de ce que je nomme la conscience. Ces phénomènes constituent le véritable mystère de l'esprit.

Une expérience de pensée, due au philosophe australien Franck Jackson,



illustre la distinction entre la connaissance objective et la conscience : Marie, qui vit au XIII^e siècle, est la meilleure spécialiste mondiale des mécanismes cérébraux responsables de la vision des couleurs, mais elle a passé sa vie dans une pièce noire et blanche, sans jamais voir de couleur. Elle sait tout ce qu'on peut savoir sur la biologie, la structure et le fonctionnement du cerveau. Cette connaissance lui permet de résoudre les problèmes faciles : comment le cerveau discrimine les stimuli, rassemble les informations et produit des comptes rendus verbaux. Marie connaît la correspondance entre les longueurs d'onde de la

lumière, mais il reste quelque chose de crucial que Marie ne connaît pas : le sentiment que l'on a quand on regarde une couleur comme le rouge. Des faits relatifs à la conscience ne peuvent pas être déduits du fonctionnement physique du cerveau.

Personne ne sait pourquoi ces processus physiques produisent la conscience. Pourquoi, lorsque notre cerveau traite la lumière d'une certaine longueur d'onde, éprouvons-nous une sensation de violet profond ? Pourquoi ressentons-nous des choses ? Un automate inconscient ferait-il, aussi bien que nous, tout ce que nous faisons ? Une théorie de la conscience devrait répondre à ces questions.

Je ne me propose pas de résoudre ce problème, mais elle a produit une théorie du cerveau. Nous savons que la sensation subjective de vision est étroitement associée à des opérations qui se déroulent dans le cerveau visuel. C'est précisément cette association qui nous laisse perplexes : l'expérience subjective semble émerger d'un processus physique, mais nous ne savons pas comment ni pourquoi.

Vers la résolution des problèmes faciles

Le développement de la neurologie et de la psychologie expérimentale, l'on pourrait espérer que l'énigme est en passe d'être résolue, mais la plupart des travaux ne concernent que les problèmes faciles. La confiance des réductionnistes vient des progrès réalisés dans ces domaines, mais le problème difficile reste sans solution.

Selon Francis Crick, de l'Institut Salk, et Christof Koch, de l'Institut

2. DANS CE DISQUE DE COULEURS, les nuances sont disposées de telle sorte que celles que l'on ressent comme similaires sont voisines. Les couleurs proches correspondent aussi à des représentations perceptives similaires dans le cerveau.

de technologie de Californie, la conscience émergerait d'une synchronisation des décharges neuronales, dans une région du cortex. Ce phénomène expliquerait comment la couleur et la forme d'un objet, qui sont traitées par des régions cérébrales différentes, sont unifiées en un tout cohérent. Deux éléments d'information seraient associés lorsqu'ils sont représentés par des séquences de décharges neuronales synchronisées.

Cette théorie résoudra peut-être certains problèmes faciles, mais elle n'aborde pas le problème difficile. Pourquoi des oscillations synchronisées engendreraient-elles une sensation consciente, quelle que soit la manière dont les perceptions sont traitées et intégrées ? F. Crick et C. Koch ne prennent pas position sur la possibilité de la science de résoudre le problème difficile (voir l'encadré des pages 62 et 63).

Le même type de critique s'applique à presque tous les travaux sur la conscience. Dans son livre *La conscience expliquée*, le philosophe David Chalmers propose une méthode perfectionnée pour expliquer comment, dans le cerveau, de nombreux processus indépendants produisent ensemble une réaction cohérente à un événement perçu. Cette théorie explique peut-être comment nous explicitons verbalement nos états internes, mais elle ne nous dit pas grand-chose de la raison pour laquelle

il existerait une expérience subjective derrière cette verbalisation. Comme d'autres théories réductionnistes, c'est une théorie des problèmes faciles.

Les problèmes faciles ont un point commun : ils concernent l'accomplissement des fonctions cognitives ou comportementales.

Il s'agit toujours de savoir comment le cerveau exécute une tâche donnée : comment il capte et analyse les stimuli, comment il assemble les informations, comment il produit des rapports.

Si la neurobiologie aura expliqué les mécanismes neuronaux correspondants, les problèmes faciles seront résolus. Le problème difficile ne le sera pas. Même si

toutes les fonctions comportementales et cognitives en rapport avec la conscience étaient expliquées, il resterait un mystère : pourquoi ces fonctions s'accompagnent-elles de conscience ? C'est cette énigme supplémentaire qui rend difficile le problème difficile.

Les nouveaux outils d'explication physique, telles la dynamique non linéaire ou la mécanique quantique, ne permettent pas non plus de résoudre le problème difficile. Selon Stuart Hameroff de l'Université d'Arizona, et Roger Penrose, de l'Université d'Oxford, la conscience résulterait de processus physiques quantiques qui se produiraient dans des organites des neurones.

Cette hypothèse pourrait expliquer comment le cerveau prend des décisions ou comment il prouve des théorèmes mathématiques, mais elle ne dit rien sur la manière dont ces processus engendrent la conscience. Toutes les théories qui ne reposent que sur une approche physique ont le même inconvénient.

Le handicap de ces théories physiques est constitutif : elles expliquent pourquoi les systèmes ont une certaine structure physique et comment ils accomplissent certaines tâches, mais elles ne disent rien sur la conscience.

Si, pour expliquer la vie, par exemple, on cherche à décrire comment un système physique peut se reproduire, s'adapter, métaboliser de l'énergie. La conscience pose un problème complètement différent, parce qu'elle n'est ni structure ni fonction.

Bien entendu, les neurosciences seront utiles, parce qu'elles pourraient

expliquer les mécanismes neuronaux associés à la conscience et qu'elles pourraient même détailler les correspondances entre les éléments de conscience et des éléments de conscience. Toutefois, nous ne franchirons pas ce que la philosophie a appelé le fossé explicatif entre les processus physiques et la conscience tant que nous ne saurons pas pourquoi ces processus séparent la conscience. Pour faire ce saut, nous devons utiliser un nouveau type de théorie.

Une vraie théorie de tout

De quelle théorie avons-nous besoin? Observons tout d'abord qu'en physique tous les systèmes ne sont pas décomposables en éléments plus fondamentaux. Les particules élémentaires et la charge sont considérés comme des caractéristiques fondamentales du monde : ils ne sont pas réductibles à quelque chose de plus simple. Malgré cette irréductibilité, des théories détaillées et utiles relient ces éléments par des lois fondamentales, expliquant de nombreux phénomènes complexes.

L'idée que la physique contient tous les éléments fondamentaux et toutes

les lois fondamentales de l'Univers est largement répandue. Comme le physicien Steven Weinberg l'a écrit, le rêve du physicien est une «théorie de tout», à partir de laquelle on déduirait tout ce qu'il faut savoir sur l'Univers. Si Weinberg concède toutefois que la conscience pose un problème : malgré la puissance explicative de la théorie physique, on ne peut apparemment pas en déduire la conscience. Même si la physique permettait d'expliquer les mécanismes cérébraux, objectifs associés à la conscience, elle n'expliquerait pas la conscience elle-même, de sorte qu'aucune théorie physique ne sera une vraie théorie de tout : pour élaborer cette dernière, il faut introduire une composante supplémentaire.

Je propose donc que l'on considère la conscience comme une caractéristique fondamentale du monde, à

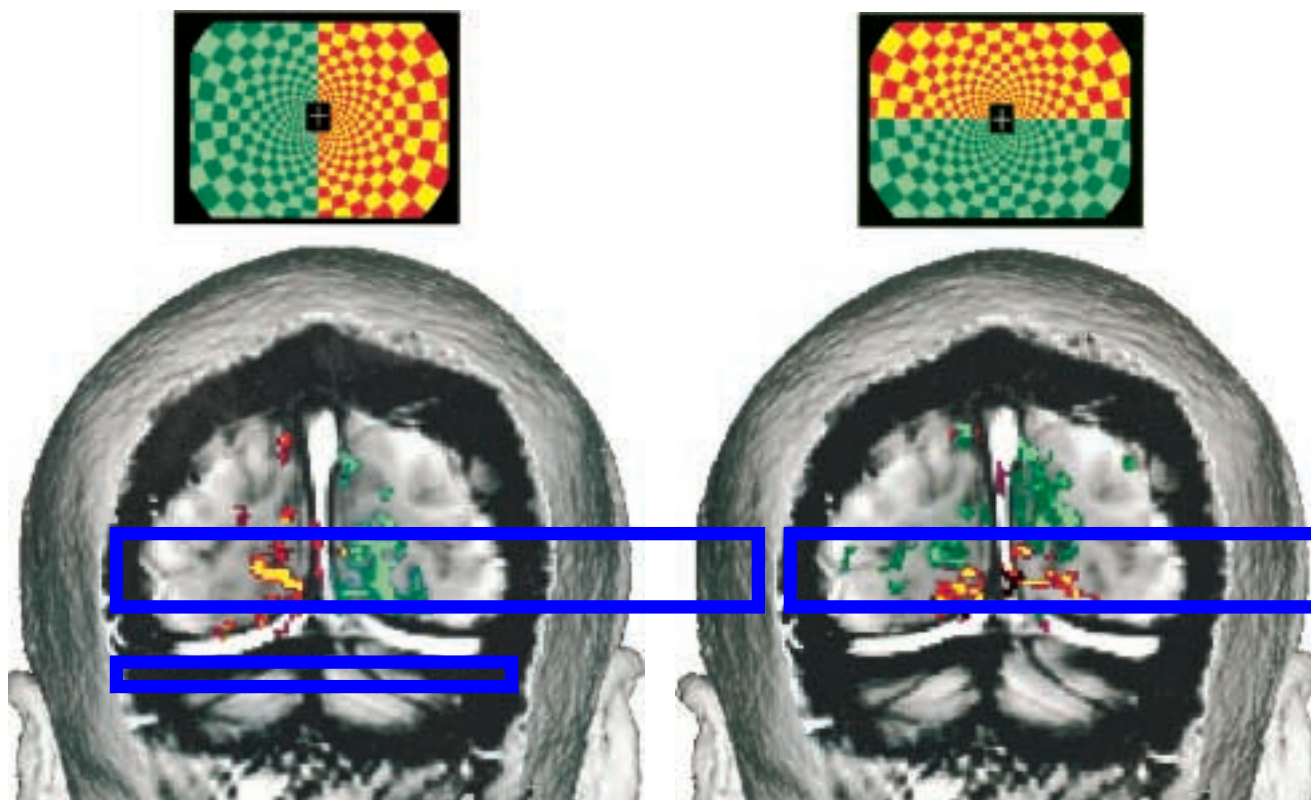
à quoi que ce soit de plus élémentaire. L'idée peut paraître étrange, mais la cohérence l'exige et l'histoire nous donne quelques précédents : au XIX^e siècle, par exemple, quand les phénomènes électromagnétiques étaient inexplicables à partir des principes connus, les physiciens ont introduit une nouvelle entité fondamentale,

la charge électromagnétique, et ils en ont étudié les lois fondamentales. Ne peut-on reprendre cette méthodologie dans le cas de la conscience? Si les théories actuelles ne l'expliquent pas, alors il faut introduire de nouveaux éléments.

Un nouvel élément fondamental requiert de nouvelles lois fondamentales : celles-ci relieront la conscience aux éléments de la théorie physique, sans interférer avec les lois physiques, car le monde physique forme un tout fermé. Les nouvelles lois serviront plutôt à franchir le fossé explicatif : elles indiquent comment la conscience dépend des processus physiques sous-jacents. Une théorie complète aura deux composantes : des lois physiques, qui décrivent le comportement des systèmes physiques, de l'infiniment petit à l'infiniment grand, et des lois «psy-

chiques» qui relient certains systèmes physiques sont associés à une conscience.

Comment découvrir les lois psychophysiques? L'obstacle majeur, dans cette recherche, est le manque de données. Telle que je l'ai décrite ici, la conscience est subjective, de sorte que nous ne pouvons pas analyser directement celle d'autrui. Cet obstacle



3. LES VARIATIONS DU DÉBIT SANGUIN dans le cortex visuel montrent comment le cerveau d'un sujet répond à une configuration qu'il voit. Les couleurs de cette illustration représentent les zones

cérébrales activées par la vision de chaque moitié du modèle. Cette expérience montre les réactions neuronales associées à la sensation visuelle, qui seraient à la base de la conscience.

n'est toutefois pas insurmontable : chacun d'entre nous a accès à ses propres expériences, une source abondante, utilisable pour la recherche. Nous pouvons utiliser des informations indirectes, telles les descriptions par d'autres de leur conscience. Les arguments philosophiques et les expériences de pensée apportent aussi des éléments. Ces méthodes ont leurs limites, mais elles nous fournissent l'argument de quoi commencer la recherche.

Comme les théories psychophysiques ne pourront pas être testées de manière indiscutable, elles seront plus spéculatives que celles des disciplines scientifiques classiques. Toutefois, nos expériences personnelles et les témoignages d'autres, sont des données assez convaincantes. Si nous trouvons une théorie qui en rende mieux compte que d'autres, nous l'accepterons. Si une théorie psychophysique n'existe aujourd'hui, il serait de toute façon prématuré de se préoccuper de la réfutabilité de ces théories.

Conscience et présence à soi

Commençons à chercher des lois générales qui relient les processus physiques à l'expérience consciente. Lorsque nous sommes conscients de quelque chose, nous sommes généralement capables d'agir dessus et d'en parler (grâce à des fonctions objectives, physiques). Réciproquement, si nous sommes conscients, on peut parler et que l'on peut utiliser pour agir est généralement consciente. Par conséquent, la conscience est liée avec ce que nous pourrions nommer la «présence à soi», le processus par lequel l'information, dans le cerveau, est rendue globalement disponible pour des fonctions objectives, ou l'action corporelle.

La notion de «présence à soi» semble banale, mais, telle que nous l'avons définie ici, elle est objective et physique. Elle n'est pas. On devra préciser la relation entre la présence à soi et la conscience pour analyser le cas des animaux et des bébés, qui ne parlent pas, mais, dans

les cas simples, nous voyons les grandes lignes d'une loi psychophysique : il y a conscience quand il y a présence à soi, et réciproquement.

Poursuivons cette idée en analysant le phénomène de perception visuelle. Nous ressentons notre champ de vision comme une mosaïque constamment changeante de couleurs, de formes et de configurations qui, en tant que telle, est détaillée. Puisque nous pouvons décrire cette structure, nous diriger vers ses composantes et réaliser d'autres actions qui dépendent d'elle, nous sommes incités à admettre que la structure de la conscience correspond directement à la structure de l'information donnée au cerveau par la perception visuelle.

Nos sensations de la couleur ont aussi une dimension tridimensionnelle du traitement de l'information dans le cortex visuel. Cette structure s'observe sur les disques de couleurs utilisés par les artistes : les couleurs y sont disposées dans un ordre précis, du rouge

Pourquoi les neurosciences peuvent expliquer la conscience

Nous pensons qu'aujourd'hui la meilleure démarche pour expliquer la conscience est l'étude des mécanismes cérébraux qui en sont le plus directement responsables. En localisant les neurones qui correspondent le plus à la conscience et en comprenant comment ils sont associés à ces neurones d'autres parties du cerveau, nous découvrirons de nouveaux éléments de réponse à ce que David Chalmers nomme le «problème difficile» : une explication complète de la manière dont la conscience subjective émerge de ces mécanismes cérébraux.

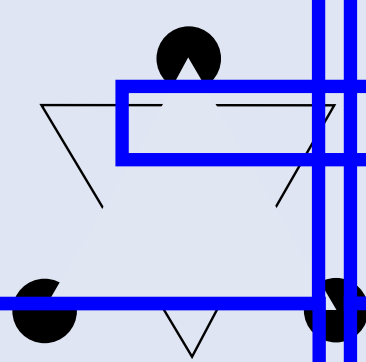
Nous admirons l'audace de D. Chalmers, qui identifie le problème difficile et tente de le résoudre, mais nous ne sommes pas convaincus par certaines de ses expériences de pensée. Selon nous, le problème difficile peut être décomposé en plusieurs questions. Pourquoi avons-nous une conscience ? Comment avons-nous des sensations conscientes particulières (telle la sensation du bleu de la couleur bleue) ? Pourquoi certains éléments de l'expérience subjective sont-ils impossibles à communiquer à d'autres personnes (pourquoi sont-ils personnels) ? Nous pensons avoir trouvé une réponse à la dernière question, et nous avons des propositions pour les deux premières, sur la base d'un phénomène nommé la représentation neuronale explicite.

Illustrons le terme «explicite» par un exemple. En réaction à l'image d'un visage, des cellules ganglionnaires sont activées dans toute la rétine, à peu près comme les pixels d'un écran de télévision, et engendrent une représentation implicite du visage. Simultanément, elles réagissent à d'autres caractéristiques de l'image, telles des ombres, des lignes

de contours, des variations d'éclairage. Des neurones, à des niveaux supérieurs du cortex visuel, réagissent surtout au visage, ou au visage vu sous un certain angle. Cette catégorie de neurones permet au cerveau de représenter le visage de manière explicite. Leur mort, à la suite d'un accident vasculaire cérébral ou d'une lésion, entraîne la prosopagnosie, l'incapacité pour un sujet de reconnaître des visages familiers, y compris le sien, de manière consciente, bien que la personne reste capable d'identifier un visage comme étant un visage. De la même manière, des lésions touchant d'autres parties du cortex visuel peuvent provoquer la perte de la sensation des couleurs, excepté le noir et blanc, et sans qu'il y ait aucun déficit des récepteurs rétiniens de la couleur.

À chaque étape de sa progression dans le cortex, l'information visuelle est codée, généralement de manière hiérarchique. Les cellules ganglionnaires de la rétine réagissent à un point lumineux ; les neurones du cortex visuel primaire réagissent préférentiellement à des lignes ou à des arêtes ; des neurones supérieurs détectent les contours en mouvement, etc. Ceux qui réagissent aux visages ou aux objets familiers sont encore plus haut dans la hiérarchie. Au sommet, les neurones sont reliés aux structures prémotrices et motrices du cerveau, où ils activent les neurones qui déclenchent des actions telles que parler ou éviter un véhicule qui passe.

D. Chalmers pense, comme nous, que les aspects subjectifs des perceptions sont étroitement liés à l'activité des neurones qui leur correspondent. Il décrit une expérience de pensée très connue, où une neurobiologiste hypothétique, Marie, spécialisée dans la perception des couleurs, n'a jamais vu une couleur. Nous pensons que Marie ne sait



Le triangle de Kanizsa stimule des neurones qui codent explicitement un contour qui n'existe pas.

au vert selon un axe, du bleu au jaune le long d'un autre, et du noir au blanc selon un troisième (voir la figure 2). Les couleurs géométriquement proches sur la palette sont ressenties comme similaires. Elles correspondent aussi probablement à des états perceptifs similaires dans le cerveau, dans le cadre d'un codage neuronal tridimensionnel que nous ne comprenons pas encore. Le concept fondamental sous-jacent est un principe de cohérence structurale : la structure de la conscience est l'image de la structure de l'information que nous percevons, et réciproquement.

Une autre loi psychophysique possible est un principe d'invariance organisationnelle. Les états psychophysiques qui ont la même organisation abstraite seraient à l'origine du même type de sensation consciente, quelle que soit leur constitution. De ce fait, si des puces en silicium reproduisaient toutes les interactions de nos neurones, elles produiraient la même conscience. L'idée est controversée, mais elle est solidement étayée par des expériences de

pensée où l'on remplace progressivement les neurones par des circuits micro-électroniques (voir l'encadré de la page 64) : on peut donc penser qu'un jour des machines seront conscientes.

L'objectif ultime d'une théorie de la conscience est de trouver un ensemble simple et fondamental de lois fondamentales de la physique. Toutefois, les principes précédents ne sont probablement pas fondamentaux, ils semblent être des analogues psychophysiques des lois macroscopiques de la thermodynamique ou de la cinématique. Quelles seraient alors les lois fondamentales sous-jacentes ?

L'information, élément de base

Je propose que les lois psychophysiques élémentaires soient fondées sur le concept d'information. Claude Shannon, de l'Institut de technologie du Massachusetts, a défini l'information, dans les années 1940, comme un ensemble d'états séparés dont la structure est fon-

dée sur des analogies et des différences. Un nombre binaire à dix chiffres, par exemple, est un état d'information. De tels états se concrétisent dans le monde physique à chaque fois qu'ils correspondent à des états physiques (tels des potentiels électriques) ; leurs différences peuvent être transmises, par exemple, par des lignes téléphoniques.

Il y a de l'information dans la conscience. La disposition des taches de couleur dans le champ visuel est comparable à celle de pixels sur un écran de télévision. Curieusement, nous trouvons les mêmes états d'information dans la conscience et dans les processus physiques sous-jacents du cerveau. Le codage tridimensionnel des états d'information est

l'état d'information, dans la conscience que nous avons des couleurs correspond directement à un état d'information dans le cerveau. Nous pourrions même considérer les deux états comme des aspects distincts d'un même état d'information, qui s'exprime simultanément dans le traitement physique et dans la conscience.

pas ce que c'est que de voir une couleur parce qu'elle n'a jamais eu de représentation neuronale explicite d'une couleur dans son cerveau : elle n'a que celles des mots et des idées qui sont associés aux couleurs.

Pour que nous puissions décrire une sensation visuelle subjective, l'information doit être transmise jusqu'aux neurones moteurs qui commandent la verbalisation ou d'autres actions. Cette transmission implique toujours le codage de l'information : l'information explicite exprimée par les neurones moteurs est liée, mais n'est pas identique, à l'information explicite exprimée par la décharge des neurones associés à la sensation visuelle, à un niveau donné de la hiérarchie visuelle.

Par conséquent, nous ne pouvons pas rendre compte, avec des mots et des idées, de la nature exacte d'une sensation subjective. Nous pouvons transmettre une différence entre deux sensations subjectives, telle la différence entre le rouge et l'orange : une différence dans une aire visuelle de niveau élevé est toujours associée à une différence au niveau des étapes motrices. Nous ne pouvons donc jamais expliquer à d'autres personnes la nature d'une sensation consciente, mais seulement ses relations à d'autres sensations.

Les réponses aux deux autres questions (Pourquoi avons-nous une conscience ? Qu'est-ce qui crée une sensation consciente spécifique ?) semblent plus complexes. Pour D. Chalmers, elles requièrent l'introduction de la conscience comme nouvel élément fondamental du monde, en rapport avec la capacité de traitement de l'information d'un organisme. Mais quel type d'informations neuronales la conscience produit-elle ? Et qu'est-ce qui fait qu'un certain type d'information correspond au bleu et à la couleur bleue plutôt qu'au vert ou à la couleur verte ? Ces problèmes sont parmi les plus difficiles de l'étude de la conscience.

Nous préférons une autre démarche, fondée sur le concept de «signification». Dans quel sens peut-on dire que les neurones qui codent explicitement un visage transmettent la signification d'un visage au reste du cerveau ? Une telle propriété doit être en relation avec le champ de projection de la cellule, la configuration de ses connexions synaptiques avec

les neurones qui codent explicitement des concepts apparentés. Finalement, les connexions atteignent la sortie motrice. Les neurones qui réagissent à un certain visage doivent être reliés à ceux qui expriment le nom de la personne dont c'est le visage, d'autres pour sa voix, pour les mémoires dans lesquelles elle est impliquée. Ces associations entre neurones doivent être utiles du point de vue comportemental, cohérentes avec les états d'actions provenant du corps et du monde extérieur.

La signification provient de liens entre ces représentations et d'autres, qui sont dispersées dans le système cortical en un vaste réseau associatif, semblable à un dictionnaire ou à une base de données relationnelles. Plus les connexions sont variées, plus riche est la signification. Si, comme dans l'exemple précédent de prosopagnosie, les sorties synaptiques de tels neurones au visage étaient bloquées, les cellules continueraient à réagir au visage de la personne, mais il n'y aurait pas de signification associée et, par conséquent, bien moins de sensation. Un visage continuerait d'être vu, mais pas reconnu comme tel.

Bien entendu, des groupes de neurones peuvent acquérir de nouvelles fonctions, permettant au cerveau d'apprendre de nouvelles catégories (de nouveaux visages) et d'associer ces nouvelles catégories à d'autres déjà existantes. Certaines associations élémentaires, telle la douleur, sont, à un certain degré, innées, mais elles sont affinées au cours de la vie.

L'information pourrait être un concept clef, comme D. Chalmers le pense. Pour plus de certitude, nous devons considérer des flux d'information hautement parallèles, associés, comme les neurones, en des réseaux complexes. Il serait utile de rechercher les caractéristiques nécessaires à un réseau de neurones (ou de toute autre construction informatique analogue) pour créer la signification : nous trouverions peut-être les bases neuronales de la signification. Le problème difficile de la conscience apparaîtrait alors sous un jour totalement nouveau. Il pourrait même disparaître.

Francis CRICK et Christof KOCH

La danse de la conscience dans un cerveau synthétique

Un système artificiel complexe pourrait-il avoir une conscience ? La question est fascinante. Un tel système ne sera pas construit dans les prochaines décennies, ni dans les prochains siècles, mais une simple expérience de pensée montre qu'un cerveau artificiel correctement organisé aurait le même type de conscience qu'un être humain.

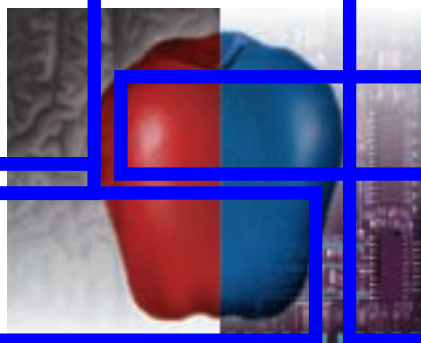
Considérons un système constitué de puces en silicium qui ont la même organisation et le même fonctionnement que les neurones de notre cerveau. Chaque puce fait exactement ce que fait son analogue naturel, tout en étant reliée de la même manière aux éléments environnants. Le comportement de ce système artificiel sera exactement le même que le nôtre. Sera-t-il conscient de la même manière que nous ?

Supposons qu'il ne le soit pas : soit il a une conscience différente (il ressent du bleu lorsque nous ressentons du rouge), soit il n'a pas de conscience du tout. Nous allons examiner le premier cas (le raisonnement est le même dans les deux cas).

Comme les puces et les neurones ont les mêmes fonctions, ils sont interchangeables, à condition d'avoir une interface adaptée. Les puces peuvent donc remplacer les neurones, et l'on produit un continuum de situations où une proportion croissante de neurones est remplacée par des puces. Dans ce continuum, la conscience du système change aussi. Nous pourrions remplacer

tous les neurones de notre cortex visuel par des puces. Le cerveau résultant, dont le cortex visuel est artificiel, a une conscience différente de l'original : là où précédemment nous voyions du rouge, nous verrions du violet.

Imaginons alors que nous relions les deux cortex visuels au



cerveau, par l'intermédiaire d'un commutateur à deux positions. Lorsque le commutateur est dans une position, nous utilisons le cortex visuel naturel ; dans l'autre position, c'est le cortex artificiel qui est activé. Notre sensation changerait alors du rouge au violet, ou réciproquement. Lorsqu'on actionne le commutateur de manière répétitive, nos sensations "dansent" entre les deux états conscients différents (rouge et violet).

Comme l'organisation de notre cerveau ne change pas, il ne peut y avoir de

Si un cerveau synthétique en tout point semblable à notre cerveau a une conscience différente, que comme pourrait nous apparaître alternativement rouge ou bleue.

changement comportemental quand on bascule le commutateur. Par conséquent, lorsqu'on nous demande ce que nous voyons, nous disons que rien n'a changé : nous ne voyons que du rouge, bien que les deux couleurs dansent sous nos yeux. Cette conclusion est absurde : l'hypothèse qu'un système artificiel, dont l'organisation et le fonctionnement sont les mêmes que ceux d'un cerveau neuronal, a des sensations conscientes différentes est donc absurde. Les systèmes qui ont la même organisation ont donc la même conscience.

L'information, ou du moins certaines informations, posséderait donc deux aspects de base : l'un physique et l'autre intime. Cette hypothèse est un principe fondamental, sur lequel reposeraient les relations qui unissent les opérations physiques et la conscience. Partout où nous trouvons de la conscience, elle est l'un des aspects d'un état d'information, dont l'autre aspect est purement physique à l'intérieur du cerveau. Il faudrait étoffer cette proposition pour en faire une théorie satisfaisante, mais elle remplit convenablement les principes précédemment mentionnés (des systèmes qui ont la même organisation matérialisent la même information, par exemple) et elle expliquerait de nombreux aspects de la conscience.

L'idée est au moins compatible avec plusieurs autres, telle la proposition du physicien que l'information est un fondement de la physique de l'univers. Les lois de la physique pourraient être reformulées en termes d'information : les lois physiques et psychophysiques se rejoindraient alors. Les théories de la physique et de la conscience pourraient même être réunies en une super théorie de l'information.

La généralité excessive du concept d'information pose toutefois un problème : un thermostat, qui contient de l'information, a-t-il une conscience ? Il y a au moins deux réponses possibles. Nous pourrions inclure dans les lois fondamentales le fait qu'une partie seulement de l'information a un aspect de conscience, peut-être en fonction du traitement physique qu'elle subit. Nous pourrions, au contraire, admettre que toute l'information a un aspect de conscience : lorsqu'il y a un traitement complexe de l'information, il y a une conscience complexe, et lorsqu'il y a un traitement simple de l'information, il y a une conscience simple. Dans ce cas, même un thermostat pourrait avoir une conscience, mais elle serait beaucoup plus simple que la conscience fondamentale que nous avons d'une couleur, et il n'aurait

Une telle idée semble bizarre, mais si la conscience est vraiment fondamentale, elle doit être largement répandue. De ces deux possibilités, nous devrions choisir celle qui s'intégrerait dans la théorie la plus puissante.

Ces idées produiront-elles une théorie plus vaste, qui prédira la structure précise de notre conscience à partir des

mécanismes physiques de notre cerveau ? Si le projet échoue et que mes idées se révèlent fausses, d'autres idées seront explorées, et d'autres théories fondées les seront sans doute élaborées. Nous connaissons peut-être un jour le plus grand mystère de l'esprit.

Daniel CHALMERS est membre du département de philosophie de l'Université de Santa Cruz.

Daniel DENNETT, *La conscience expliquée*, Éditions Odile Jacob, 1993.

Roger PENROSE, *Les ombres de l'esprit*, InterÉditions, 1995.

Daniel CHALMERS, *Absent Qualia, Fading Qualia, Dancing Qualia*, in *Conscious Experience*, sous la direction de Thomas Metzinger, Ferdinand Schörngel, 1995.

Explaining Consciousness : The «Hard Problem», numéro spécial du *Journal of Consciousness Studies*, vol. 2, n° 3, automne 1995.

Daniel PINCHAS, *La machine à l'esprit*, Éditions La Découverte, 1995.

The Nature of Consciousness : Philosophical and Scientific Debates, sous la direction de Ned Block, Owen Flanagan et Güven Güzeldere, MIT Press (à paraître).

La mucoviscidose

MICHAEL WELSH • ALAN SMITH

Cette maladie mortelle est due à une anomalie génétique, dont une des conséquences est la production de sécrétions très visqueuses qui obstruent notamment les voies respiratoires.

« **M**alheur à l'enfant qui laisse un goût de sel lorsqu'on l'embrasse sur le front. On lui a jeté un sort, et il mourra bientôt. » Ce dicton d'Europe du Nord décrivait correctement la mucoviscidose ; il reconnaissait que les jeunes enfants dont la sueur était excessivement salée étaient condamnés.

Le front salé est la plus bénigne des manifestations de cette anomalie héréditaire qui aboutit surtout à la destruction des poumons et à des dysfonctionnements graves du pancréas, des intestins et du foie. Au cours des dernières décennies, les progrès thérapeutiques ont permis à plus de la moitié des enfants atteints de vivre jusqu'à l'âge de 20 ans, et même au-delà. Malheureusement, aucun des traitements disponibles ne corrige encore l'anomalie biochimique ni n'efface l'angoisse d'une disparition prématurée.

Au début des années 1980, les généticiens ont tenté d'identifier l'anomalie responsable de la mucoviscidose. Après presque dix années d'efforts, ils ont isolé le gène atteint et localisé la mutation qui cause le plus souvent la maladie. On ignorait alors la fonction de la protéine normalement codée par le gène muté chez les enfants malades, mais on sait aujourd'hui que cette protéine est un canal par lequel les ions chlorure entrent dans les cellules et en sortent (le sel est constitué d'ions sodium et d'ions chlorure). Les généticiens ont également découvert pourquoi l'anomalie génétique bloque le transport des ions chlorure ; aujourd'hui, ils cherchent à comprendre comment ce blocage déclenche les signes cliniques de la mucoviscidose. Comme on l'espérait, ces découvertes ouvrent de nouvelles perspectives thérapeutiques. L'une d'entre elles guérira-t-elle un jour les enfants atteints ?

Ces progrès sont dus en grande partie aux médecins qui ont collecté au chevet des malades les premiers indices sur la nature de la mucoviscidose : pendant des décennies, la recherche clinique a fourni l'avantage d'informations sur cette maladie que ne l'a fait la recherche biochimique.

Ainsi, en 1938, à l'Université Columbia, Dorothy Andersen a autopsié des nourrissons et des enfants, et elle a décrit avec précision les symptômes de la mucoviscidose et les anomalies des organes : la destruction quasi systématique du pancréas (même chez les nourrissons), des anomalies des poumons et des infections pulmonaires.

À la fin des années 1940, les médecins observèrent également que des sécrétions visqueuses obstruaient progressivement l'ensemble des canaux présents dans les organes. Ainsi, dans le pancréas, les canaux assurant l'approvisionnement des intestins en enzymes digestives sont presque toujours obstrués : l'organisme ne peut plus dégrader les aliments et en extraire les substances nutritives.

Les poumons, les bronches et les bronchioles sont également encombrés. Normalement, la surface interne des bronches est recouverte d'une mince couche de mucus qui piège les particules inhalées et les propulse jusque dans la gorge, d'où elles sont expectorées. Chez les patients atteints de mucoviscidose, ce mucus est plus épais et

à expulser, et le rétrécissement des voies bronchiques diminue la capacité respiratoire. De surcroît, les bactéries qui stagnent dans les voies respiratoires déclenchent des infections récurrentes qui endommagent le tissu pulmonaire, car les cellules immunitaires chargées de combattre les micro-organismes infectieux sécrètent des enzymes et des

composés qui détruisent le tissu pulmonaire. La destruction progressive des bronches par ces infections chroniques et l'obstruction des voies respiratoires supérieures aboutissent à une défaillance respiratoire.

En 1946, on entrevit les bases génétiques de la maladie en étudiant sa transmission héréditaire dans les familles atteintes : la mucoviscidose semblait être une maladie autosomique due à la mutation d'un seul gène. Un nourrisson recevant de ses parents une copie anormale du gène en cause et une copie normale produit la protéine normale et n'est pas malade (le gène normal l'emporte sur le gène muté). À l'inverse, un enfant recevant les deux versions anormales du gène souffre de mucoviscidose.

Aujourd'hui, on sait que la mucoviscidose est l'une des maladies génétiques les plus fréquentes et qu'elle touche tout les Blancs. Environ cinq pour cent sont des porteurs asymptomatiques, c'est-à-dire qu'ils possèdent une version normale et une version anormale du gène incriminé. Un enfant sur 2 500 acquiert deux gènes anormaux et souffre de mucoviscidose. On estime à 6 000 le nombre de personnes atteintes en France et à 200 le nombre de nouveau-nés qui naissent, chaque année, atteints de la maladie.

Une vague de chaleur révélatrice

En 1953, à New York, une vague de chaleur conduisit fortuitement à la découverte d'un diagnostic de la mucoviscidose. De nombreux enfants atteints de mucoviscidose ayant été conduits à l'hôpital parce qu'ils semblaient se déshydrater beaucoup plus vite que les autres enfants ; Paul di Sant' Agnese

et ses collègues de l'Université Columbia constatèrent que ces enfants perdaient un excès de sel dans leur sueur. Pendant plusieurs années, on ne comprit pas la cause de cette anomalie, mais on mit à profit l'observation en élaborant un test de dépistage qui mesure la concentration en ions chlorure dans la transpiration.

Ce test a permis de faire des diagnostics plus précoces et plus précis, et de mieux prendre en charge les enfants.

Ainsi le dysfonctionnement pancréatique n'est-il plus que rarement mortel, parce que l'on sait administrer des enzymes digestives au cours des repas. Les anomalies digestives étant compensées, 90 pour cent des incapacités ou des décès des patients atteints de mucoviscidose sont dus, aujourd'hui, aux troubles pulmonaires.

Contre ces derniers, plusieurs traitements sont également apparus. Les techniques les plus anciennes sont le drainage postural et la percussion thoracique : les patients étant allongés, la tête légèrement en contrebas, on leur tapote le dos ou la poitrine afin de décoller le mucus contenu dans les voies respiratoires. En outre, on administre des antibiotiques pour combattre les infections à répétition (sans succès jusqu'en 1950).

Après de deux ans, un nouveau traitement est apparu : on fait inhaler aux patients une préparation contenant l'enzyme DNase, qui liquéfie le mucus en hydrolysant les brins d'ADN longs et collants libérés par les cellules mortes.

L'étude biochimique de la mucoviscidose a progressé plus lentement

que l'étude clinique, mais le rythme s'est accéléré entre 1980 et 1985, quand on a compris que le défaut de fonction des organes atteints est anormal (un épithélium est une couche de cellules qui produit souvent du mucus, sépare différents compartiments de l'organisme et tapisse notamment les intestins et les bronches). Rapidement on a découvert que certains canaux chlorure du tissu épithélial de ces patients fonctionnaient mal.

Paul Quinton, de l'Université de Riverside, a montré que les épithéliums qui tapissent les conduits des glandes sudoripares n'extraient pas suffisamment d'ions chlorure de ces glandes. On tenait enfin l'explication de la saveur anormalement salée de la sueur des patients atteints de mucoviscidose. Normalement, la

1. EN TAPOTANT sur la poitrine de son enfant atteint de mucoviscidose, cette femme décolle le mucus qui encombre les voies respiratoires (le boîtier blanc sur le bras de l'enfant contient un dispositif de perfusion intraveineuse d'antibiotiques, qui combattent les

infections pulmonaires). À mesure qu'ils découvrent les causes moléculaires de la maladie, les biologistes en précisent les mécanismes ; ils espèrent trouver des médicaments qui empêcheraient l'obstruction des voies respiratoires.



Organes atteints par la mucoviscidose

L'anomalie génétique à l'origine de la mucoviscidose perturbe le fonctionnement de plusieurs organes, car différents conduits finissent par être obstrués par un mucus, ou autres sécrétions, épais et visqueux.

LES VOIES RESPIRATOIRES

L'encombrement et l'infection des bronches gêne la respiration. Les infections détruisent progressivement les poumons. L'atteinte pulmonaire est responsable de la plupart des décès des patients atteints de mucoviscidose.

LE FOIE

Chez cinq pour cent environ des patients, l'obstruction des petits canaux biliaires perturbe le fonctionnement du foie et la digestion.

LE PANCRÉAS

Chez 85 pour cent des malades, l'obstruction des canaux empêche le pancréas d'écouler dans l'intestin les enzymes digestives indispensables. Un diabète peut apparaître.

L'INTESTIN GRÊLE

Chez dix pour cent environ des nouveau-nés atteints, un bouchon épais obstrue l'intestin et nécessite une intervention chirurgicale.

L'APPAREIL REPRODUCTEUR

L'absence des petits conduits, tels les vides déférents, rend stériles 95 pour cent des hommes atteints. Les femmes sont parfois stériles également, car un épais bouchon de mucus empêche la pénétration des spermatozoïdes dans l'utérus.



GLANDE SUDORIPARE

LA PEAU

En raison d'un mauvais fonctionnement des glandes sudoripares, la transpiration contient un excès de sel (chlorure de sodium). On diagnostique la maladie en mesurant la concentration en ions chlorure dans la sueur.

sueur se forme à la base des glandes sudoripares, puis s'échappe vers la surface de la peau par un étroit canal.

Au début, c'est une solution riche en ions sodium et en ions chlorure, mais, à mesure que le liquide parcourt le canal des cellules épithéliales, le sodium, et seule reste l'eau : la sueur qui perle pour rafraîchir la surface de la peau est peu salée. Au contraire, chez les patients atteints de mucoviscidose, le tissu épithélial n'absorbe pas les ions chlorure – ni les ions sodium – de sorte que la concentration en sel de la sueur augmente anormalement.

En outre, Michael Knowles et Richard Boucher, de l'Université de Chapel Hill, examinèrent des poumons et observèrent que les cellules de l'épithélium des canaux bronchiques ont un excès de chlorure. Le flux de ces ions de l'épithélium vers la lumière (le centre) des canaux est trop faible, et l'absorption d'ions sodium par l'épithélium est excessive. De même, le transport des ions chlorure est anormal dans l'épithélium des canaux pancréatiques de souris malades, tout comme dans l'intestin humain.

La découverte du gène

Alors que plusieurs équipes de biochimistes étudiaient le transport des ions chlorure, les biologistes moléculaires cherchaient le gène responsable de la mucoviscidose. En 1989, Lap-Chee Tsui, John Riordan et leurs collègues de l'Hôpital des enfants malades de Toronto, en collaboration avec Francis Collins, à l'Université du Michigan, ont isolé ce gène. Comme la protéine produite par ce gène agit directement ou indirectement sur le mouvement des ions chlorure, ils l'ont nommée CFTR, pour *cystic fibrosis transmembrane conductance regulator*, c'est-à-dire « régulateur de la conductance transmembranaire dans la mucoviscidose ». Au cours de la recherche sur le gène, les chercheurs ont découvert une anomalie de l'ADN présente dans près de 70 pour cent des cas de mucoviscidose. Cette mutation, nommée $\Delta F508$, est une délétion de trois paires de bases (les briques constitutives de l'ADN) de ce gène ; elle provoque, dans la protéine codée par ce gène amputée, la disparition d'un acide aminé : une phénylalanine en position 508.

Comment prouver que ce gène était bien responsable de la mucoviscidose ? On aurait pu insérer un exemplaire normal du gène dans des cellules d'un

patient atteint de mucoviscidose et vérifier que, de cette façon, on corrigeait bien le transport des ions chlorure, mais les généticiens eurent des difficultés à construire une version simplifiée du gène. Le problème fut résolu au cours de l'été 1990, par Richard Gregory, de la Société Genzyme Corporation.

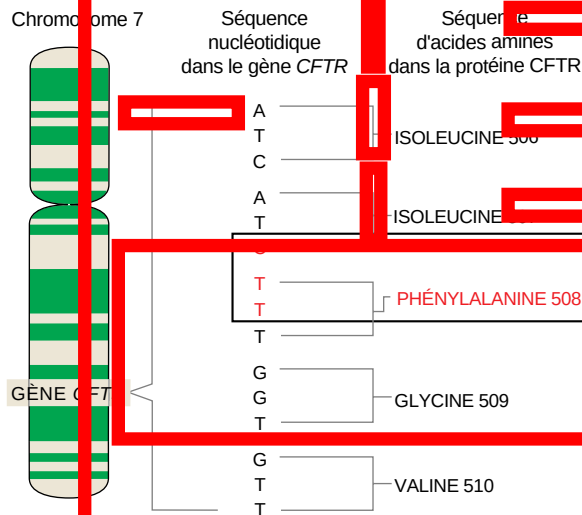
Nous avons alors introduit le gène normal dans des cellules épithéliales prélevées dans les voies respiratoires supérieures de patients atteints de mucoviscidose. Puis nous avons exposé ces cellules à de l'AMP cyclique, une molécule qui, normalement, stimule le transport des ions chlorure dans l'épithélium des voies respiratoires, mais qui est sans effet sur du tissu prélevé chez ces patients. Nous avons alors constaté que l'AMP cyclique déclenchait un flux d'ions chlorure hors des cellules traitées : le gène semblait normaliser ces cellules. Nous n'étions pas les seuls à nous réjouir : par des méthodes différentes, d'autres équipes avaient obtenu de semblables résultats sur des cellules de l'épithélium pancréatique.

Puisqu'il n'était pas possible de normaliser des cellules en culture, pourquoi, un jour lointain, administrer le gène CFTR normal aux patients et corriger ainsi l'anomalie biochimique incriminée ? Nous savions déjà que cette voie serait semée d'embûches. La suite des études l'a confirmé.

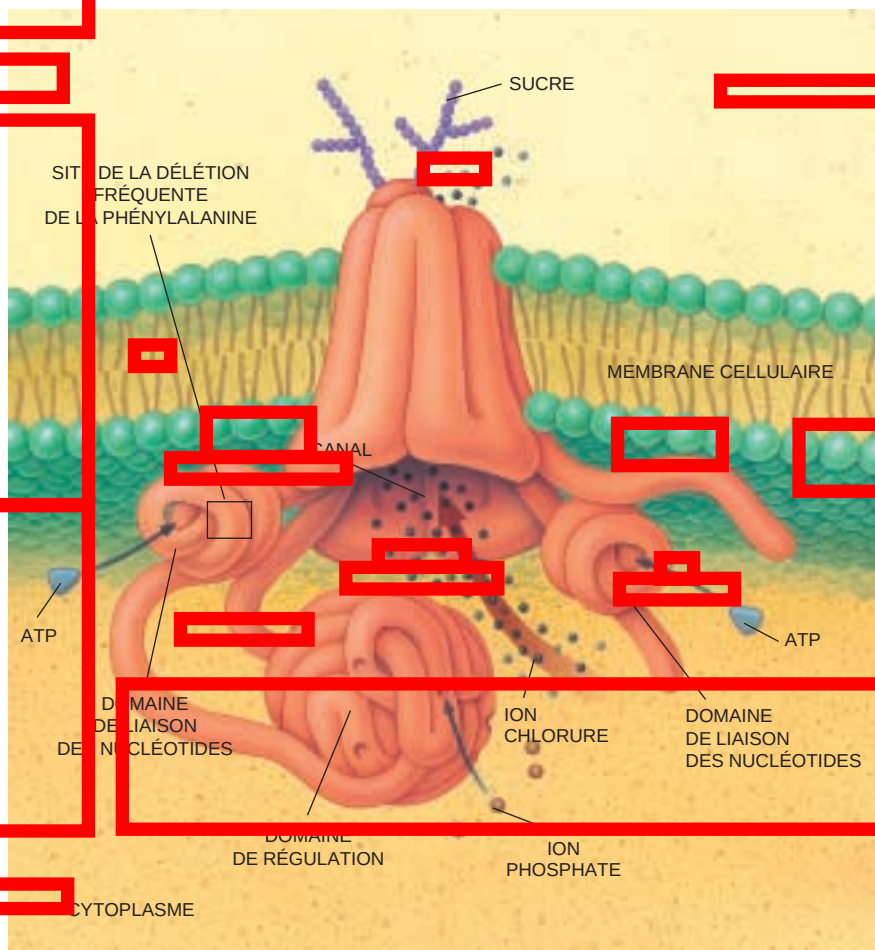
Le rôle de la protéine CFTR

À ce moment apparut un autre résultat important sur le rôle de la protéine CFTR dans le transport des ions chlorure. La séquence déduite de celle du gène, donnait quelques indices sur sa fonction. Elle ressemblait beaucoup à celle des protéines nommées transporteurs ATPases ou transporteurs ABC. Cette similitude indique que le comportement et la structure tridimensionnelle de la protéine CFTR sont semblables à ceux des protéines de cette famille.

Les bactéries pompent les substances nutritives hors de leur cellule à l'aide de protéines de la famille des transporteurs ATPases. La protéine de résistance multidrogue, qui rejette malheureusement les substances chimiothérapeutiques hors des cellules cancéreuses, fait également partie de cette famille. Lorsqu'elles sont repliées, ces ATPases présentent généralement quatre domaines : deux traversent la membrane



2. LE GÈNE RESPONSABLE DE LA MUCOVISCIDOSE se trouve sur le chromosome 7 (à gauche) et produit une protéine nommée CFTR. L'anomalie le plus souvent responsable de cette maladie est une déletion de trois nucléotides du gène (les lettres rouges, au centre) ; le gène qui contient cette mutation $\Delta F508$ code une protéine CFTR tronquée, à qui il manque un acide aminé (la phénylalanine en position 508 (à droite)). La machinerie cellulaire qui exprime le gène $\Delta F508$ tronqué, la séquence ATT au lieu de la séquence ATC TTT, de sorte qu'elle fabrique une isoleucine au lieu d'une phénylalanine, normalement suivie par une glycine.



3. LA PROTÉINE CFTR NORMALE forme un canal perméable aux ions chlorure, inséré dans la membrane externe de nombreuses cellules. La structure de cette protéine n'est pas encore totalement élucidée, mais on sait que trois domaines cytoplasmiques commandent les mouvements des ions chlorure dans le canal. Le passage a seulement lieu lorsque les deux domaines de liaison des nucléotides fixent l'adénosine triphosphate (ATP) et la dégradent, et quand le domaine régulateur capte des groupes phosphate.

(chacun d'eux contient plusieurs segments transmembranaires) et deux baignent dans le cytoplasme. Ces derniers, non seulement ils captent des nucléotides, captent l'ATP (l'adénosine triphosphate) et en dissocient des groupes phosphate afin de produire l'énergie nécessaire au pompage. On avait alors supposé que la molécule CFTR avait sans doute une fonction en outre un domaine localisé dans le cytoplasme, qui lui conférerait des propriétés supplémentaires.

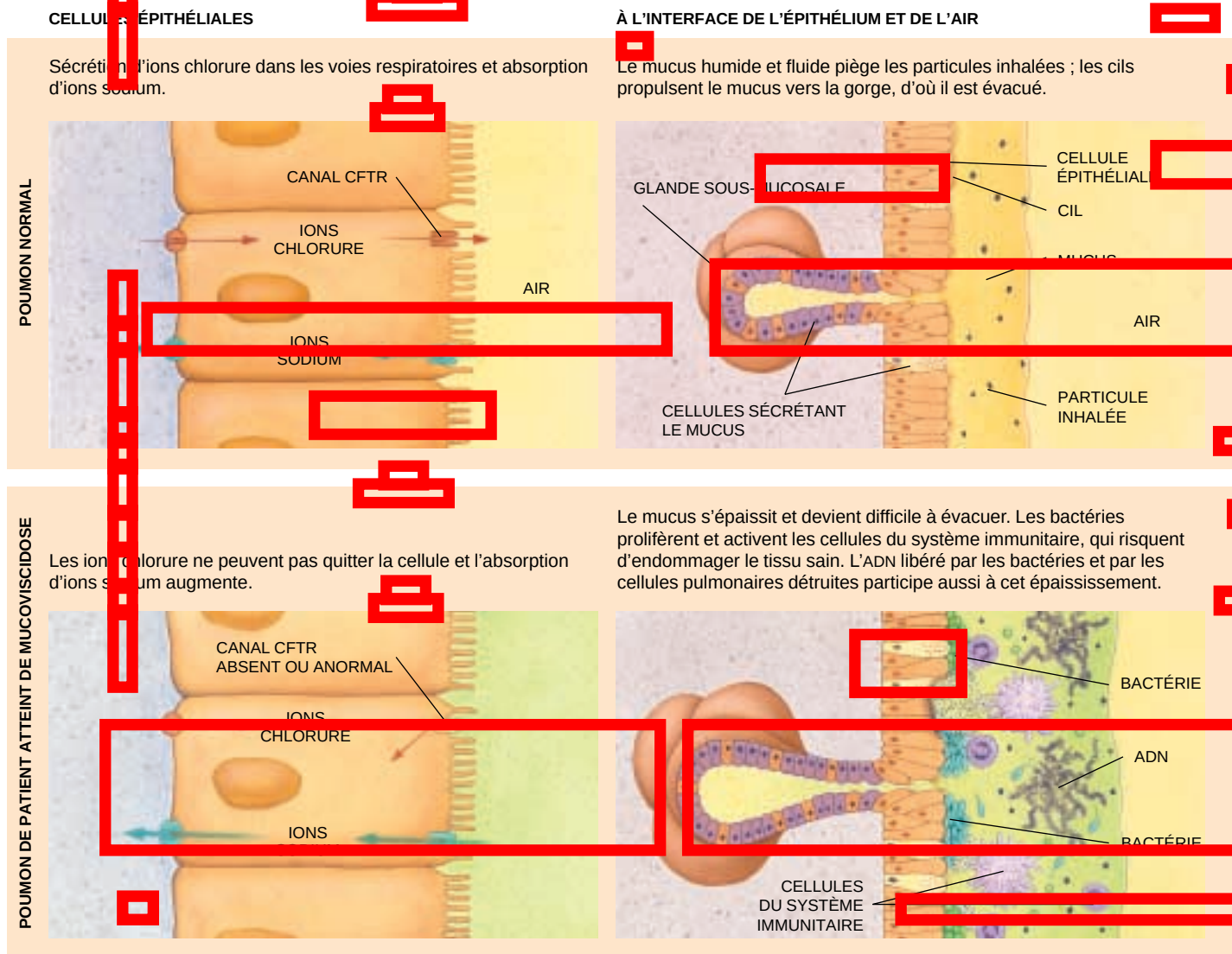
Certains biochimistes supposèrent ainsi que la pompe actionnée par l'ATP, qui participait au transport de composés spécifiques, de l'intérieur vers l'extérieur des cellules épithéliales, ou inversement ;

les composés pompés auraient déclenché la traversée des membranes cellulaires par les ions chlorure, dans un canal. Pourquoi un canal séparé ? Parce qu'aucun des canaux chlore connus (nécessaires au transport direct des ions chlorure) n'avait la structure repliée qui semblait être celle de la protéine CFTR.

Une deuxième possibilité aurait été que la protéine CFTR soit fixée sur les canaux chlore et commande leur activité. Enfin, il était également possible que la protéine CFTR soit un canal chlore, bien que sa structure fût différente de celle des canaux ioniques connus alors ; les deux domaines traversant la membrane auraient alors formé le pore où les ions chlorure seraient passés.

La troisième hypothèse se révéla la bonne : la protéine CFTR était un canal chlore. Nous avons montré que l'introduction d'un gène codant cette protéine dans des cellules imperméables aux ions chlorure permettait le transport transmembranaire de ces ions. Quand ce gène était modifié dans les régions supposées participer au mou-

vement de la protéine, l'affinité du canal pour les ions chlorure diminuait. Les derniers doutes furent dissipés quand J. Riordan et ses collègues introduisirent des protéines CFTR dans des membranes lipidiques (des bicouches lipidiques) dépourvues d'autres canaux ioniques : l'introduction de la protéine rendait la membrane perméable aux ions.



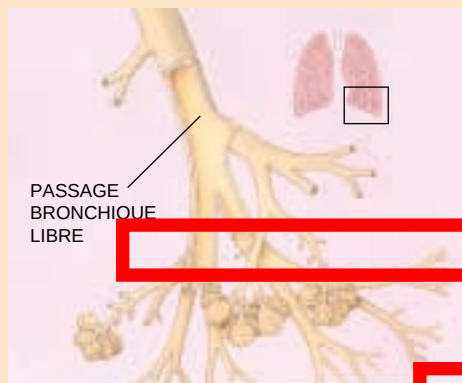
4. LES MÉCANISMES MOLÉCULAIRES de l'atteinte pulmonaire, chez les personnes souffrant de mucoviscidose, sont progressivement élucidés. Chez les individus sains, les principales cellules épithéliales qui tapissent les voies respiratoires (*en haut à gauche*) ont au moins deux types de canaux, situés du côté du passage de l'air. L'un d'eux, le canal CFTR (*en rouge*), libère des ions chlorure dans la bronchiole ;

l'autre (*en vert*) capte des ions sodium. Ces échanges permettent au mucus produit par d'autres cellules de rester fluide et de s'évacuer aisément des voies respiratoires (*en haut au centre*) ; ces dernières restent dégagées (*en haut à droite*). Chez les personnes atteintes de mucoviscidose, une absence ou une anomalie du canal chlore CFTR inhibe tout mouvement des ions chlorure (*en bas à gauche*) et entraîne,

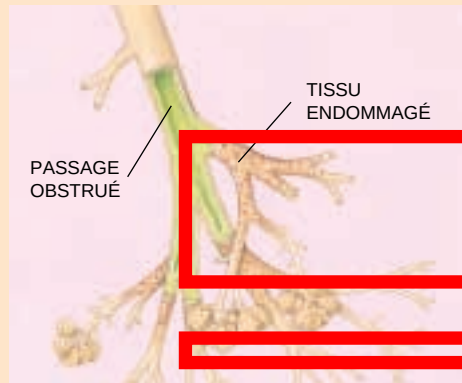
Puis des études élucidèrent le rôle de la région « spécifique » de la protéine CFTR, absente des transporteurs ATPases : c'est un domaine de régulation, nommé domaine R, dont l'activité est commandée, dans le cytoplasme, par l'addition ou l'élimination de groupes phosphate. Quand le domaine R ne porte pas de groupes phosphate, les ions chlorure ne peuvent pas pénétrer dans le canal. En revanche, à la suite de diverses modifications chimiques dans les cellules (notamment, d'une augmentation de la concentration en ATP), les enzymes ajoutent un groupe phosphate au domaine R, ce qui amorce le mouvement des ions chlorure dans le canal.

BRONCHES ET BRONCHIOLES

Les voies respiratoires sont dégagées et la respiration est aisée.



Les voies respiratoires s'obstruent et commencent à se détériorer.



indirectement, l'absorption d'ions sodium en excès (la flèche verte épaisse). Le mucus s'épaissit et devient difficile à évacuer (en bas au centre) ; les bactéries qui y sont piégées prolifèrent. Les voies respiratoires sont obstruées et détériorées (en bas à droite).

Ainsi, un domaine régulateur se comportait comme un portillon qui bloquait l'ouverture du canal vers le cytoplasme, lorsqu'il n'est pas phosphorylé (c'est-à-dire qu'il est dépourvu de groupes phosphate). L'addition d'un groupe phosphate déplace le domaine, ouvre le portillon, permettant aux ions chlorure de traverser le canal. D'autres facteurs ont été identifiés qui, en l'absence de liaison des nucléotides agissent aussi sur l'activité du canal. Pour que les ions puissent traverser le canal, ces domaines doivent vraisemblablement fixer de l' ATP et le dégrader.

Les dégâts causés par les mutations

À ce stade, les chercheurs ont découvert que la CFTR forme un canal chlore et l'on avait quelques indices sur son mode de fonctionnement, mais on ignorait encore pourquoi les mutations du gène CFTR l'inhibent. Les conséquences de la mutation la plus courante – la délétion qui supprime la phénylalanine en position 508 de la protéine CFTR – ont été particulièrement étudiées.

Cette délétion perturbe les déplacements intracellulaires de la protéine CFTR. De nombreuses protéines et, notamment, la protéine CFTR normales subissent diverses modifications dans le cytoplasme de la cellule, après leur synthèse. Dans un compartiment cellulaire nommé réticulum endoplasmique, elles sont liées à quelques groupes sucre ; puis, dans l'appareil de Golgi, elles reçoivent encore d'autres groupes sucre, avant d'être acheminées vers la membrane cellulaire. Au contraire, la protéine CFTR défectueuse, dans le réticulum endoplasmique : sa migration est vraisemblablement bloquée parce que le système de « contrôle de la qualité » du réticulum endoplasmique détecte une anomalie de repliement de la protéine. Les protéines défectueuses sont retenues pour être dégradées et ne subissent pas les étapes ultérieures de maturation.

Bien que la mutation située en position 508 soit la plus fréquente, de nombreuses autres ont été identifiées chez les patients atteints de mucoviscidose. La majorité d'entre elles empêchent la protéine de progresser jusqu'à la membrane cellulaire. Certaines interdisent la synthèse de la protéine CFTR, d'autres autorisent cette synthèse et l'insertion de la protéine dans la membrane cellulaire, mais le canal ne fonc-

tionne pas. Les mouvements des ions chlorure seraient alors interdits, parce que le domaine de liaison des nucléotides ou la paroi interne du canal ionique seraient anormaux.

Généralement, les patients dont les deux copies du gène CFTR sont mutées en position 508 sont gravement malades, sans doute parce qu'une

Tests et dilemmes

Aujourd'hui, on connaît de nombreuses mutations génétiques responsables de la mucoviscidose, et les parents qui le veulent peuvent aisément savoir s'ils sont porteurs de la maladie, c'est-à-dire si leurs cellules contiennent une copie mutée du gène CFTR. Une femme peut également savoir si le fœtus qu'elle porte a hérité de deux copies anormales de ce gène (une copie provenant de chacun des parents) et s'il risque d'être atteint de mucoviscidose.

Pour beaucoup, la décision à prendre lorsqu'on a les résultats des tests est très difficile à prendre : les tests génétiques réalisés en laboratoire ne permettent d'identifier que les mutations les plus fréquentes du gène CFTR, de sorte qu'un test négatif, certes rassurant, n'élimine pas totalement l'éventualité qu'une personne soit un porteur sain ou qu'un embryon soit porteur de deux gènes mutés. Toutefois, on considère qu'un test prénatal est normal quand le fœtus ne porte aucun des mutants CFTR présents chez les parents. De surcroît, on ne sait pas prévoir la gravité de la maladie chez un enfant qui reçoit deux gènes CFTR mutés : la maladie est grave, voire très grave dans la plupart des cas, mais certaines personnes ne sont que modérément malades.

Certains parents veulent croire que les progrès de la médecine seront assez rapides pour prévenir, chez les enfants qui naissent aujourd'hui, la détérioration fatale des poumons, caractéristique de la mucoviscidose. Toutefois, les recherches médicales se heurtent souvent à des obstacles inattendus et échouent avant d'avoir atteint leurs objectifs. C'est pourquoi, même si les traitements gagnent en efficacité au cours des prochaines années, personne ne peut prévoir quand on saura guérir la mucoviscidose.

Les couples contraints à prendre des décisions difficiles sont partagés entre l'inefficacité relative des traitements dont on dispose aujourd'hui et l'espoir immense mis dans les techniques en cours d'élaboration.

Quelques traitements des anomalies pulmonaires

La maladie pulmonaire associée à la mucoviscidose peut être combattue de diverses façons. Les traitements vont de la greffe d'un poumon sain à la thérapie génique, en passant par l'administration de médicaments et de soins d'hygiène et qui doivent compenser l'anomalie génétique responsable des lésions pulmonaires.

ANOMALIE	TRAITEMENT POTENTIEL	SITUATION ACTUELLE
Mutation du gène <i>CFTR</i>	Apporter un gène normal par thérapie génique ; apporter une protéine <i>CFTR</i> normale aux cellules.	Des essais cliniques sont en cours pour tester la thérapie génique ; les méthodes d'administration des protéines ne sont pas efficaces.
La protéine <i>CFTR</i> ne parvient pas jusqu'à la membrane cellulaire extérieure	Administrer des médicaments capables d'escorter la protéine jusqu'à la membrane cellulaire des cellules épithéliales.	On ne dispose d'aucune « escorte moléculaire ».
Le transport des ions chlorure à travers les canaux <i>CFTR</i> de la membrane cellulaire est anormal	Administrer des médicaments qui stimuleraient l'activité d'autres classes de canaux chlorure présents sur les cellules épithéliales.	De telles substances sont en cours d'essais cliniques.
Les voies respiratoires sont obstruées par un mucus visqueux	Tapoter le patient pour faciliter l'élimination des sécrétions ; administrer de la DNase et autres substances qui liquéfient les sécrétions.	La percussion thoracique est une méthode classique. L'utilisation de la DNase est aujourd'hui fréquente ; des substances analogues sont testées sur des animaux.
Des infections à répétition endommagent les poumons	Administrer des antibiotiques qui détruisent les bactéries ou des anticorps (des molécules du système immunitaire) qui éliminent les micro-organismes.	Les antibiotiques sont très utilisés ; les anticorps sont en cours d'essais cliniques préliminaires.
La réaction immunitaire dirigée contre les bactéries endommage le tissu pulmonaire	Administrer des médicaments qui limitent les effets néfastes de la réaction immunitaire.	On utilise parfois des anti-inflammatoires stéroïdiens ; d'autres agents anti-inflammatoires sont en cours d'évaluation.
Destruction du poumon	Greffer un poumon sain.	La transplantation est parfois pratiquée.

Même si l'on améliore l'efficacité des dispositifs de distribution des gènes thérapeutiques, un obstacle subsistera : dans les épithéliums, la plupart des cellules sont renouvelées au bout de quelques mois. À moins d'introduire le gène *CFTR* normal dans les cellules souches, on devrait alors renouveler la thérapie génique plusieurs fois par an, ce qui serait contraignant pour les malades. Une autre difficulté est la réaction immunitaire dirigée contre les adénovirus qui risque d'apparaître chez ces patients, détruisant le vecteur de l'ADN thérapeutique. Pour que la thérapie génique réussisse, on devra trouver un vecteur capable de franchir la réaction immunitaire ou de créer des vecteurs qui ne déclenchent pas de réaction immunitaire.

Au lieu d'utiliser des virus, on pourrait introduire le gène thérapeutique dans des liposomes (des molécules de graisse s'assemblant en une vésicule) qui pénètrent aisément dans les cellules, mais que le système immunitaire

ne détecte pas comme des intrus. Les travaux d'Eric Alton et de ses collègues de l'Hôpital Brompton, à Londres, indiquent que ce procédé restaure la perméabilité aux ions chlorure de l'épithélium nasal. En outre, l'efficacité des vecteurs non viraux de gènes thérapeutiques doit encore être améliorée.

Michael Welsh est professeur de médecine, de physiologie et de biophysique à la Faculté de médecine d'Iowa. Alan Smith est responsable de la recherche de la Société Genzyme, à Framingham.

Francis S. Collins, *Cystic Fibrosis. Molecular Biology and Therapeutic Implications*, in *Science*, vol. 256, pp. 774-779, 8 mai 1992.

M.J. WELSH, M.P. ANDERSON, D.P. RICH, H.A. BERGER, G.M. DENNING, L.S. OSTEDGAARD, D.N. SHEPPARD, S.H. CHENG, R.J. GREGORY et A.E. SMITH, *Cystic Fibrosis Transmembrane Conductance Regulator: A Chloride Channel with*

Il reste beaucoup à faire avant de comprendre comment l'absence de la protéine *CFTR* provoque les symptômes de la mucoviscidose et avant d'utiliser la thérapie génique en routine. Néanmoins les progrès rapides suscitent un espoir raisonnable chez ceux qui se préoccupent de la mucoviscidose.

Novel Regulation, in *Neuron*, vol. 8, n° 5, pp. 811-829, mai 1992.

J.R. RICHARDSON, *The Cystic Fibrosis Transmembrane Conductance Regulator*, in *Annual Review of Physiology*, vol. 55, pp. 609-631, 1993.

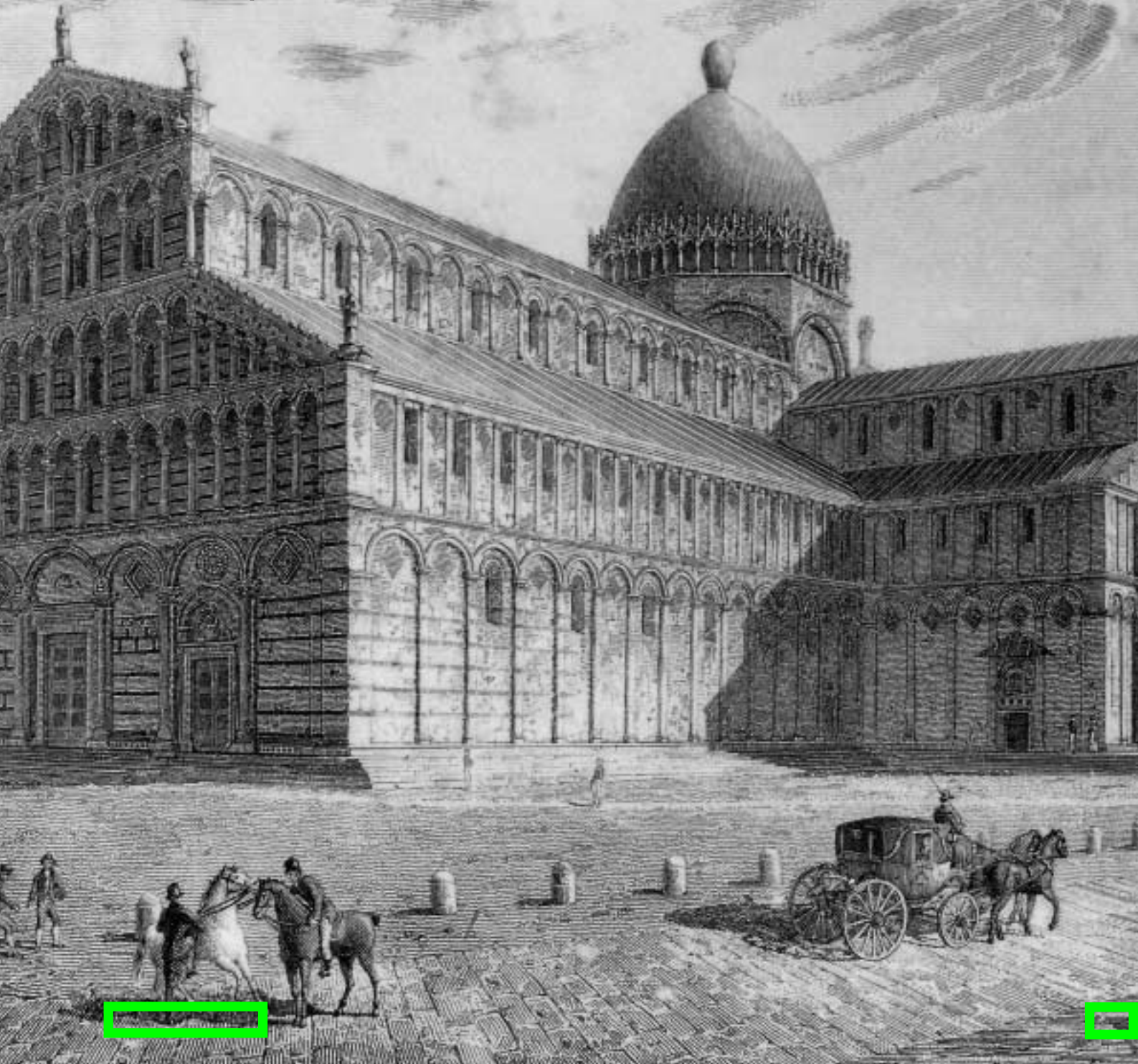
M.J. WELSH et A.E. SMITH, *Molecular Mechanisms of CFTR Chloride Channel Dysfunction in Cystic Fibrosis*, in *Cell*, vol. 72, n° 7, pp. 1251-1254, 2 juillet 1992.

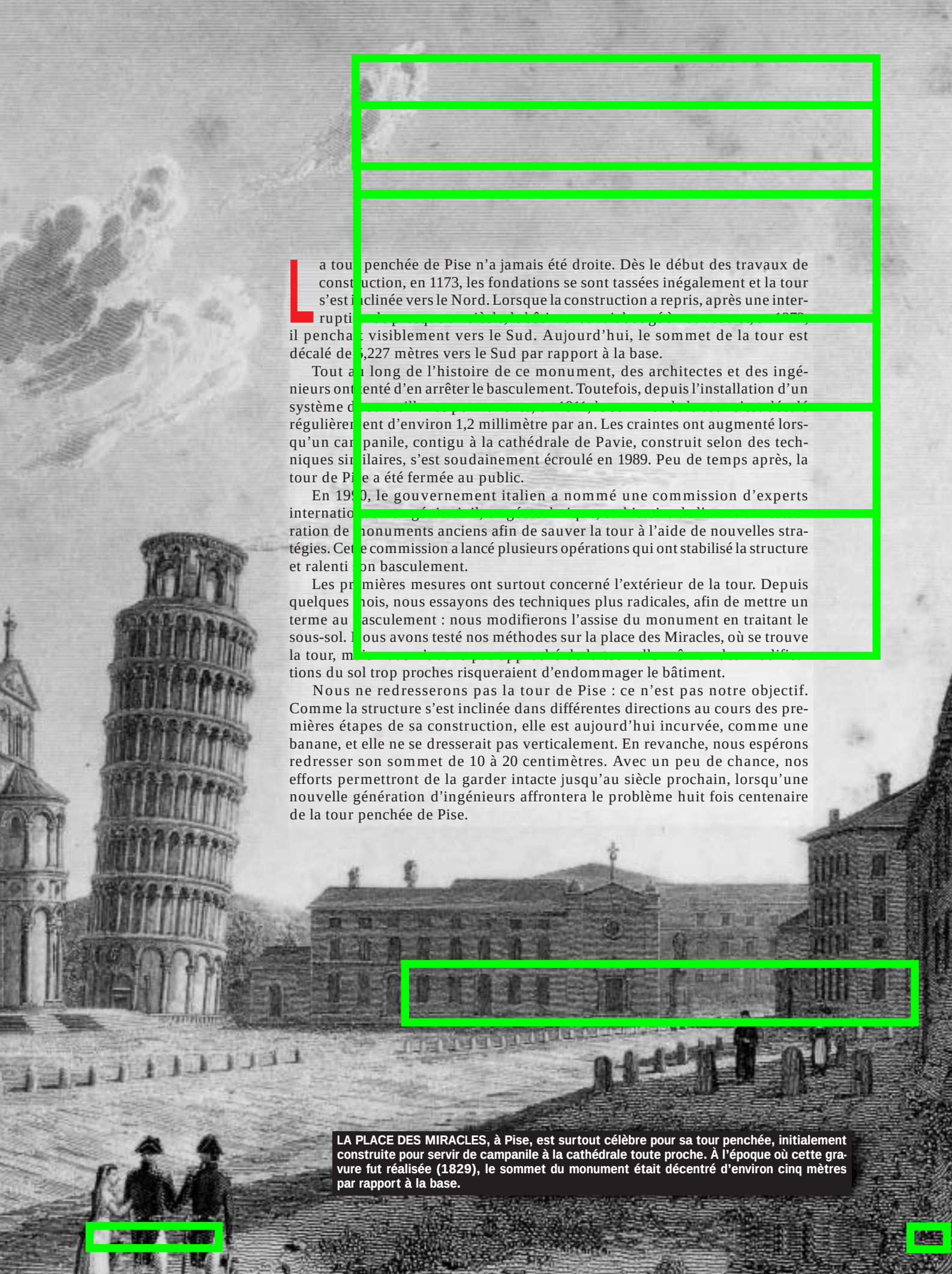
M.J. WELSH, L.C. TSUI, T.F. BOAT et A.L. BEAUDET, *Cystic Fibrosis*, in *Metabolic and Molecular Basis of Inherited Disease*, sous la direction de C.R. Scriver, A.L. Beaudet, W.S. Sly et D. Valle, McGraw-Hill, 1994.

Le redressement de la tour de Pise

PAOLO HEINIGER

*Depuis le XII^e siècle, la tour de Pise s'incline dangereusement.
Les techniques modernes du génie civil la sauveront-elles ?*





La tour penchée de Pise n'a jamais été droite. Dès le début des travaux de construction, en 1173, les fondations se sont tassées inégalement et la tour s'est inclinée vers le Nord. Lorsque la construction a repris, après une interruption de sept ans, elle s'est redressée vers le Sud. Aujourd'hui, le sommet de la tour est décalé de 5,227 mètres vers le Sud par rapport à la base.

Tout au long de l'histoire de ce monument, des architectes et des ingénieurs ont tenté d'en arrêter le basculement. Toutefois, depuis l'installation d'un système de contre-poids, la tour s'incline régulièrement d'environ 1,2 millimètre par an. Les craintes ont augmenté lorsqu'un campanile, contigu à la cathédrale de Pavie, construit selon des techniques similaires, s'est soudainement écroulé en 1989. Peu de temps après, la tour de Pise a été fermée au public.

En 1990, le gouvernement italien a nommé une commission d'experts internationaux pour étudier les méthodes de sauvetage de la tour. Cette commission a lancé plusieurs opérations qui ont stabilisé la structure et ralenti son basculement.

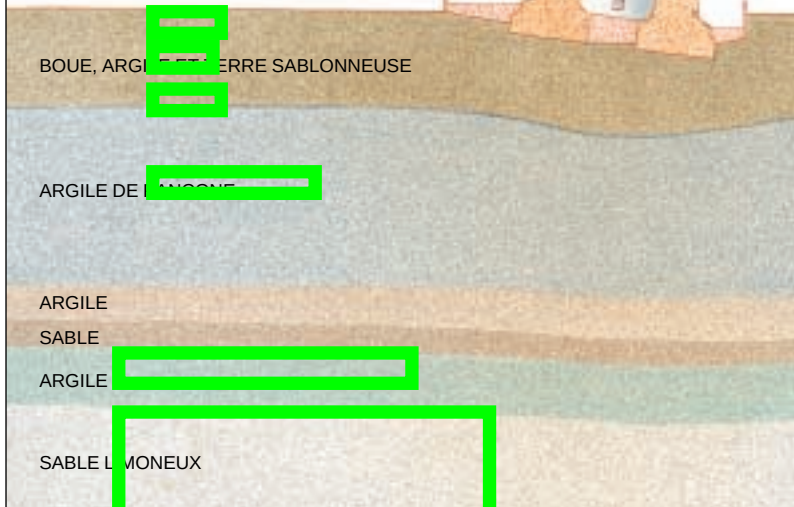
Les premières mesures ont surtout concerné l'extérieur de la tour. Depuis quelques mois, nous essayons des techniques plus radicales, afin de mettre un terme au basculement : nous modifierons l'assise du monument en traitant le sous-sol. Nous avons testé nos méthodes sur la place des Miracles, où se trouve la tour, mais les vibrations du sol trop proches risqueraient d'endommager le bâtiment.

Nous ne redresserons pas la tour de Pise : ce n'est pas notre objectif. Comme la structure s'est inclinée dans différentes directions au cours des premières étapes de sa construction, elle est aujourd'hui incurvée, comme une banane, et elle ne se dresserait pas verticalement. En revanche, nous espérons redresser son sommet de 10 à 20 centimètres. Avec un peu de chance, nos efforts permettront de la garder intacte jusqu'au siècle prochain, lorsqu'une nouvelle génération d'ingénieurs affrontera le problème huit fois centenaire de la tour penchée de Pise.

LA PLACE DES MIRACLES, à Pise, est surtout célèbre pour sa tour penchée, initialement construite pour servir de campanile à la cathédrale toute proche. À l'époque où cette gravure fut réalisée (1829), le sommet du monument était décentré d'environ cinq mètres par rapport à la base.

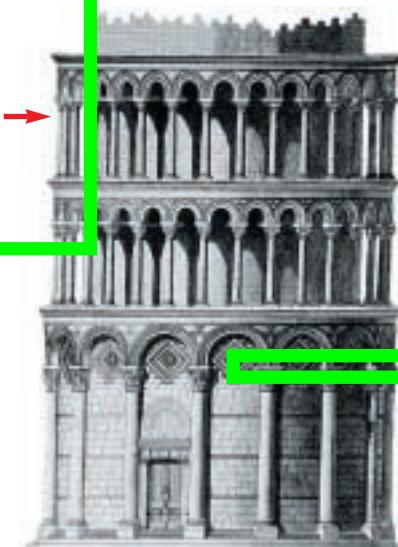
La fondation

La tour a basculé parce que les couches d'argile et de terrain situées au-dessous se sont tassées de manière inégale. Les sept premiers mètres de sol sont composés d'un mélange de boue, d'argile et de sable. Au-dessous, jusqu'à 20 mètres environ, l'«argile de Pancoré» est remarquable pour sa couleur bleu-gris. La limite sableuse entre ces deux couches se situe à environ 20 mètres de profondeur. Au-dessous de la majeure partie de la place des Miracles, sauf sous la tour, où elle forme une dépression, les couches d'argile et de sable alternent jusqu'à 70 mètres de profondeur. Toute la place s'affaisse progressivement, mais à des vitesses différentes. Certains endroits s'affaissent plus vite que d'autres. Les constructeurs de la tour ignoraient qu'ils avaient choisi l'un de ces emplacements.

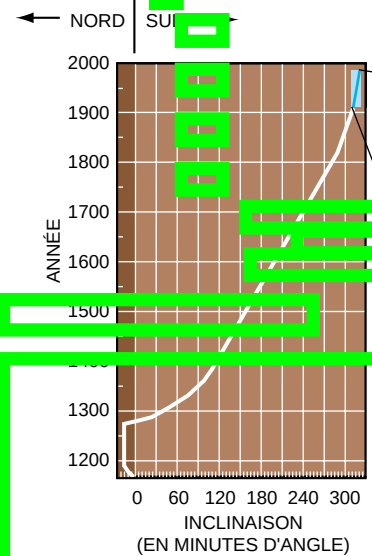


Première étape : 1173-1178

La tour de Pise s'est penchée progressivement au cours de sa construction, qui se déroula en trois étapes, sur presque 200 ans. Les premières pierres ont été posées en 1173. La tour pencha alors légèrement vers le Nord. Pour conserver l'horizontalité des premiers étages, les architectes ont allongé les colonnes et les arches du troisième niveau du côté Nord (flèche rouge). Des troubles politiques ont interrompu la construction en 1178, pendant que l'on construisait le quatrième étage.



INCLINAISON EN 1178

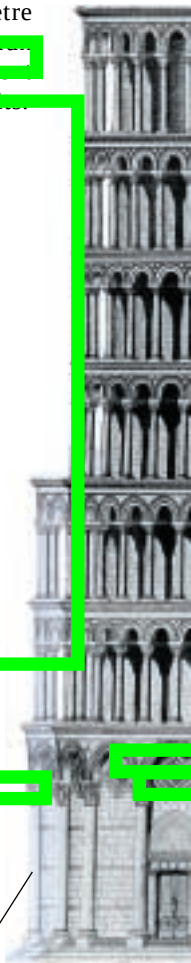


Huit siècles de basculement

Dès sa construction, la tour a penché vers le Nord, mais, pendant la majeure partie de son existence, elle s'est inclinée vers le Sud. Le basculement a été maximale pendant la première moitié du XIV^e siècle. Entre 1911, où l'on a commencé à surveiller attentivement le monument, et 1990, le sommet de la tour s'est déplacé vers le Sud de 1,2 millimètre par an en moyenne. En 1988, les travaux d'entretien ont commencé à corriger l'inclinaison.

Deuxième étape : 1272-1278

Les travaux reprirent presque 100 ans plus tard, en 1272. La tour penchait alors vers le Sud, comme aujourd'hui. Les architectes espéraient corriger cette inclinaison en construisant, au cinquième niveau, la face Sud (flèche rouge) légèrement plus haute que la face Nord. En 1278, alors que les travaux étaient en cours, les travaux ont été interrompus, à nouveau en raison de troubles politiques. En 1292, la tour penchait tant que l'on demanda à un groupe de maçons d'examiner le problème : c'était la première des nombreuses commissions qui ont étudié la tour depuis sept siècles.

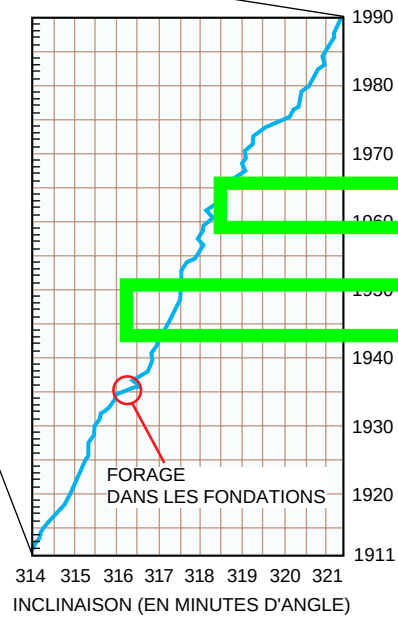


INCLINAISON EN 1278

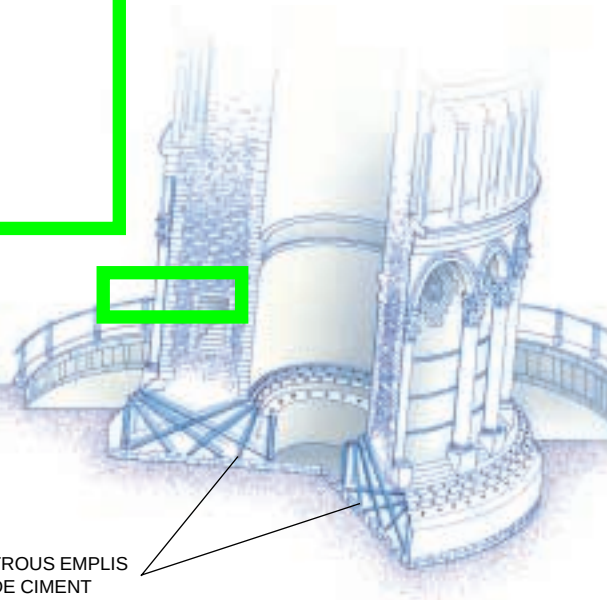
INCLINAISON EN 1278

Renforcer les fondations

Des travaux pour sauver la tour ont eu des conséquences parfois inattendues et indésirables. En 1935, on suppose que des résurgences d'eau, consécutives au creusement d'un fossé autour du bâtiment, qui s'était enfoncé de 2,60 mètres, affaiblissaient les fondations, et l'on a alors vu le besoin de la tour pour bloquer les infiltrations : on a foré des trous inclinés que l'on a ensuite remplis de ciment. Les conséquences de cette opération sont visibles sur la courbe (à gauche) : en 1935, le basculement a été six fois plus rapide que l'année précédente.

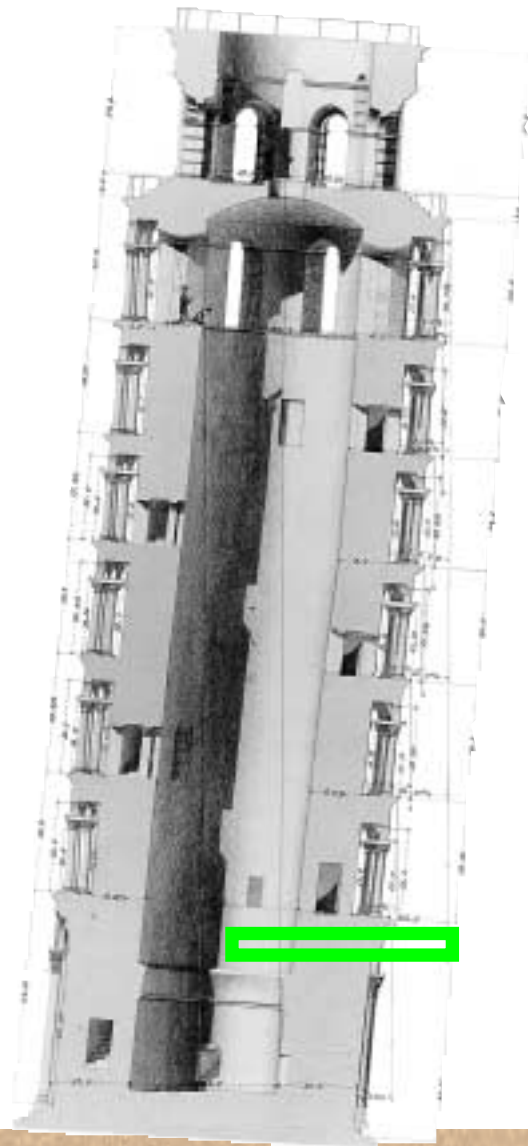
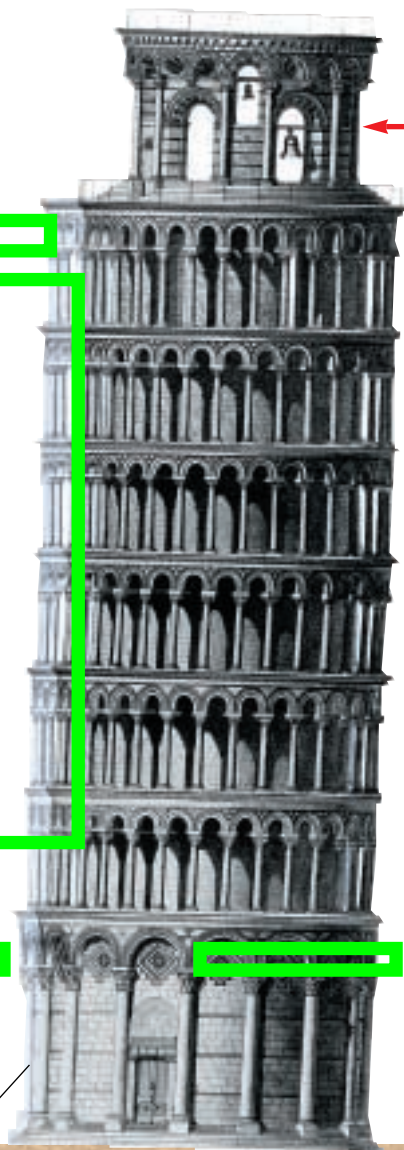


TROUS EMBLIS DE CIMENT



Troisième étape : 1360-1370

Le huitième et dernier étage, la chambre des cloches, a été construit entre 1360 et 1370. À nouveau, les architectes ont tenté de corriger l'inclinaison de la tour vers le Sud en inclinant la chambre des cloches vers le Nord (flèche rouge). Les diverses corrections apportées par les constructeurs ont permis de réaliser une coupe verticale de la tour (à droite). Ces tentatives de correction du plan, combinées au rythme lent de la construction (qui a laissé aux fondations le temps de se tasser, donc de se renforcer et de supporter l'inclinaison) ont jusqu'à présent empêché la tour de se renverser.



INCLINAISON EN 1278

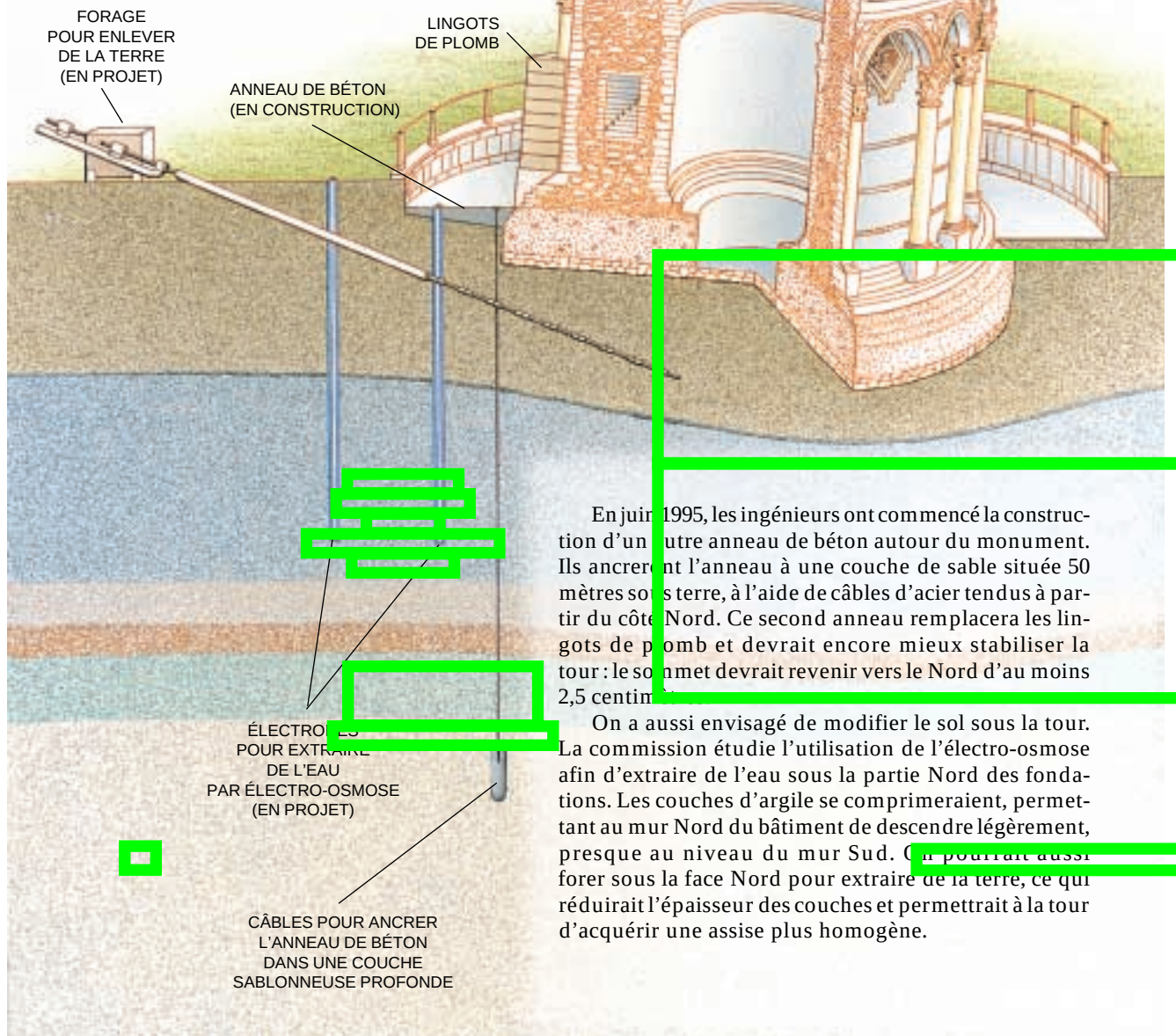
INCLINAISON EN 1370

INCLINAISON ACTUELLE

Les tentatives

La commission internationale chargée de sauver la tour a étudié de nombreuses techniques pour stabiliser le monument. L'inclinaison exerce une forte contrainte sur le mur Sud-Ouest, à environ 45 degrés du plan d'inclinaison maximale : ce mur pourrait s'effondrer. En 1988, on a installé un premier étage de la tour avec des câbles d'acier afin d'empêcher que la pierre ne se fende.

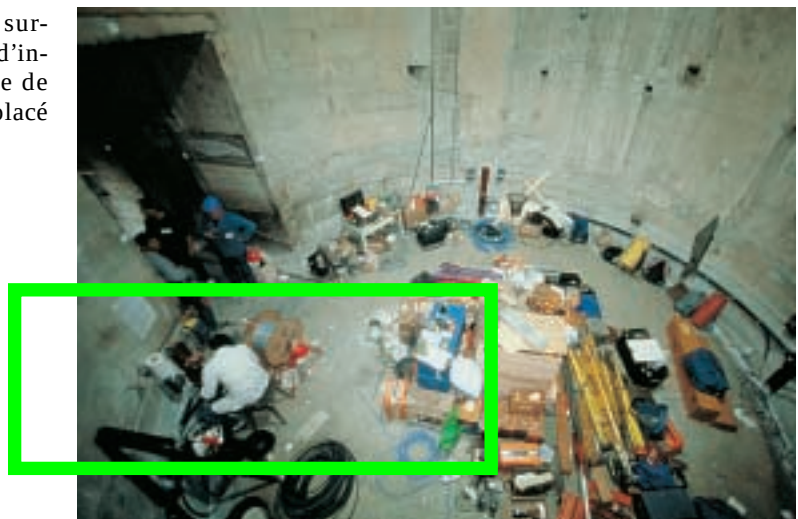
Ensuite on a entrepris d'arrêter le basculement de la tour. Plus de 750 tonnes de lingots de plomb ont été placés sur la face Nord d'un anneau de béton qui entoure la base de la tour. Ces poids ont arrêté le basculement et ont ramené le sommet du bâtiment vers le Nord d'environ 2,5 centimètres en neuf mois, du 1^{er} août 1988 à février 1989.



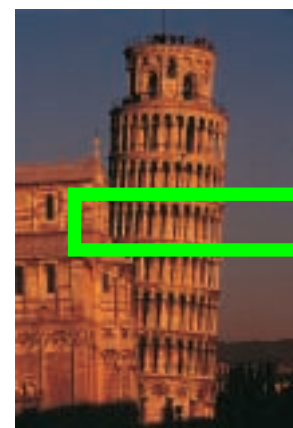


Plus de 750 tonnes de plomb ont été disposées sur la face Nord de la base de la tour. Ces poids ont enfoncé les fondations sous le mur Nord, ce qui a redressé la tour de quelques centimètres.

À l'intérieur de la tour, des instruments de surveillance détectent les petites variations d'inclinaison. En septembre 1995, en l'espace de deux jours, le sommet de la tour s'est déplacé vers le Sud de 0,24 millimètre.



Des câbles d'acier encerclent le premier étage, qui menace de s'effondrer en raison de la contrainte exercée à cet endroit. En raison de l'inclinaison de la tour, une grande partie de son poids (14 700 tonnes) repose sur la face Sud-Ouest.



Paolo HEINIGER travaille au sauvetage de la tour de Pise.

Les tremblements de terre géants du Pacifique Nord-Est

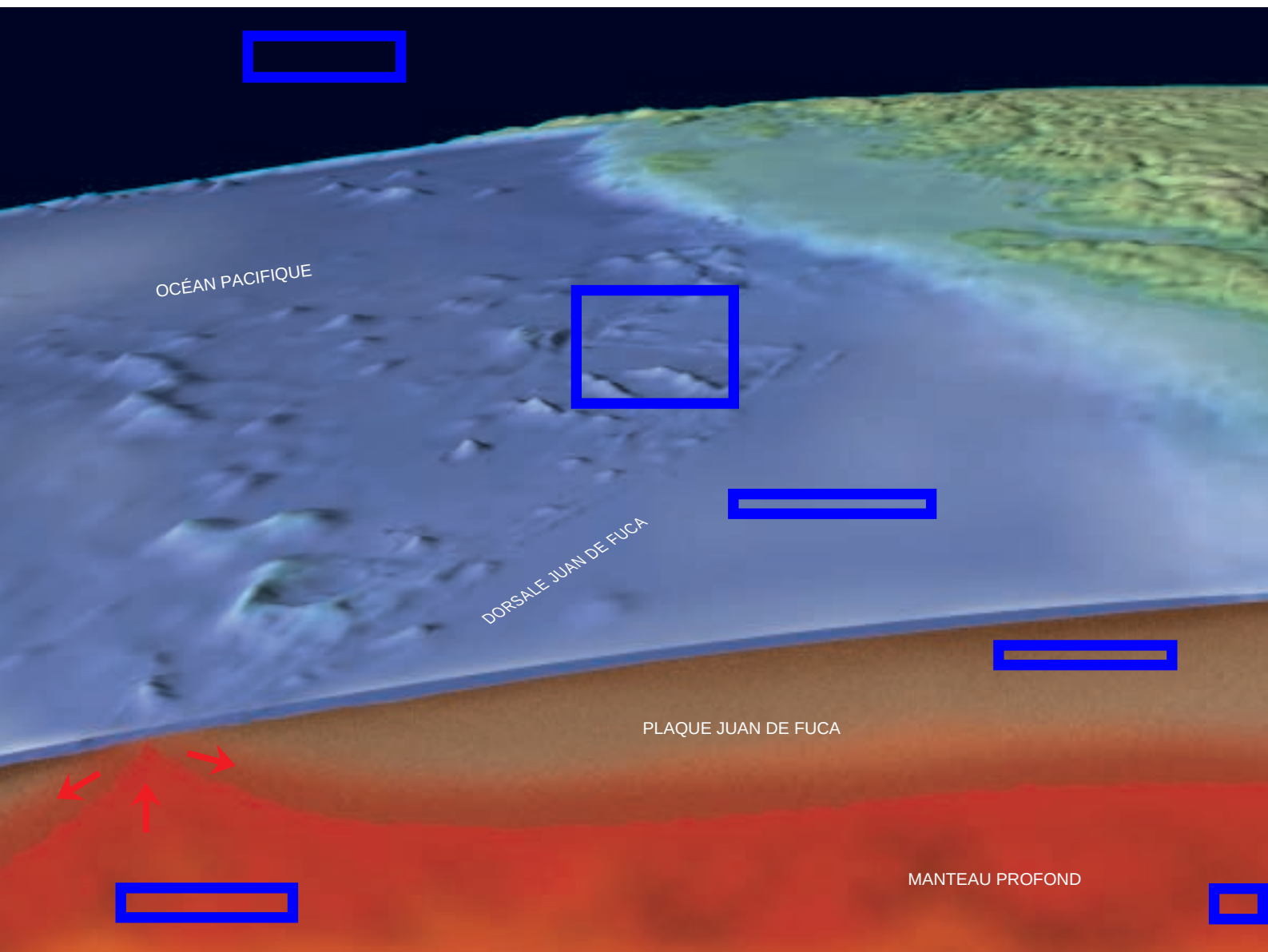
ROY HINDMAN

La côte Ouest des États-Unis, entre la Californie et la Colombie britannique, risque d'être frappée par un séisme violent.

Chacun sait que les villes de Los Angeles et de San Francisco risquent d'être de nouveau frappées par un séisme dévastateur, et l'on se souvient qu'en 1964 l'Alaska a éprouvé l'un des plus forts séismes

jamais enregistrés sur Terre. Pourquoi la région comprise entre la Californie septentrionale et le Sud de la Colombie britannique serait-elle épargnée? Là, dans ce que l'on nomme la région des Cascades, les habitants pensaient vivre

dans une région sûre, parce qu'ils n'avaient pas souvenir d'avoir subi les fureurs du Globe: Vancouver et Seattle avaient tremblé en 1946, en 1949 et en 1965, mais les dégâts n'avaient pas été considérables.



Progressivement les idées changent. Il y a dix ans, Thomas Heaton et Garry Rogers, géophysiciens américains et canadiens, prévenaient que des séismes catastrophiques pourraient frapper cette bande côtière, en apparence tranquille. On doutait naguère de leurs avertissements, mais la plupart des sceptiques ont dû admettre que de tels séismes s'étaient produits par le passé et se reproduiraient.

Dans les années 1980, Bruce Heaton et Charles Richter ont montré que, dans les zones actives, la fréquence des tremblements de terre diminue lorsque leur taille augmente. Cette tendance s'applique même aux séismes les plus importants, qui correspondent à la rupture de la totalité du plan de faille. À l'aide de cette loi, les sismologues déterminent la fréquence des séismes dévas-

tateurs pour une région donnée, même en l'absence de tels événements connus. Les ingénieurs conçoivent ensuite les constructions et les ouvrages d'art en connaissance de cause.

Cette stratégie échoue dans quelques zones, où de grands séismes peuvent survenir sans avoir été annoncés par l'existence de petits ; comment y définir alors le risque d'occurrence des grands tremblements de terre ? C'est le cas pour la région des Cascades, où l'océan Pacifique s'enfonce par subduction sous la côte Ouest de l'Amérique du Nord. Alors que l'activité sismique est intense à l'intérieur des terres, aucun tremblement de terre, aussi faible soit-il, n'a été détecté le long de la faille qui sépare la plaque Juan de Fuca et le continent Nord-américain.

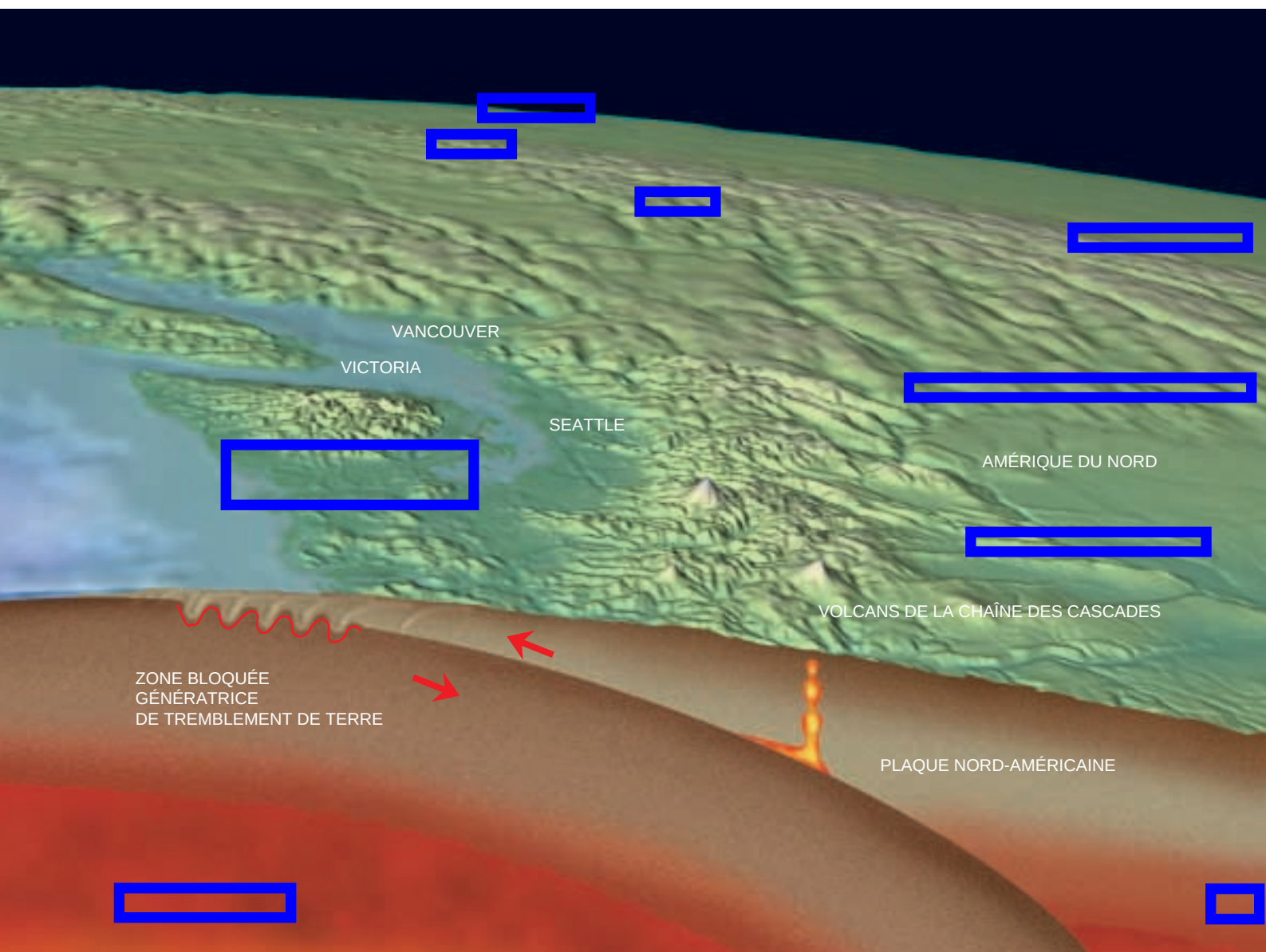
Cette absence de tremblement de terre est surprenante. Au cours de leur histoire, la plupart des zones de subduction ont été le théâtre de séismes géants, c'est-à-dire dont la magnitude est supérieure à huit sur l'échelle de Richter. Les séismes les plus importants de terre sont principalement rassemblés dans la « ceinture de feu », sur le pourtour de l'océan Pacifique, où l'on trouve de nombreux volcans en activité dans les régions de subduction.

Une catastrophe oubliée

Les géophysiciens ont proposé plusieurs explications à l'absence de grands séismes dans cette zone de subduction. Tout d'abord, bien que la région des Cascades présente la plupart des caractéristiques d'une zone

1. LA PLAQUE TECTONIQUE qui se crée à l'Est de la dorsale Juan de Fuca se déplace vers l'Amérique (les flèches indiquent le mouvement) avant de plonger sous la côte Ouest du continent. Une partie de la

faille qui sépare les deux plaques est bloquée, ce qui provoque le bombement élastique du continent. La brusque libération de cette énergie accumulée se traduirait par un gigantesque séisme.



de subduction, certains ont supposé que le mouvement vers le Nord de la plaque Juan de Fuca s'était arrêté récemment (à l'échelle des temps géologiques). Il y a 20 ans, quand cette hypothèse est apparue, j'ai soutenu, avec Robin Riddihough, que la convergence de ces plaques et l'augmentation des contraintes sous-jacentes se poursuivaient. Depuis, de nombreux géophysiciens ont confirmé que la plaque Juan de Fuca ne s'était pas arrêtée brusquement. Des traces d'un mouvement continu existent dans les sédiments marins de la base du talus continental : alors que ces sables et ces boues se déposent

au fond de la mer, les couches les plus récentes sont très déformées. Le continent Nord-américain, comme une gigantesque lame de rabot, a décollé ces couches du plancher océanique, les a froissées, puis a rejeté en surface ces preuves d'une subduction continue.

L'éruption du volcan du mont Saint Helens, en 1980, dans le Sud-Ouest de

l'État de Washington, est l'une des manifestations les plus spectaculaires de cette subduction. Certains géophysiciens pensaient que les volcans de la chaîne des Cascades étaient éteints, mais cette éruption est venue leur rappeler que la région appartient toujours à la ceinture de feu du Pacifique.

Comment la plaque Juan de Fuca peut-elle s'enfoncer sans provoquer de séisme ? Certains ont proposé que la subduction soit régulière plutôt qu'une alternance de glissements et de blocages. D'autres ont imaginé un verrouillage des plaques par un frottement important : dans ce cas, il n'y aurait

qu'un seul et unique séisme, le plus important de la région, au moment où la plaque se libérerait. Si la faille coulisse librement, la probabilité d'un séisme majeur est faible ; en revanche, si elle est bloquée les déformations résultant de la convergence des plaques provoquent une accumulation de contraintes sur les roches qui entourent la faille. Les conditions d'un tremblement de terre géant sont alors réunies.

L'absence de grands séismes au cours de l'histoire plaiderait en faveur d'un glissement régulier.

Malheureusement, cette histoire est courte : nous possédons des données sur la tectonique de cette région depuis moins de 100 ans. En Europe, au Japon, les archives qui remontent au VII^e siècle de notre ère décrivent de nombreux séismes de zone de subduction, ainsi que les raz de marée associés, ou tsunamis.

Le dernier tremblement de terre

Après l'arrivée en Amérique de Juan Perez et de James Cook, les géophysiciens ont essayé de retrouver les traces géologiques des tremblements de terre. Des indices existent dans des baies abritées où des marais salants se forment entre la marée haute et la marée basse. Brian Atwater, du Service géologique américain, a d'abord décou-

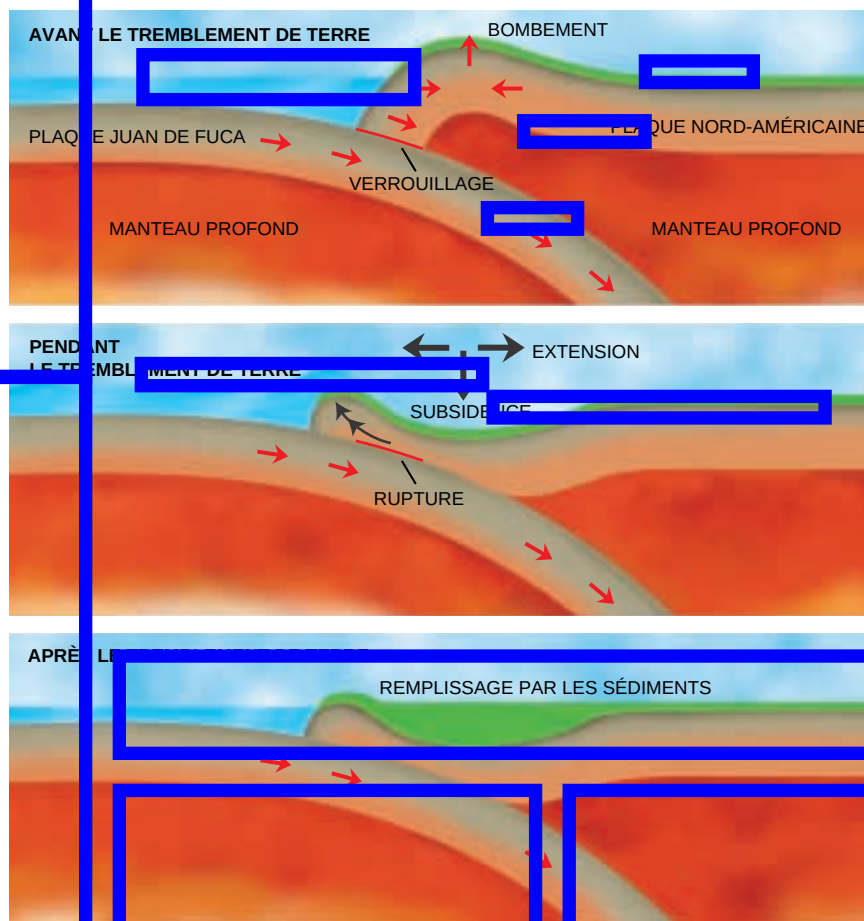


2. L'ALASKA est complètement dévasté par un tremblement de terre géant en 1964. La plus grande partie d'Anchorage (en haut à droite) ainsi que la côte de la péninsule de Seward (ci-dessus) ont été ravagées par le mouvement du sol. Sur la côte Sud de l'Alaska, de nombreux arbres morts (en bas à droite) sont des séquelles encore visibles de la catastrophe. Lorsque le sol s'est enfoncé l'eau salée a noyé leur racines.

vert que plusieurs couches espacées de un mètre environ contiennent des tourbes constituées des restes d'une végétation identique à celle qui vit aujourd'hui dans la zone intertidale. Il en est déduit que chaque couche de tourbe était un ancien marais, enfoui lors de l'affaissement du sol après la brusque relaxation des contraintes, lors d'un séisme important. Cette déduction est corroborée par la présence de sable au-dessus de la plupart des couches de tourbe. Le sable a sans doute été apporté par les gigantesques raz de marée qui ont balayé la côte affaissée. Les modèles théoriques de tsunamis, ainsi que les observations géologiques des modifications du littoral, indiquent que ces vagues atteignaient dix mètres de hauteur, voire plus dans certaines baies abritées.

Après le passage du raz de marée, la boue a progressivement envahi la zone affaissée, et la végétation est réapparue. Ainsi, l'alternance des couches de tourbe, de sable et de boues indique que la terre a violemment tremblé dans cette région par le passé. Quand ces séismes ont-ils eu lieu? L'âge des couches de tourbe aurait été difficile à déterminer si des sapins, noyés par la mer après la subsidence brutale de la côte, n'avaient été trouvés. La dendrochronologie (l'examen des anneaux de croissance) et les datations au carbone 14 de ces arbres ont montré qu'ils avaient péri lors du dernier grand tremblement de terre qui a frappé la région, il y a 300 ans. Auparavant, des catastrophes similaires se sont produites à des intervalles irréguliers d'environ 500 ans.

L'étude de sédiments déposés loin de la côte, sur le fond des océans, confirme ces résultats. Des océanographes de l'Université de l'Oregon, qui ont prélevé des carottes de sédiments au large de l'Oregon, ont observé des alternances de boues fines et de couches sablonneuses. Les couches de boues sont caractéristiques de la sédimentation au fond de la mer : elles résultent du dépôt continu d'une fine couche de sédiments qui proviennent de l'océan. En revanche, les sédiments sablonneux sont maintenus loin des côtes. Ils s'expliquent par de gigantesques glissements de terrain sous-marins provoqués par les grands séismes : les sédiments côtiers auraient glissé le long du talus continental jusqu'aux fonds océaniques.



3. LA PLAQUE OCÉANIQUE pousse le bord de la plaque Nord-américaine vers le bas en la bombant (en haut). Après un tremblement de terre, le bouassement de la faille relâche les tensions et le continent s'aplanit (au milieu). Les sédiments remplissent alors la subsidence créée.

Ces événements sont difficiles à dater à partir des sédiments, mais un dépôt trouvé à la base de certaines carottes donne de précieuses indications. Cette couche contient des cendres volcaniques émises lors d'une éruption du mont Mazama (le «Crater Lake» actuel). Cette éruption, similaire à la récente explosion du mont Saint Helens, s'est produite voici 7 700 ans. En supposant constante la vitesse de sédimentation de la boue sur les fonds océaniques, on retrouve la chronologie révélée par la tourbe : le séisme le plus récent date de 300 ans, et les 12 glissements de terrain sous-marins précédents ont été séparés de 300 à 900 ans.

La date du dernier séisme a été déterminée avec précision. Bien qu'il s'atténue en se propageant, les raz de marée résultant des principaux séismes des Cascades devaient être assez puissants pour être ressentis jusqu'au Japon, après avoir traversé l'océan Pacifique. Kenji Satake et ses collègues du Service géologique japonais ont trouvé, dans les archives de

leur pays, des mentions d'une vague de deux mètres de hauteur qui déferla sur la côte de Honshu voici 300 ans. Après avoir déterminé le temps de propagation de la vague vers le Japon, ils ont conclu que le tremblement de terre s'était produit, le long de la côte Nord-américaine, le 26 janvier 1700 vers 21 heures.

Ces résultats recourent les témoignages oraux d'une catastrophe rapportés par les premiers habitants de Colombie britannique. Les archives provinciales, à Victoria, mentionnent que les indiens faisaient état d'un tremblement de terre qui frappa la baie Pacheena, sur la côte Ouest de l'île de Vancouver, en 1782. À Nanaimo, le village situé sur le promontoire de la baie avait disparu. Une histoire semblable se racontait dans la partie la plus septentrionale de la Californie. Ainsi, la tradition orale indienne, les écrits japonais et les dépôts sédimentaires attestent tous qu'un séisme catastrophique a frappé la côte de la région des Cascades.

Le cycle des catastrophes

Les séismes des zones de subduction obéissent à la théorie du rebond élastique, mise au point après l'étude de la célèbre faille de San Andreas, en Californie. Le mouvement relatif de deux plaques comprime et déforme progressivement la croûte. C'est une

erreur de croire que la Terre est indéformable : la croûte se déforme de manière presque élastique et quand la déformation n'est pas excessive, elle se comporte comme une gigantesque balle de caoutchouc. Cependant, lorsque les contraintes tectoniques deviennent supérieures aux forces de frottement le long de la faille, cette

dernière coulisse brusquement, libérant l'énergie élastique accumulée pendant des années, sous la forme d'ondes qui secouent le sol. La faille se bloque alors de nouveau, et le cycle d'accumulation des contraintes et de relaxation recommence.

Le long de la zone de subduction des Cascades, la plaque Juan de Fuca

Les antécédents historiques

Pour les Indiens Yurok, qui occupaient la côte des Cascades, les tremblements de terre étaient des dieux. Le texte, enregistré par l'ethnologue A. Froeber, décrit ce que furent peut-être les tremblements de terre les plus récents.

Et de là [le Tremblement de terre et l'Orage] allèrent vers le Sud [...]. Ils vinrent d'abord du Sud et noyèrent le sol [...]. De temps en temps, n'y avait un tremblement de terre, puis un autre et un autre [...] et puis l'eau envahit ces lieux [affaissés] [...]. «C'est ce dont profiteront les êtres humains», disait le Tremblement de terre. «Il n'y aurait pas de nourriture pour eux s'il n'y avait pas de place pour que les créatures [de la mer] puissent vivre. C'est ici qu'ils obtiendront leur subsistance lorsque cette prairie sera devenue une mer, cela prolonge la prairie : il y aura un océan.»[...] «Oui, cela est la vérité. C'est la vérité. C'est ainsi qu'ils vivront», dit l'Orage. «Maintenant en route vers le Nord.» Alors ils allèrent vers le Nord ensemble et firent de même : le sol s'enfonça. La terre trembla, trembla et trembla encore. Et l'eau recouvrit tout.



LES NOOTKA de l'île de Vancouver et les autres tribus amérindiennes de la région subissaient des raz de marée.



LES RAZ DE MARÉE provoqués par les grands tremblements de terre dans l'Ouest de l'Amérique du Nord sont assez puissants pour traverser l'océan Pacifique et frapper les côtes du Japon. Le vague qui déferla sur l'île de Honshu en janvier 1700 provenait probablement de cette région.



LES COUCHES DE TOURBE (en brun sur la photographie de droite) qui reposent sous les dépôts côtiers attestent d'un tremblement de terre. De tels dépôts se forment quand la surface s'enfonse brusquement et qu'un ras de marée déferle dans la région affaissée, enfouissant la végétation dans le sable. De la boue comble ensuite le reste de la dépression avant que la végétation ne réapparaisse sur la nouvelle surface. Une série de couches de tourbe est empilée dessous.

se déplace vers l'Amérique du Nord à raison de quatre centimètres par an. Ce mouvement semble faible, mais, cumulé sur les 500 années qui séparent, en moyenne, les grands séismes, il représente un raccourcissement de 20 mètres environ. Ce déplacement est absorbé par la compression élastique d'une zone de plusieurs centaines de kilomètres de large. En outre, les contraintes déforment verticalement le sol. Lors de la plongée de la plaque de subduction sous la côte, l'enfouissement de la pointe extrême du continent repousse vers le haut une partie de la plaque Nord-américaine. Ces déformations ressemblent à celles d'une longue planche qui dépasse du bord d'une table : lorsque l'on appuie sur l'extrémité libre de la planche, elle se soulève vers l'arrière. Lors des grands séismes, la plaque continentale glisse brusquement vers l'océan, et la bosse disparaît. La montée rapide du plateau continental provoque un raz de marée, alors que la relaxation du continent derrière son bord océanique, provoque l'enfouissement des marais côtiers.

La détermination de la zone bloquée est importante, car elle indiquera le type de dégâts qui seraient engendrés lors du prochain séisme : cette zone est celle qui libère l'énergie sismique. Côté continent, on estimera les éventuels effets destructeurs sur les grandes concentrations de population ; connaissant la limite océanique de cette zone, on déterminera les zones de formation des raz de marée ; enfin, la largeur totale de la source caractérisera la taille maximale des séismes possibles.

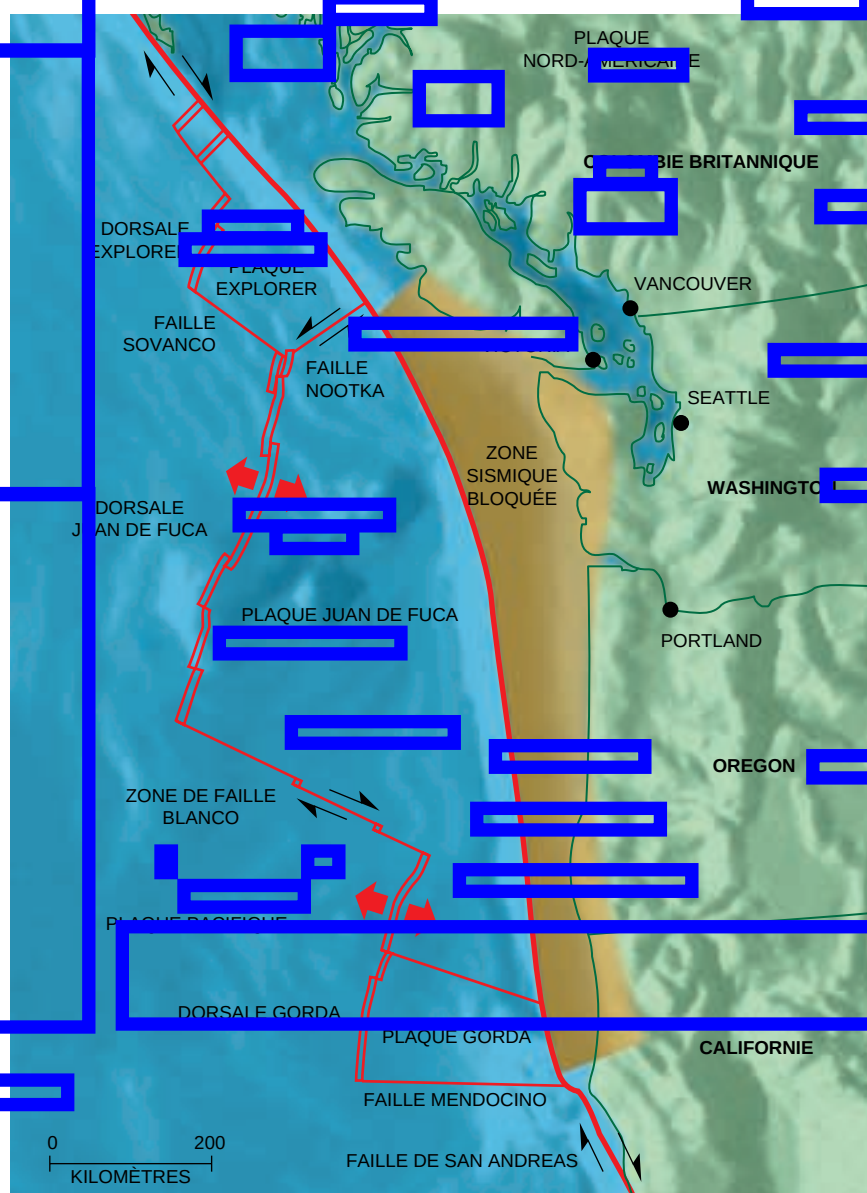
Les géophysiciens savent déterminer l'extension de la zone bloquée à partir des déformations de la croûte : si la zone bloquée est étroite, s'étendant à faible distance sous la plaque continentale, la zone de déformation élastique sera limitée, ainsi que l'énergie qui y sera stockée ; en revanche, si la zone bloquée s'étend loin en profondeur, la déformation élastique couvrira une grande étendue de terre continentale. Les études de terrain permettent donc de mieux cartographier le risque sismique. Les taux de déformation sont faibles (quelques millimètres par an), mais accessibles aux moyens de mesure modernes.

La surveillance des déformations

La répétition de différentes observations mesure les déformations actuelles de la zone de subduction. Les géophysiciens estiment le raccourcissement horizontal de la région côtière en mesurant la distance entre des témoins fixés sur les sommets des montagnes. Avec cette technique, James Savage et ses collègues du Service géologique américain montrèrent, en 1981, que la croûte rétrécissait près de Seattle, perpendiculairement à la côte. Ils conclurent à une accumulation de contraintes qui devrait aboutir à un grand séisme.

Plusieurs techniques de mesures sont suffisamment sensibles pour détecter les infimes mouvements verticaux de cette région. Le nivellement est classiquement utilisé par les géomètres : pour mesurer la différence d'altitude entre deux points, on repère les marques sur deux niveaux cibles, en visant sui-

résultats de plusieurs mesures, on détermine les altitudes des points d'un maillage étendu. Des relevés successifs séparés par plusieurs années montrent le soulèvement ou la subsidence relative des points de ce maillage. Le Service géodésique du Canada a effectué plusieurs relevés topographiques de très grande précision pour étudier l'élé-



4. LES PLAQUES CONVERGENTES sont bloquées sous la côte, sur une certaine partie de la faille. La zone bloquée est limitée, à l'Ouest, par les sédiments océaniques argileux qui lubrifient la faille ; à l'Est, elle s'évanouit progressivement, parce que les roches s'échauffent en s'enfonçant, permettant à la faille de glisser librement.

vation du sol résultant des séismes : ils ont notamment étudié l'île de Vancouver qui mesure environ 100 kilomètres de côté, à raison d'un point tous les 100 mètres ; l'erreur verticale sur l'ensemble du réseau ne dépasse pas le centimètre.

Une autre méthode utilise les marégraphes qui donnent la hauteur des marées par rapport à la côte. Initialement, ces instruments étaient utilisés pour étudier l'océan, mais, grâce à des enregistrements continus depuis plus de 20 ans, il est possible d'utiliser le niveau moyen de la mer comme niveau de référence pour suivre les minuscules déplacements verticaux des terres. Les mesures ne donnent pas directement ces déplacements : on doit les traiter afin d'éliminer les effets des marées et d'autres phénomènes océaniques, tels les courants d'El Niño, qui peuvent durer des années.

La mesure du champ de gravité, qui varie comme le carré de la distance au centre de la Terre, est une troisième

manière de mesurer les déplacements verticaux de la croûte. Bien que nous ne ressentions pas les faibles variations de notre propre poids quand nous changeons d'altitude, des appareils sensibles détectent les variations de l'intensité de la pesanteur. En mesurant la gravité au même point, à quelques années d'intervalle, on parvient à estimer la variation d'altitude du lieu.

Enfin, depuis quelques années, le système de positionnement par satellite (*Global Positioning System*, GPS) permet la mesure des distances et des variations d'altitude de points espacés de plusieurs centaines de kilomètres. Des chercheurs canadiens ont utilisé le GPS pour montrer que la côte de Victoria se rapproche de près de un centimètre par an d'un point situé à 300 kilomètres à l'intérieur des terres. Dans le futur, le système GPS, qui est précis et peu coûteux, pourrait être le moyen

le plus efficace pour mesurer les déplacements et les écrasements de la croûte qui annoncent les tremblements de terre.

Toutes ces méthodes donnent des résultats similaires : la marge continentale de la région des Cascades se soulève de un à quatre millimètres et se contracte horizontalement de plusieurs centimètres par an. Ces déformations sont les preuves que la croûte

converge vers elle-même. Elles enregistrent la lente, mais inévitable accumulation des contraintes et annoncent une libération catastrophique de l'énergie de déformation de la croûte.

Un facteur de troubles coïncide

Afin de préciser les risques sismiques, nous avons étudié l'extension de la zone bloquée en confrontant les observations de terrain avec des simulations mathématiques de la déformation. Ces comparaisons nous ont révélé l'état de la zone bloquée à grande profondeur. À l'endroit le plus profond de cette zone, du côté du continent, il existe une transition progressive entre des segments complètement bloqués et d'autres qui glissent librement. Sur la plus grande partie de la côte, la zone bloquée pénètre sous le plateau continental (elle s'élargit beaucoup près de la côte septentrionale de l'État de Washington). Cette surface de faille considérable peut engendrer des séismes catastrophiques. Elle est toutefois beaucoup plus étroite que les autres zones de subduction connues. Pourquoi cette particularité ? Principalement en raison des variations de la



5. LES DÉFORMATIONS DE LA CROÛTE sont extrêmement lentes, mais des mesures soigneuses montrent les infimes mouvements du sol. La télémétrie par laser, entre les sommets des montagnes, détecte la contraction horizontale de la région depuis plus de dix ans. Les instruments modernes de positionnement par satellite (GPS) ont facilité la réalisation de relevés géodésiques précis.

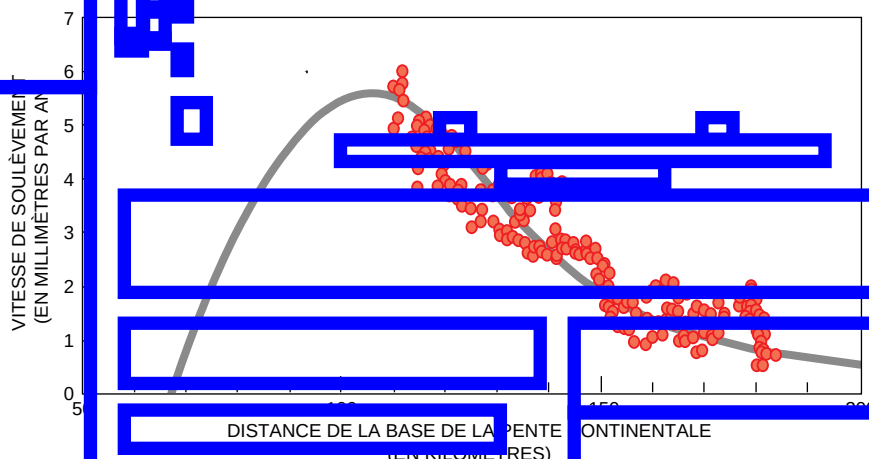
température en fonction de la profondeur. Près de la surface, les sédiments argileux qui lubrifient la partie de la faille proche de l'océan. Cependant, plus profondément, les argiles se transforment en des minéraux plus durs, qui empêchent la faille de glisser. Ces changements minéralogiques se produisent à une profondeur de dix kilomètres environ, c'est-à-dire lorsque la température atteint 150 degrés.

L'augmentation de température détermine également la position de la partie profonde de la zone bloquée vers le continent. Aux températures modérées, les roches ont des comportements de frottement normaux : la très forte résistance au mouvement chute lorsque la faille commence à bouger. Ainsi, une fois le glissement commencé, le mécanisme s'emballé, libérant l'énergie élastique et causant un séisme. En revanche, lorsque la faille est bloquée, la croûte, lorsque la température est supérieure à 350 degrés, les roches en contact sur les bords de la faille se comportent comme des fluides visqueux : plus les mouvements sont rapides, plus la résistance est forte. Les parties les plus profondes et les plus chaudes de la faille peuvent alors se déformer par fluage sans engendrer d'ondes élastiques.

Ces températures correspondent-elles aux conditions de la zone bloquée? Nous avons étudié cette question en modélisant numériquement les températures sur la faille de la zone de subduction. Les résultats ont confirmé que la profondeur à laquelle la roche atteint une température de 350 degrés correspond bien à la limite profonde de la zone bloquée déterminée par les mesures de déformation.

Une question demeure néanmoins : la zone que nous avons modélisée correspond-elle réellement à la région source des grands tremblements de terre? Nous le pensons, car le déplacement vertical que notre modèle prédit pour une rupture de la zone bloquée rend bien compte des observations des dépôts côtiers enfouis. Des indications supplémentaires nous permettent d'appliquer notre méthode à d'autres zones de subduction. Avec mes collègues

Kelin Wang et Makoto Yamano, de l'Université de Tokyo, j'ai montré que la largeur de la zone bloquée de la marge Nankai, au Sud-Ouest du Japon, correspond à la surface de rupture du séisme de magnitude huit qui a frappé cette région en 1940. Par analogie, nous



6. LES SOULEVEMENTS successifs de la côte de la région des Cascades montrent son soulèvement (les points rouges). Les calculs (la courbe grise) tiennent bien compte des observations pour la déformation de la plaque Nord-américaine. Ils servent à localiser la partie bloquée de la faille de subduction.

pouvons prévoir le séisme qui frappera la côte Nord-américaine.

Le jour de la catastrophe

Quelle pourrait être l'intensité du mouvement du sol pour les villes de la côte Ouest pendant un grand séisme? Tout dépend de la magnitude du séisme et de la position de son foyer. La magnitude maximale, tout d'abord, dépend de la distance de la côte au lieu de libération de l'énergie sismique. Si l'on se fonde sur les études de séismes déjà connus, une rupture de toute la faille, de la Colombie britannique jusqu'à la Californie, serait surprenante. Toutefois, si la totalité de la zone bloquée (une surface d'environ 100 000 km²) lâchait d'un coup, le séisme pourrait avoir une magnitude égale à neuf, et les dégâts seraient bien pires que ceux du séisme de San Francisco en 1906. Seulement deux événements de cette taille ont été enregistrés à ce jour : un tremblement de terre le long des côtes du Chili, en 1960, et un autre en Alaska, en 1964.

Il existe deux manières d'estimer le mouvement du sol qui résulterait d'un tel séisme. La première consiste à comparer les situations le long de la côte Ouest de l'Amérique du Nord avec

ce qui s'est passé lors de séismes antérieurs. Cela revient à utiliser des modèles de rupture élastique et de déplacements de failles. La conclusion des deux approches est semblable : le prochain grand séisme dans la région des Cascades engendrera des ondes sismiques destructrices qui dureront plusieurs minutes ; puis, lorsque les secousses cesseront, la plupart des régions

côtières s'enfonceront de un à deux mètres et auront été déplacées de près de dix mètres vers la mer.

Heureusement, la partie bloquée de la faille qui engendrerait un tel tremblement de terre est située principalement sous le plateau continental et ne s'étend qu'un peu sous la côte. Ainsi, Vancouver, Seattle et Portland (qui sont entre 100 et 200 kilomètres à l'intérieur des terres) s'en tireront mieux.

Les secousses que les sites proches de la côte Ouest ressentiront seront fortes, car l'énergie sismique se propage à des distances considérables. Plus généralement, les Américains et les Canadiens de la côte Pacifique qui pensaient vivre sur un sol tranquille doivent accepter la menace permanente d'un tremblement de terre destructeur.

Roy B. HYNDMAN est chercheur au Centre de géosciences du Pacifique du Service géologique canadien.

A. NEUBERG et al., *Radiocarbon Evidence for Extensive Plate-Boundary Rupture about 100 Years ago at the Cascadia Subduction Zone*, in *Nature*, vol. 378, pp. 371-374, 2 novembre 1995.

Garry C. FODGERS, *Seismic Potential of the Cascadia Subduction Zone*, in *Nature*, vol. 332, p. 17, 3 mars 1988.

Thomas H. HEATON, *Cascadia Subduction Zone : The Calm before the Quake?*, in *Nature*, vol. 343, pp. 511-512, 8 février 1990.

R.B. HYNDMAN et K. WANG, *Thermal Constraints on the Zone of Major Thrust Earthquake Failure : The Cascadia Subduction Zone*, in *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, vol. 98, n° 2, pp. 2039-2060, 10 février 1993.

Fermat enfin démontré

YVES DELLEGOUARCH

La démonstration du théorème de Fermat par Andrew Wiles s'appuie sur un faisceau de méthodes mathématiques qui bouleverse le paysage de la théorie des nombres.

Vers la fin de sa vie, Pierre de Fermat (1601-1665), écrivait, dans ses *Lettres aux mathématiciens* : « On sait que les anciens ont travaillé sur des propositions de Conon qui étaient vraies, mais non prouvées et qu'il a su les munir de démonstrations d'une haute subtilité. Pourquoi n'espérerais-je pas un semblable secours de vos éminents correspondants, pourquoi, Conon français, ne trouvais-je pas des Archimède anglais? »

Le 23 juin 1993, plus de 300 ans après la note marginale de Fermat, Andrew Wiles, professeur à Princeton (États-Unis), mais fils d'un professeur de théologie anglais, pensait pouvoir annoncer à l'Institut Newton, à Cambridge (Grande-Bretagne) qu'une des propositions que Fermat nous avait léguées était vraie. C'était loin d'être évident, car on peut se demander si la remarque qu'il avait faite en marge d'un exemplaire des *Arithmétiques* de Diophante était destinée à être publiée — était-elle même munie d'une démonstration d'une haute subtilité et d'une éblouissante beauté. Il semblait que Fermat avait trouvé son Archimède anglais.

Pourtant, un des artifices d'Andrew Wiles était encore en porte-à-faux, et ce n'est que le 19 septembre 1994, à l'issue d'un labeur intense et grâce au renfort de son collègue Richard Taylor de l'Université de Cambridge, que la magnifique démonstration d'Andrew Wiles était enfin libérée de tout échafaudage et se levait triomphante dans le ciel mathématique, symbole d'un labeur de trois siècles (ce qui n'est pas exceptionnellement long pour une cathédrale). Cette dernière hésitation du destin illustre bien les mystères et les surprises recelées par le « dernier théorème de Fermat ».

Position du problème

L'article de Christian Houzel du mois de mai nous a rappelé l'Histoire de la recherche des triplets pythagoriciens, les entiers x, y et z , solutions en nombres entiers de l'équation $x^2 + y^2 = z^2$. Ces triplets pythagoriciens sont en correspondance avec les points du cercle centré sur l'origine, de rayon unité et d'équation $u^2 + v^2 = 1$, points dont les deux coordonnées sont rationnelles, c'est-à-dire de la forme a/b où a et b sont entiers. Il suffit, pour s'en convaincre, de diviser les deux membres de l'équation (1) par z^2 .

La résolution de cette équation (1), dite diophantienne, est connue depuis fort longtemps. Pour les exposants supérieurs à 2, l'équation $x^n + y^n = z^n$ la solution est radicalement différente. L'assertion de Fermat est que, pour les valeurs de l'exposant n supérieures à 2, les seules solutions entières sont « triviales » : l'un des trois nombres entiers est nul (par exemple, $x = 0$ et $y = z$), ce que l'on exprime en notant que le produit xyz est alors égal à zéro.

Revenons à l'interprétation géométrique : les courbes représentant l'équation $u^n + v^n = 1$ appartiennent à deux familles : la première, où l'exposant est pair (n est égal à $2p$), et la seconde où l'exposant est impair (n est égal à $2p + 1$). Le cas n égal à 4 a été résolu par Fermat lui-même. Le cas n égal à 3 a été résolu par Sophie Germain.

du cas où n est impair. En effet, en posant $u' = u^2$ et $v' = v^2$ et en remplaçant dans l'équation, on voit qu'il ne reste plus qu'à traiter le cas impair.

On peut même se limiter au cas où n est premier (et évidemment différent de 2), bien que la spécification que le nombre p doit être premier semble très restrictive. En fait cette limi-

tation de la portée du théorème est trompeuse : si l'équation de Fermat pour le nombre p premier n'a pas de solution, alors comme $(x)^{kp}$ est égal à $(x^k)^p$ la solution n'existe pour aucun multiple de p .

Dans le cas où p est premier impair, la courbe $u^p + v^p = 1$ possède trois points rationnels : le point $(0, 1)$, le point $(1, 0)$ et le point $(-1, 0)$. Le point $(0, 1)$ est le point à l'infini de la courbe, lequel correspond à la solution $(x, y, z) = (1, -1, 0)$ de l'équation diophantienne $x^p + y^p = z^p$. La section de Fermat revient à dire que si p est premier et différent de 2, la courbe $u^p + v^p = 1$ n'admet pas d'autre point rationnel. Il faut démontrer qu'il n'y a que trois points rationnels sur la courbe.

Les derniers résultats classiques

Lorsqu'ils sont bloqués dans leurs recherches, les mathématiciens ont une stratégie particulière : ils étudient des variations du problème qu'ils présentent sous des formes différentes. Le grand mathématicien Niels Henrik Abel écrivait : « On a vu que c'est un problème d'impossibilité « une forme telle qu'il soit toujours possible de le résoudre, ce que l'on peut toujours dire... Au lieu de demander une relation dont on ne sait pas si elle existe ou non, il faut (se) demander si une telle relation est en effet possible ». On en déduit alors les limites de possibilité du problème ».

C'est ainsi que les algébristes italiens du XV^e siècle ont introduits les nombres « imaginaires » pour étudier les solutions réelles des équations algébriques. Pragmatique, Newton écrivait : « il faut bien que dans les équations, il y ait des racines impossibles (entendez « imaginaires ») sans quoi, dans les problèmes (physiques), cer-

tains cas impossibles se trouveraient possibles.

En théorie, les mathématiciens varient la structure : au lieu d'examiner les solutions entières des équations, ils examinent les solutions modulo M . Ils regroupent dans une même classe les nombres qui ont le même reste modulo M . La classe des nombres pairs est constituée par les nombres égaux à zéro modulo 2.

Les entiers modulo k ont une structure d'anneau, à-dire qu'il y a un zéro, un 1, munis d'une addition et d'une multiplication, et d'inverse pour la multiplication ordinaires. Lorsque k est égal à 2 les restes sont 0 et 1, et l'on a :

+	0	1
0	0	1
1	1	0

ADDITION

x	0	1
0	0	0
1	0	1

MULTIPLICATION

En utilisant la loi de réciprocité quadratique due à Euler, Legendre et Gauss, le mathématicien Gérard Terjanian a su faire resplendir, en 1977, les méthodes traditionnelles d'un éclat particulier.

Il a démontré que si n est un nombre premier impair, $2p$, où p est un nombre premier impair, alors l'un des trois nombres x, y, z vérifiant l'équation de Fermat pour l'exposant $2p$ est égal à zéro modulo $2p$, c'est-à-dire est divisible par n . C'était la première fois qu'un résultat aussi général était obtenu pour ce qu'il est convenu d'appeler le «premier cas du théorème de Fermat».

Dans les méthodes classiques, mais pas dans la méthode de A. Wiles, la démonstration de Fermat comporte toujours deux étapes. La première, que l'on appelle le «premier cas» est la plus facile ; elle consiste à démontrer que si l'exposant est un nombre premier p , que p divise l'un des trois nombres x, y, z vérifiant l'équation de Fermat.

Donnons un exemple d'une telle démonstration. Par exemple, si p est égal à 3, on examine les solutions modulo 9. On voit alors facilement que 3 divise x, y ou z .

En présentant les choses négativement (raisonnement par l'absurde), on prouverait le premier cas de Fermat en disant que si p ne divise pas xyz , alors l'équation $x^p + y^p = z^p$ est impossible. Comme zéro est divisible par tous les nombres, y compris p , les solutions tri-

viales sont $(0, 0, 0)$ et $(M, M, 0)$. Mais l'avantage se retrouvera dans la méthode de A. Wiles.

Dans le second cas, beaucoup plus difficile, il s'agit de démontrer que, non seulement p divise xyz , mais que toutes les puissances de p divisent xyz , ce qui implique que xyz est égal à 0 (un nombre non nul n'étant pas indéfiniment divisible).

Fermat avait trouvé une «route tout à fait singulière» pour résoudre le second cas et d'autres problèmes de Diophante à Fermat, par Christian Hooley. Pour la Science, janvier 1996).

La descente infinie est un ingrédient essentiel de toutes les preuves classiques du «second cas» du théorème de Fermat, alors qu'elle est inutile pour le «premier cas», comme nous l'avons vu. Cette véritable mutation va se produire : la méthode de A. Wiles traitera d'un seul coup de baguette magique les premier et deuxième cas, et ceci pour tous les exposants à la fois.

Enfin, en 1985, au moment où l'Histoire semblait hésiter entre tradition et dévotion, les mathématiciens, quetaies, Adleman, Fouvry et Heath-Brown essayèrent de régler définitivement le sort du premier cas.

S'ils échouèrent, du moins échouèrent-ils avec panache : ils démontrèrent le premier cas pour une infinité d'exposants premiers. Ce résultat fit beaucoup de bruit, mais les mathématiciens savaient qu'il s'agissait d'un combat

à long terme et que les batailles futures allaient se livrer sur d'autres fronts.

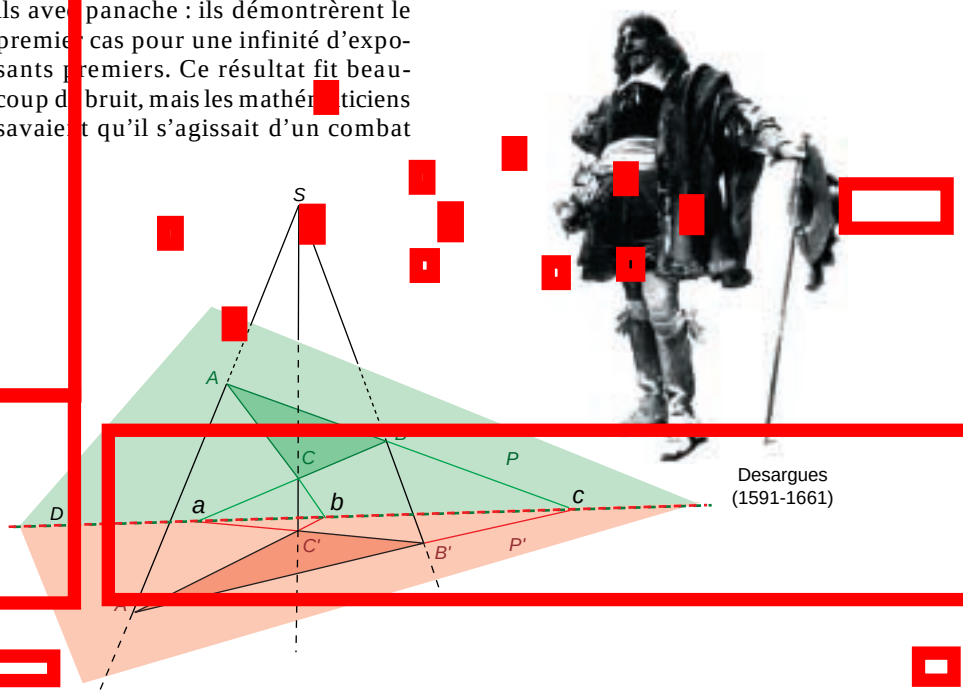
Le groupe de Galois absolu

À l'époque de Kummer déjà, les nombres algébriques avaient fait leur apparition dans l'étude du théorème de Fermat. Nous allons définir ces nombres mystérieux qui vont jouer un rôle essentiel.

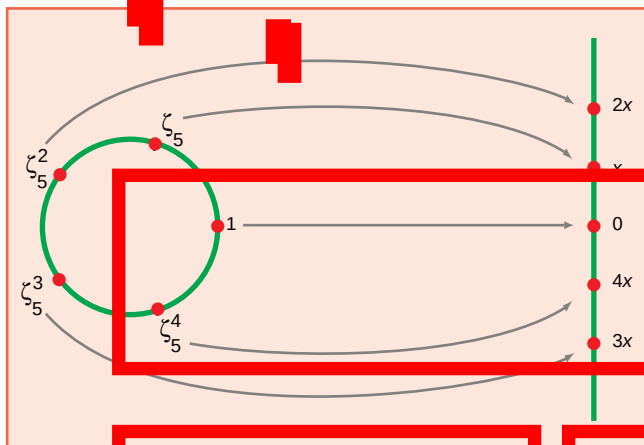
Un titre plus romantique pour ce sujet pourrait être «le corps des nombres algébriques et les représentations de son âme». En effet, la philosophie qui sous-tend ce type de question a d'abord été rêvée par Évariste Galois à la prison de Sainte-Pélagie (en 1831).

La consécration officielle dans le programme d'Erlangen de Félix Klein (en 1872), qui a permis de passer à l'attaque, à tout objet mathématique muni d'une structure, le groupe des transformations de cet objet qui respectent cette structure. On appelle ce groupe le groupe des automorphismes de l'objet.

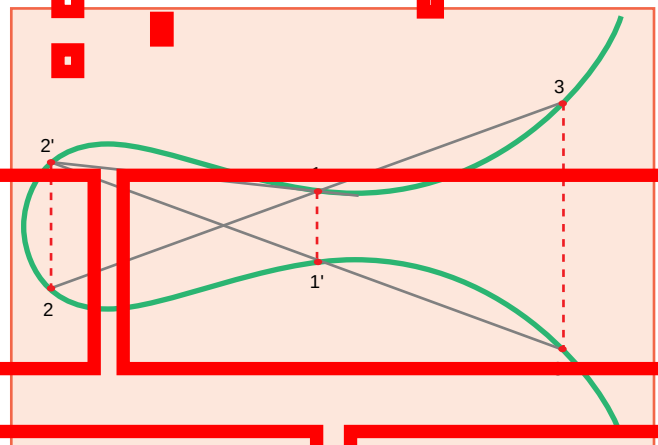
Si l'objet est l'ensemble des trois sommets d'un triangle isocèle (et non équilatéral) et sa structure la distance



1. LES GÉNÉRALISATIONS à des dimensions supérieures sont des moyens puissants de démonstration. Ainsi des propriétés de figures planes ne sont que les ombres de propriétés de figures dans l'espace. Si SAA', SBB', SCC' sont alignés, alors a, b, c le sont aussi. Ce théorème, dû à Desargues, est démontré facilement en donnant du relief à la figure : celle-ci est considérée comme la projection plane de deux triangles en perspective dans l'espace, les triangles ABC et $A'B'C'$, situés dans deux plans distincts, P et P' . Alors les points a, b, c sur la droite d'intersection D des plans P et P' , sont alignés.



2. LES CINQ POINTS SUR LE CERCLE représentent les points de 5-division du groupe T . Les flèches envoient ces cinq points sur une droite dont les points sont repérés par les entiers modulo 5. Au produit de ζ^2 par ζ^4 sur le cercle, donnant le point ζ , correspond l'addition de $2x + 4x$, soit $6x$ modulo 5, ou encore x . Pour démontrer le théorème de Fermat d'exposant p (ici 5), on utilise les points de p -division d'une courbe elliptique liée à une solution hypothétique de l'équation de Fermat.



3. À PARTIR DE DEUX POINTS 1 ET 2 de coordonnées rationnelles sur une courbe elliptique, on détermine un point 3, intersection de la droite passant par 1 et 2 avec la courbe, dont les coordonnées sont également rationnelles. Le point 3, symétrique du point 1, est le composé des points 1 et 2, et cette règle de composition définit une structure de groupe. La composition d'un point 3 par exemple, avec le point à l'infini revient à prendre le point symétrique de 3' par rapport à l'axe de symétrie de la courbe, on retrouve le point 3 lui-même.

entre ses symmets, les transformations qui conservent l'objet et sa structure, les automorphismes, sont l'identité et la symétrie évidente.

Ainsi, lorsque l'objet est un anneau, la structure est formée par l'addition et la multiplication ; les automorphismes de l'anneau sont les transformations qui font correspondre à un élément de l'anneau un autre élément de l'anneau, en respectant ces deux lois.

Les nombres algébriques sont les nombres complexes qui sont solutions d'une équation polynomiale à coefficients fractionnaires : l'équation $3x^2 - 4$ a pour solutions $2\sqrt{3}/3$ et $-2\sqrt{3}/3$; ces nombres sont algébriques. Il est patent que les nombres algébriques sont des nombres complexes. Le nombre π n'est solution d'aucune équation polynomiale à coefficients fractionnaires non nuls, il n'est donc pas algébrique, on dit qu'il est transcendant.

Les mathématiciens ont démontré que les nombres algébriques constituent un corps (la somme et le produit de deux nombres algébriques sont des nombres algébriques).

Prenons par exemple un nombre complexe z que l'on obtient par des additions et des divisions de nombres rationnels et du nombre complexe $\zeta_5 = e^{2\pi i/5}$.

Le nombre z est algébrique parce que le nombre ζ_5 lui-même est algébrique. En effet, ζ_5 vérifie l'équation polynomiale à coefficients rationnels : $x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 = 0$. Cette équation ne peut être décomposée en produits de polynômes à coefficients rationnels.

L'ensemble des nombres obtenus de la même manière que z forme le corps cyclotomique d'ordre 5 (ou corps de la division cyclotomique d'ordre 5). C'est un sous-corps du corps de tous les nombres algébriques.

Dans notre théorie, ce corps possède un groupe d'automorphismes, le groupe des transformations de ce corps elliptique, qui respectent l'addition et la multiplication. Ce groupe est appelé le groupe de Galois de notre corps cyclotomique.

Les automorphismes du corps des rationnels se réduisent à l'identité : ils ne sont pas très intéressants. Par chance, ζ_5 appartient à un corps plus riche.

Les automorphismes du corps des rationnels se réduisent à l'identité : ils ne sont pas très intéressants. Par chance, ζ_5 appartient à un corps plus riche.

La méthode utilisée par Kummer pour résoudre l'équation de Fermat de degré 5 est déjà un magnifique exemple de l'utilisation de certains nombres cyclotomiques.

Le groupe des automorphismes de l'énorme corps de tous les nombres algébriques est appelé le groupe de Galois absolu. Mais ce groupe est très complexe.

guère de caractéristiques de ce groupe de Galois absolu. C'est un objet aussi fondamental que mystérieux, mais il n'en sert pas moins de leitmotiv à la grande symphonie orchestrée par A. Wiles. Je vous entends vous exclamer : si le groupe de Galois absolu reste une notion métaphysique, comment en dire des choses positives, falsifiables ? En

représentant l'exemple ci-dessus, on voit que tout automorphisme appartenant au groupe de Galois absolu se reflète dans le groupe de Galois du corps cyclotomique bâti à partir du nombre ζ_5 .

En réalité, on fait avec le nombre 5, tout entier positif. Les points ζ_n ont leur image sur le cercle unité du plan complexe et ce cercle est muni naturellement d'une loi de groupe commutatif par la multiplication d'un nombre complexe. Ce groupe des nombres complexes modulo 1 est désigné par T .

Le point ζ_5 est un élément de T tel que $\zeta_5^5 = 1$; on dit que c'est un point de 5-division de T . L'ensemble des éléments de T qui sont des points de 5-division forme un sous-groupe cyclique d'ordre 5 de T . Ce que l'on a étudié plus haut est l'action du groupe de Galois absolu sur ce sous-groupe. Ce sous-groupe est isomorphe à une droite (voir la figure 2) sur le corps à cinq éléments. On a ainsi effectué une représentation linéaire du groupe de Galois absolu sur une droite.

Les représentations linéaires du groupe de Galois absolu ont toujours fasciné les mathématiciens. En 1870, Hilbert s'intéressait à un type analogue de représentations : les du groupe de Galois absolu agissant sur le groupe des points de p -division d'une courbe elliptique dont les coefficients de l'équation sont rationnels. Nous examinerons plus loin ces courbes elliptiques.

Les points du cercle T sont paramétrés par une variable réelle modulo 1. Les points du cercle T sont paramétrés par une variable réelle modulo 1.

Les points du cercle T sont paramétrés par une variable réelle modulo 1. Les points du cercle T sont paramétrés par une variable réelle modulo 1.

Les points du cercle T sont paramétrés par une variable réelle modulo 1. Les points du cercle T sont paramétrés par une variable réelle modulo 1.

2π (un angle), les points d'une courbe elliptique sont paramétrés par une variable complexe modulo deux périodes. En résulte que les points de p -division ne sont plus sur une droite mais dans un plan. Mais abordons, comme nous l'avions promis, les courbes elliptiques.

L'introduction des courbes elliptiques

Prenons une courbe elliptique représentée par la cubique d'équation : $y^2 = x^3 + a_2x^2 + a_4x + a_6$. La courbe est définie sur les rationnels si a_2, a_4 et a_6 sont rationnels. De plus il ne faut pas que le second membre de l'équation ait une racine double ; dans le cas contraire, la cubique possède un point multiple et n'est pas une courbe elliptique.

Comme les points de la courbe sont paramétrés par une variable complexe modulo deux périodes, ces points forment un groupe commutatif dont l'élément nul est le point de paramètre 0. Habituellement on choisit le paramétrage tel que le point à l'infini de la courbe. Les points rationnels de la courbe elliptique sont ceux dont les coordonnées sont rationnelles. Un théorème d'Hellegouarch explique comment construire le composé de deux points, et les points rationnels forment un groupe pour cette loi de composition (voir la figure 3).

Pour les amateurs de courbes elliptiques, une anecdote : en 1960 était une conjecture de Beppo Levi. Cette conjecture affirme, entre autres, que pour toutes les courbes elliptiques définies sur les rationnels, il existe un majorant de l'ordre des points rationnels. L'ordre d'un point P étant le plus petit entier n non nul tel que P composé avec lui-même n fois donne le point nul.

Les points rationnels d'ordre $2p^2$ doivent être particulièrement fascinants puisque B.A. Demjanenko et moi-même avons étudié ces points entre 1965 et 1970. À notre grand étonnement, nous avons démontré que cela entraînait celle d'une solution non triviale de l'équation de Fermat d'exposant p .

En 1969, j'ai pensé à renverser l'approche : j'ai essayé de démontrer que, si l'équation de Fermat avait un triplet solution a, b, c , tous non nuls, alors la courbe elliptique dont l'équation est $Y^2 = X(X - a^p)(X + b^p)$ aurait des points

d'ordre p intéressants. Si le nombre c n'apparaît pas dans cette équation c'est qu'il a été déduit des deux autres par l'équation de Fermat $a^p + b^p = c^p$. La courbe se définit donc par $E(A, B, C)$, avec $A = a^p, B = b^p$ et $C = -c^p$: certains auteurs la désignent sous le nom de « Courbe de Frey ». Remarquons que l'on peut donner d'exemple de courbe $E(A, B, C)$ correspondant à une solution non triviale de l'équation de Fermat.

Puisqu'il n'en existe pas. On peut toutefois en donner pour des équations voisines comme $x^p + y^p = 2z^p$.

Nous sommes ainsi passés du problème de Fermat de degré p à un problème sur les points d'ordre p de la courbe elliptique $E(A, B, C)$. Là encore, les mathématiciens ont élargi le problème : au point (a, b, c) ils ont fait corres-

pondre une courbe elliptique $E(A, B, C)$, et l'on est passé ainsi d'un objet algébrique, un point $(u, v) = (a/c, b/c)$ de la courbe $u^p + v^p = 1$ à un objet géométrique, la courbe $E(A, B, C)$.

Le passage à une dimension supérieure n'a pas été utilisé avec profit par Desargues (voir la figure 1). Cette démonstration fameuse par sa simplicité illustre l'insuffisance d'une approche purement géométrique.

Cependant, une théorie plus générale que la théorie précédente n'est intéressante que si elle donne des résultats imprévisibles. Dans le cas contraire, elle est stérile et sans portée.

Les courbes elliptiques éliminent la façon particulièrement élégante des solutions triviales de l'équation de Fermat : en effet, la courbe $E(A, B, C)$

LES FORMES MODULAIRES

La fonction thêta définie pour $|q| < 1$ par :

$$\theta(q) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} q^{n^2}$$

a été étudiée par Euler et Jacobi.

Si l'on pose $\theta(z) = e^{\pi i z}$, avec $z = x + iy, y > 0$, on obtient les équations fonctionnelles :

$$(1) \quad \theta\left(\frac{z}{2}\right) = 2\theta(z)$$

$$(2) \quad \theta\left(\frac{1}{z}\right) = (z/i)^{1/2} \theta(z)$$

La série de Dirichlet qui est associée à θ est connue que la célèbre fonction zêta de Riemann :

$$\zeta(s) = \sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^s} = \prod_p (1 - p^{-s})^{-1}$$

Euler a établi que cette fonction possède un "produit eulérien", c'est-à-dire un produit ne portant que sur les nombres premiers.

$$\zeta(s) = \sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^s} = \prod_p (1 - p^{-s})^{-1}$$

L'équation fonctionnelle de la fonction thêta conduit à celle de ζ , et le produit eulérien de ζ conduit à de nouvelles propriétés de θ . Le 24 avril 1828, Jacobi découvrit l'identité :

$$\left(\sum_{n \in \mathbb{Z}} q^{n^2}\right)^4 = 1 + 8 \sum_{m \geq 1} A(m) z^m, \text{ où } A(m) = \sum_{d|m, d \not\equiv 0 \pmod{4}} d$$

qui lui permettait de donner instantanément le nombre de représentations d'un entier positif comme somme de quatre carrés !

L'équation (2) entraîne l'équation fonctionnelle :

$$\frac{\Gamma(s/2)}{\pi^{s/2}} \zeta(s) = \frac{\Gamma((1-s)/2)}{\pi^{(1-s)/2}} \zeta(1-s)$$

publiée par B. Riemann en 1859.

La célèbre "hypothèse de Riemann" affirme que les zéros de $\zeta(s)$, qui ne sont pas $-2, -4, -6, \dots$, se trouvent sur l'axe de symétrie de cette équation (la droite correspondant à la partie réelle de s égale à $1/2$) : c'est une des grandes conjectures que notre époque lègue au prochain siècle.

FORMES MODULAIRES ET COURBES ELLIPTIQUES

La théorie d'Eichler-Shimura associe à la forme modulaire f :

$$f = q \prod_{n=1}^{\infty} (1 - q^n)^{-a_n} (1 - q^{n+1})^{a_{n+1}}$$

la courbe elliptique $y^2 + y = x^3 - x^2$.

Ceci signifie qu'en écrivant :

$$f = q - 2q^2 - q^3 + 2q^4 + q^5 + 2q^6 - 2q^7 - 2q^9 - 2q^{10} + \dots = \sum a_n q^n,$$

le nombre des points modulo p de cette courbe (y compris le point à l'infini) est égal à $p + 1 - a_p$ (à condition que p ne divise pas 11).

Pour l premier, différent de 11, l'opérateur de Hecke T_l est défini par :

$$T_l(\sum a_n q^n) = \sum a_{ln} q^n + l \sum a_n q^n$$

On vérifie que :

$$T_l(f) = af,$$

ce qui signifie que f est un vecteur propre de l'opérateur T_l .

La propriété de f qui lui vaut le qualificatif de "modulaire" est l'équation fonctionnelle suivante :

$$f[\exp(\alpha\tau + b/c\tau + d)] = (c\tau + d)^{-k} f(\tau),$$

où $\exp(\tau) = e^{2\pi i\tau}$, τ est un nombre complexe dont la partie imaginaire est positive, (a, b, c, d) est une matrice de quatre entiers, telle que 11 divise c et $ad - bc = 1$ (elle n'est pas évidente !).

admet un point double si et seulement si le polynôme $X(X-A)(X+B)$ admet une racine double, c'est-à-dire si et seulement si $4ABC = (abc)^2 = 0$.

Le reste du programme consistait à voir ce que l'on pouvait savoir des points d'ordre p de la courbe $E(A, B, C)$. J'ai constaté, en 1969, que leurs coordonnées étaient des entiers algébriques qui ressemblaient beaucoup au corps cyclotomique engendré par ζ_p . Les courbes $E(A, B, C)$ ainsi associées aux solutions hypothétiques non triviales de l'équation de Fermat fourniraient, à condition que la conjecture de Fermat soit vraie, des représentations du groupe de Galois absolu qui sont trop belles pour exister.

Dès leur naissance, on soupçonnait que les courbes $E(A, B, C)$ étaient des juments de Roland (dans Roland Furieux, la jument de Roland possède toutes les qualités d'un cheval). Mais comment le prouver ?

C'est alors que Gerhard Frey est intervenu en 1985 : dans un manuscrit non publié intitulé «Modular Elliptic Curves and Fermat's Conjecture», il conjecturait que les courbes $E(A, B, C)$ ne pouvaient pas satisfaire la conjecture de Taniyama-Weil : décidément l'Histoire aime les marges !

Les formes modulaires

On m'a rapporté une boutade du grand mathématicien M. Eichler : il aurait dit qu'il n'y avait que cinq opérations fondamentales en arithmétique : l'addition, la soustraction, la multiplication, la division et... les formes modulaires.

Les formes modulaires sont des fonctions de la variable complexe vérifiant des équations fonctionnelles (voir l'encadré de la page 95). On en trouve des vestiges fragmentaires dans l'Ars Conjectandi de Jacques Bernoulli (1713), dans quelques beaux spécimens, dont la fonction θ dans Euler (1748), dans l'Introduction à l'Analyse de Fourier, où apparaissent également des séries de Dirichlet et où l'on trouve aussi l'expression sous forme de produit eulérien de la fonction ζ de Riemann. On reste parfois devant la boîte de Pandore ouverte par Euler, Gauss, Abel.

fourmille aussi d'équations diophantiennes, de courbes et d'intégrales elliptiques.

Peut-être est-ce dans Euler que le mathématicien allemand E. Hecke a fait ses achats. Il a relié l'équation fonctionnelle et le développement en produit de la fonction ζ de Riemann, à d'étranges propriétés de la fonction θ .

Ses études joueront un rôle crucial dans la démonstration de la conjecture de Taniyama-Weil.

Les formes modulaires se comportent comme des organismes. Leurs propriétés sont liées de manière subtile et harmonieuse par l'action d'un groupe. Celles qui nous intéressent ici sont vecteurs propres d'opérateurs très importants ici, les opérateurs de Hecke (voir l'encadré ci-contre).

La conjecture de Taniyama-Weil

Depuis les années 1950, on savait associer à une courbe elliptique une série de Dirichlet, que l'on appelait la fonction L de cette courbe elliptique et qui recelait de nombreuses informations sur les points rationnels de cette courbe.

Hecke avait montré, par ailleurs, comment associer à certaines séries de Dirichlet des formes modulaires de telle sorte que les premières possèdent un produit eulérien (un produit sur les nombres premiers), les secondes sont vecteurs propres des opérateurs de Hecke. Toutefois, les fonctions L étaient trop fragmentaires pour démontrer dans le cas général l'existence de la forme modulaire.

En 1955, la voix de Taniyama s'éleva dans le désert pour annoncer que toute courbe elliptique devait provenir d'une forme modulaire. Cette prophétie, prématurée et vague, ne suscita guère d'intérêt à l'époque...

Il est bon de s'arrêter ici pour évoquer des questions de style. Un des thèmes récurrents de notre histoire est que la contribution des mathématiciens français est marquée de positivisme. Le philosophe Auguste Comte, pape du positivisme, dans le développement historique de la science trois stades successifs : le stade théologique, le stade métaphysique, et le stade positif. Dans ce dernier stade, seulement la théorie est vérifiable, on dirait aujourd'hui falsifiable.

Le philosophe Auguste Comte, pape du positivisme, dans le développement historique de la science trois stades successifs : le stade théologique, le stade métaphysique, et le stade positif. Dans ce dernier stade, seulement la théorie est vérifiable, on dirait aujourd'hui falsifiable.

Le philosophe Auguste Comte, pape du positivisme, dans le développement historique de la science trois stades successifs : le stade théologique, le stade métaphysique, et le stade positif. Dans ce dernier stade, seulement la théorie est vérifiable, on dirait aujourd'hui falsifiable.

C'est en ce sens qu'André Weil a apporté une contribution essentielle à la conjecture de Taniyama. En s'appuyant sur la théorie d'Eichler-Shimura, il a su préciser comment on devait chercher la forme modulaire associée à une courbe elliptique.

La scène était dressée pour le spectacle, mais le temps semblait avoir sus-

pendu son vol. On ne savait que faire des courbes elliptiques $E(A,B,C)$ que l'on pouvait associer à une hypothétique solution non triviale de l'équation de Fermat.

L'explosion de 1986 et le théorème de Wiles

On a dit que le coup de baguette magique fut donné en 1985 par G. Frey, alors professeur à l'Université de Sarrebruck. G. Frey conjecturait que nos courbes $E(A,B,C)$ devaient contredire la conjecture de Taniyama, et, merveille des merveilles, la communauté mathématique le crut ! Jean-Pierre Serre, d'ordinaire si prudent, tira le « coup de feu qui fit le tour du monde » en publiant d'urgence la preuve que cela découlaient du théorème de Fermat. Peu de temps après, en 1987, B. Mazur et K. Ribet prouvèrent ces conjectures pour la représentation hypothétique du groupe de Galois. Cette preuve est liée à une solution non triviale de l'équation de Fermat, mais à une condition : il fallait que la courbe $E(A,B,C)$ vérifie la conjecture de Taniyama.

Stimulé par le théorème de Ribet, le mathématicien britannique Andrew Wiles s'engagea dans un long voyage sur des « océans étranges de pensée ».

La navigation fut rude, et ce n'est qu'en 1994 que quelques oiseaux dans le ciel signalèrent la proximité d'une terre. En 1992, il pensait arriver près du but, et le 21 juin 1993, à l'Institut Newton, il annonça que le théorème de Fermat était démontré.

Las, l'annonce était prématurée, et les oiseaux disparurent de l'horizon. Un autre mathématicien abandonna, mais A. Wiles n'écoula que son courage et son collègue R. Taylor ; celui-ci l'incitait à revenir sur sa route. C'est alors que, le 19 septembre 1994, il vit en un éclair la solution tant cherchée : un procédé découvert par Ehud de Shalit et Shalika, qui permettait de passer la conjecture de Taniyama pour les courbes $E(A,B,C)$.

Un choc émotionnel s'en suivit : le théorème de Fermat est enfin démontré. De plus, le travail d'Andrew Wiles ouvre la voie à un vaste continent de recherches futures où de nombreuses conjectures restent à prouver.

Par ailleurs, la liste des équations diophantiennes abordables par la méthode des courbes $E(A,B,C)$ est loin

d'être close. Pourtant les solutions d'une équation aussi voisine du théorème classique, que $x^n + y^n = 2z^n$ ne peuvent être étudiées directement par cette méthode puisque cette équation possède la solution non triviale (1,1,1). Fermat n'est sans doute pas aussi mort qu'on le suppose, sa note marginale suscitera peut-être d'autres découvertes.

À ce stade du panorama et après deux articles portant sur le sujet, le lecteur a une idée sur le comment du théorème de Fermat. Le pourquoi de ces recherches peut lui sembler énigmatique, mais il nous semble que cette question ne peut être examinée en termes logiques que le pourquoi des mathématiques.

Le mathématicien Emil Artin exprime avec force ce point de vue : « Nous pensons tous que les mathématiques sont un art... Certes les mathématiques sont logiques : chaque conclusion est tirée des résultats qui précèdent. Cependant la totalité de l'affaire, l'œuvre d'art véritable, n'est pas linéaire ; et, ce qui est bien pire, sa

perception ne peut être qu'instantanée. Nous avons tous éprouvé, en de rares occasions, une impression d'exaltation en réalisant que nous avions permis à nos auditeurs de voir, l'espace d'une seconde, l'architecture complète d'une question, et toutes ses ramifications. »

Yves HELLEGOUARCH est professeur de mathématiques à l'Université de Caen.

Catherine GOLDSTEIN, *Un théorème de Fermat et ses lecteurs*, Presses Universitaires de Vincennes, 1995.

Grand théorème de Fermat, in *Quadrature*, n° 22, etc 93.

Séminaire Bourbaki, Exposés de Jean-Pierre Serre et Joseph Oesterlé. Juin 1995.

Yves HELLEGOUARCH, *Points d'ordre $2p^h$ sur les courbes elliptiques*, in *Acta Arithmetica* XXVI, 1975.

K.A. RIBET, *Galois Representations and Modular Forms*, in *Bulletin of the American Society*, Octobre 1995.

LES DIFFÉRENTES ROUTES EMPRUNTÉES DEPUIS FERMAT

LA ROUTE DES MÉTHODES

Cette route a été empruntée par Fermat lui-même pour l'exposant 4, puis par Lamé et Lebesgue pour l'exposant 7.

On se ramène à l'impossibilité de la résolution en nombres entiers des équations $t^2 = r^4 + 4s^4$ lorsque n est égal à 4, et $t^2 = r^4 - 3/4r^2s^2 + 1/7s^4$, lorsque n est égal à 7 (r différent de zéro) et on procède par descente infinie.

LES FORMES QUADRATIQUES

On peut penser que, pour les exposants p premiers impairs, Fermat associait à son équation la forme quadratique $x^2 - (-1)^{(p-1)/2}py^2 = z^2$. C'est du même amor que procèdent Euler pour p égal à 3, puis Legendre et Dirichlet pour p égal à 5.

LES EXTENSIONS CYCLOTOMIQUES

Depuis De Moivre au XVIII^e siècle, on sait factoriser $x^n - y^n$ en produit de facteurs du premier degré en x et y , et cela conduit à considérer l'ensemble des nombres déduits par additions, soustractions et multiplications de $\zeta_p = e^{2\pi i/p}$, c'est-à-dire l'anneau des entiers cyclotomiques. C'est ainsi que Kummer parvint à démontrer l'assertion de Fermat pour tous les nombres premiers "réguliers". Malheureusement on ne sait pas démontrer qu'il existe une infinité de tels nombres.

L'APPROCHE ELLIPTIQUE

Elle est beaucoup plus récente que les précédentes (20 ans) et fait l'objet de cet article.

REMARQUES

- 1) Les trois premières méthodes font usage de la descente infinie pour prouver le second cas (défini dans l'article).
- 2) Une forme quadratique apparaît dans la route des méthodes pour l'exposant 7.
- 3) Le nombre quadratique $((-1)^{(p-1)/2}p)^{1/2}$ apparaît implicitement dans la seconde méthode, il appartient à l'anneau des entiers cyclotomiques.
- 4) Finalement le corps des nombres cyclotomiques est contenu dans le corps engendré par les coordonnées des points de p -division de la courbe $E(A,B,C)$.

Partage de butin

IAN STEWART

Des protocoles de partage proportionnels, plaisants ou partiels.

Arthur Barberousse renversa le sac sur la table de la cuisine. Jo le Teigneux, Denis Tourtencuisse et Léon la Volette regardaient, émerveillés, les paquets de billets et les tas de bijoux qui en sortirent. Restait le plus difficile : diviser le butin. Personne n'avait confiance et chacun voulait avoir sa part, sans être lésé. La justice, c'est la justice, n'est-ce pas ?

Arthur partagea rapidement l'argent, en se fondant sur la valeur affichée. C'était facile : il suffisait de diviser la valeur totale en quatre. En revanche, le partage des bijoux était plus épineux, car chaque membre de la bande avait son idée sur la valeur des divers bijoux. Certains objets, telles les chaînes, pouvaient se couper en morceaux, ce qui facilitait le travail, mais les autres...

« Ne trahons pas, dit Jo. La police doit être sur nos traces, et tout cela doit disparaître rapidement.

— Je vais prendre cette tiare de diamants, dit Léon, en se la mettant sur la tête. Et Jo aura les colliers et le...

— Pas question, intervint Denis : des canailles de votre espèce ne seront jamais d'accord si elles procèdent ainsi. Il faut une méthode qui nous garantisse à chacun un partage équitable.

— Ouais, dit Léon. »

Silencieux, ils regardèrent le tas de bijoux. Trois heures après, ils le regardaient encore :

« Ce dont nous avons besoin, dit Denis, c'est de ce que les mathématiciens nomment un "protocole de partage proportionnel plaisant", PPPP en abrégé.

— Aïe, dit Arthur. Et c'est quoi, ce truc ?

— Plaisant, c'est lorsque personne n'a le sentiment que quelqu'un d'autre a obtenu quelque chose qu'il ne...

— Je comprends "plaisant", mais les longs mots d'avant ?

— Un "protocole de partage", c'est une méthode systématique pour partager les choses entre plusieurs personnes. Il est "proportionnel" si chaque personne est satisfaite d'avoir reçu au moins sa juste part, et si personne n'estime qu'un autre a eu plus que sa part.

— N'est-ce pas la même chose que plaisant, demanda Léon ?

— Pas du tout.

— Oui, dit Jo à Denis. Les protocoles plaisants sont toujours proportionnels, mais les protocoles proportionnels ne sont pas nécessairement plaisants.

— Pourquoi ?

— Par exemple, suppose que, tous les trois, vous partagez trois objets, comme un bracelet, un collier et une paire de boucles d'oreilles, et que vous assigniez subjectivement des valeurs de la façon suivante :

	Bracelet	Collier	Boucles
Arthur	40	50	10
Léon	30	50	20
Jo	30	20	50

Le partage est proportionnel si Arthur reçoit le bracelet, si Léon a le collier et si Jo a les boucles, parce que chacun d'entre vous aura reçu plus de 33 pour cent de la valeur totale, mais Arthur ne trouvera pas plaisant que Léon ait le collier, qu'il estime alors plus que le bracelet. Comme nous le verrons, les protocoles plaisants sont beaucoup plus difficiles à trouver que les protocoles proportionnels.

En plus du protocole, des stratégies personnelles garantissent à chacun qu'il atteigne son but. Ces stratégies ne font pas partie du protocole : elles sont d'ailleurs souvent implicites, mais ce sont elles qui garantissent que le protocole est juste. On nomme souvent "joueurs" les personnes entre lesquelles s'effectue le partage, parce qu'on peut envisager ce dernier comme une suite de coups dans un jeu, et l'on peut aussi représenter les valeurs comme des parts d'un gâteau. On se partage le gâteau, quoi.

Pour deux joueurs, par exemple Arthur et Léon, il existe un PPPP simple, que j'appelle « Je coupe, tu choisis » : Arthur coupe le gâteau en deux parts égales, et Léon choisit celle des deux parts qu'il préfère. Avec ce protocole, la stratégie

d'Arthur doit être de couper des parts égales à son goût, de sorte qu'il ne puisse perdre, quel que soit le choix que fera Léon. Pour Léon, la stratégie doit être de choisir la part qui lui semble la plus grosse. La stratégie d'Arthur lui assure une part qu'il estime à 50 pour cent, et celle de Léon une part que Léon estime supérieur ou égale à 50 pour cent. Le protocole est bien un PPPP. »

Comme Denis semblait bien connaître le problème, les trois autres l'envoyèrent à la bibliothèque de l'université locale pour y rechercher des informations supplémentaires et authentifiées. Denis découvrit que les mathématiques des partages acquièrent dans la Pologne en guerre, à Lvov : en 1944, alors que l'armée soviétique combattait pour reprendre la Pologne aux Allemands, le mathématicien Hugo Steinhaus chercha à se changer les idées en résolvant un problème de partage. Il connaissait le protocole « Je coupe, tu choisis » pour partager le gâteau entre deux personnes et les stratégies conduisant chacune d'elles à penser que sa part est au moins égale à la moitié.

Avec cette technique, aucun des deux joueurs n'a de raison de se plaindre : celui qui coupe peut faire une découpe impartiale, et celui qui choisit décide ce qu'il veut prendre ; aucun des deux n'est forcé de faire un choix qu'il jugerait injuste.

« Steinhaus, dit Denis quand il revint vers ses trois acolytes, se demanda si on pouvait diviser un gâteau entre trois personnes.

— Voyons, dit Arthur. Peut-être pourrais-je couper le gâteau en trois parts que j'estimerai égales, puis faire choisir Léon et ensuite Jo ?

— Non, protesta Jo : je ne marche pas, car je choisirais ainsi après Léon, et je risquerai d'avoir une part moins grosse que la sienne. »

Denis expliqua alors que Steinhaus avait abouti à une suite de neuf étapes à l'issue de laquelle chaque joueur est satisfait, car à la fin il considère être au moins un tiers du gâteau. Afin d'examiner ce protocole proportionnel, procédons à quelques définitions. Un joueur estime qu'une part est « juste » si la taille de cette part lui semble au moins égale à un tiers : sinon elle est « injuste ». « Passer » à une certaine étape du protocole, c'est ne rien faire. Par commodité, nous parlerons de « taille des parts » mais il s'agit de valeur relative, estimée par un joueur. Tous les jugements sont subjectifs et propres au joueur qui le fait. Les indications entre parenthèses ne font pas partie du protocole ; ce sont des commentaires sur les stratégies utilisées par les joueurs.

Voici maintenant le protocole de Steinhaus (voir la figure 1) :

1. Arthur coupe le gâteau en trois parts (qu'il juge toutes justes, c'est-à-dire subjectivement égales).

2. Léon peut : soit passer (s'il pense qu'au moins deux parts sont justes) ; soit étiqueter deux parts (qu'il juge injustes) comme « mauvaises ».

3. Si Léon passe, Jo choisit une part (qu'il estime juste). Puis Léon choisit une part (qu'il estime juste) et, finalement, Arthur prend la dernière part.

4. Si Léon a étiqueté deux parts mauvaises, on offre à Jo les deux choix qu'avait Léon : passer ou étiqueter deux parts «mauvaises». Jo n'a pas à tenir compte du choix de Léon.

5. Si Jo passe, les joueurs choisissent dans l'ordre : Léon, Jo et Arthur (comme pour l'étape 3).

6. Si Jo étiquette deux parts mauvaises, il est d'accord avec Léon qu'une des parts est injuste : Arthur prend cette part (comme il a estimé que toutes les parts étaient justes, il ne peut pas se plaindre).

7, 8 et 9. Les deux parts restantes sont regroupées (Jo et Léon sont d'accord pour estimer que l'ensemble des deux parts représente plus des deux tiers du gâteau) et ils font un «je coupe, tu choisis» (ils ont alors chacun une part juste).

«Pfout h...», fit Arthur, c'est pas du gâteau!

— Attends, dit Denis. Vous n'avez encore rien vu. Il y a un problème, car ce protocole est proportionnel, mais il n'est pas plaisant. On peut trouver des cas où chacun estimera avoir sa juste part, mais où Jo, par exemple, trouvera la part de Léon meilleure que la sienne.

Par exemple, si Léon juge le partage d'Arthur juste, alors le protocole s'arrête à l'étape 3, et Arthur et Léon jugent que chaque part est supérieure ou égale à un tiers. Jo obtient alors une part qu'il estimera à moins d'un tiers, d'où un partage proportionnel. Mais si Jo estime que la part d'Arthur est $1/6$ et celle de Léon de $1/2$, il jugera que le partage n'est pas plaisant, car Léon aura mis la main sur une part meilleure que la sienne.

— Et Steinhaus n'a pas trouvé de PPPP pour trois personnes, demanda Léon?

— Non : il n'a pas s'est pas préoccupé des partages plaisants ; ce problème n'a été résolu que plus tard.»

Nerveusement, Arthur regardait par la fenêtre : pas de signe de la police?

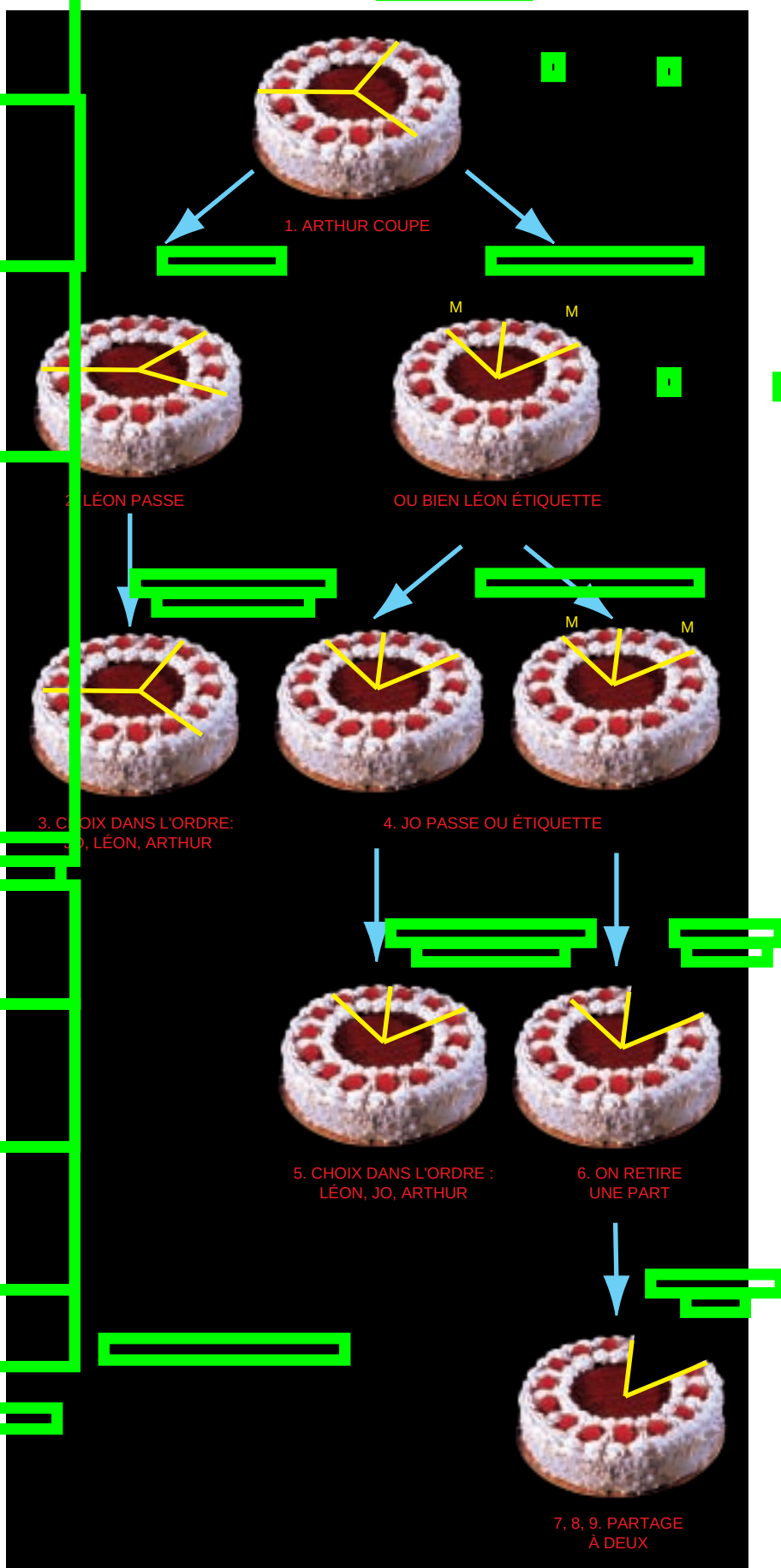
«Ce qui lui importait, continuait Denis, c'était de trouver un protocole de partage proportionnel pour quatre personnes au plus. Ses amis Stefan Banach et B. Knaster en trouvèrent bientôt un.

Supposons que n joueurs $P_1, P_2, \dots, P_n$ se partagent un gâteau. Cette fois un des joueurs considère qu'une part est «juste» : elle lui semble supérieure ou égale à $1/n$. Le protocole de Banach-Knaster est (voir la figure 2) :

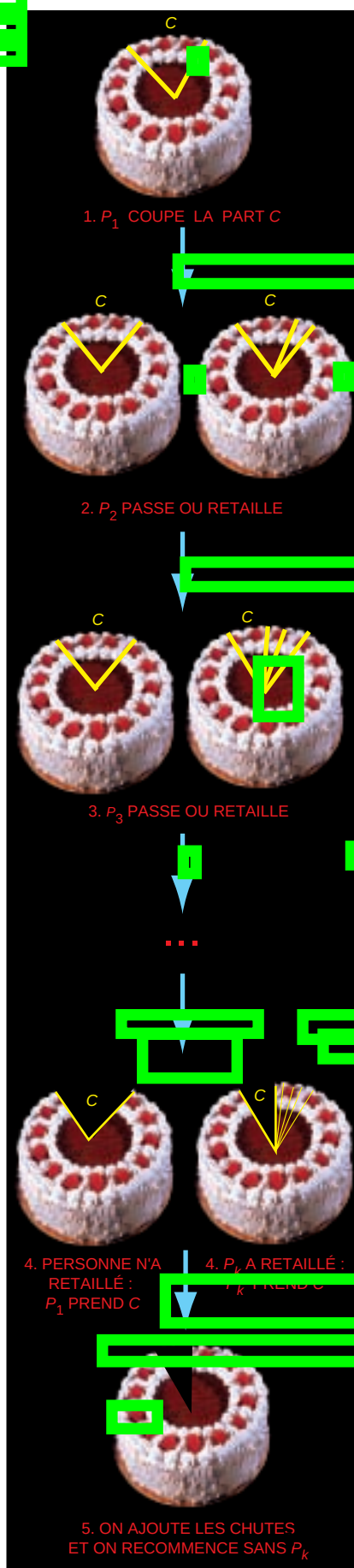
1. P_1 coupe une part (juste) C .
2. P_2 a le choix : de passer (s'il juge

C injuste) ; de retailler C (pour former une part juste que nous continuerons de nommer C). Les chutes sont provisoirement laissées de côté.

3. P_3 fait de même avec la nouvelle part C ; puis viennent les tours de $P_4, P_5, \dots, P_n$, de sorte que chaque joueur,



1. Le protocole de Steinhaus.



2. Le début du partage de Banach-Knaster.

sauf P_1 , a eu la possibilité de retailler la part C .

4. Si personne ne retaille la part C , elle revient à P_1 . Si la part est retailée, elle revient au dernier joueur qui la retaille (car il considère qu'elle est juste, après son coup de couteau).

5. On regroupe le reste du gâteau et les chutes. Les $n-1$ joueurs restants (qui considèrent tous qu'au moins $(n-1)/n$ du gâteau initial restent dans le plat) répètent la procédure précédente.

6. Quand tous les joueurs sont servis sauf deux, ces derniers jouent la fin du gâteau : «je coupe, tu choisis».

Vous voyez : ce protocole de Banach-Knaster est proportionnel, mais il n'est pas plaisant.

— Ouais, dit Léon, et il est différent de celui de Steinhaus. En fait, il est plus simple.

— Absolument, répondit Denis : c'est parce qu'il utilise une nouvelle idée : le redécoupage. Et il reprend de Steinhaus l'idée de découper une part du gâteau et d'étudier ce qui reste».

Léon se cala dans sa chaise et regarda monter lentement la fumée de son cigare.

«Mais dans notre cas, nous ne sommes pas nécessairement d'accord sur ce que vaut chaque partie.

— C'est également vrai pour le partage du gâteau, dit Denis : j'ai toujours pris soin de dire que les parts justes ou injustes ne le sont que subjectivement. D'ailleurs Steinhaus a montré que le problème est plus aisé si les joueurs ne sont pas d'accord.

— Et pourquoi ? C'est bizarre.

— Dans un gâteau, si je préfère le napage de chocolat et toi la génoise de la base, ça nous facilite la vie.»

Arthur grogna pour montrer qu'il comprenait : quand il ne dirigeait pas, il était malade.

«Denis, ces histoires de protocole sont longues et la police peut venir à tout instant. Existe-t-il de meilleures méthodes que celle de Banach-Knaster ?

— Sûr. Il y a des preuves mathématiques abstraites fondées sur le théorème de complexité de Liapounov : elles démontrent que des divisions équitables du gâteau existent toujours, mais n'indiquent pas comment faire la division. Et puis il y a l'algorithme du couteau qu'on déplace.

Celui que je vais vous donner est dû à L. Dubins et à Edwin Spanier, qui l'ont

trouvé en 1961 : un joueur coupe un rayon, du gâteau, puis il tourne lentement son couteau, afin de couper des parts d'angle au centre de plus en plus grand. Un joueur qui dit «coupe» reçoit la part qui est formée quand on coupe à l'endroit atteint par le couteau quand il est intervenu. Cette méthode est utile, en famille, pour couper un gâteau, mais ce n'est pas un algorithme, du point de vue mathématique,

parce que chaque joueur doit prendre un nombre infini de décisions pour savoir quand demander de couper. Les protocoles que l'on cherche doivent reposer sur un nombre fini de décisions.

— Restons à ces protocoles, intervint à nouveau Arthur, sinon la police va finir par rappliquer.

— Tu as raison. J'ai appris qu'au début des années 1960, John Selfridge et John Horton Conway trouvèrent indépendamment un protocole plaisant pour trois joueurs.

1. Arthur partage le gâteau en trois parts (qu'il juge justes).

2. Léon a le choix : de passer (s'il pense que deux parts au moins sont plus grosses qu'une troisième) ; de retailler la part la plus grosse (pour créer deux parts égales et plus grosses que la troisième). Les chutes sont laissées de côté.

3. Jo, Léon et Arthur, dans cet ordre, choisissent une part (qu'ils jugent la plus grosse ou une des plus grosses). Si Léon ne passe pas son tour à l'étape 2, alors il doit choisir la part retailée, à moins que Jo ne l'ait d'abord choisie. À cette étape, la part de gâteau autre que les restes a été divisée en trois parties de manière plaisante (nous ne l'avons pas démontré, mais c'est vrai).

4. Si Léon a passé, à l'étape 2, il n'y a pas de reste, et l'étape 4 est un coup pour rien ; sinon soit Léon soit Jo a pris la part retailée. Nommons ce joueur le «non-coupeur», et l'autre des deux le «coupeur». Le coupeur divise les restes en trois parts (qu'il juge justes). Arthur est avantagé par rapport au non-coupeur, parce qu'il pense quand même que ce dernier n'a pas plus qu'une part juste, car il avait coupé des parts initiales justes. Aussi, de quelque sorte que les restes soient maintenant répartis, Arthur n'enviera pas le non-coupeur.

5. Les trois parts de restes sont choisies par les joueurs dans l'ordre : non-coupeur, Arthur, coupeur. Le non-coupeur choisit le premier, de sorte qu'il n'a pas à se plaindre. Arthur n'enviera pas le non-coupeur, parce qu'il se juge avantagé, et il n'enviera pas le coupeur, car il choisit avant lui. Le coupeur ne se plaindra pas non plus, car c'est lui qui a coupé les restes.

— C'est bien joli, dit Arthur avec impatience, mais nous sommes quatre et non trois, à moins que...»

Il tira un couteau qu'il posa sur la table.

«Eh, pas de panique, dit Denis très vite : il y a quelques années, on a découvert que le partage plaisant existait toujours pour quatre joueurs, mais personne n'avait trouvé de protocole en un nombre fini d'étapes.

— Et alors, demanda Léon. Que s'est-il passé ?

– Alors un journaliste scientifique nommé Dominic Cavastro écrivit un article pour une revue intitulée *The Sciences*, et il intéressa un spécialiste de sciences politiques nommé Steven Brams, de l'Université de New York. S. Brams s'interrogeait depuis longtemps sur les problèmes économiques et politiques de la juste répartition ; il étudiait notamment la division de l'Allemagne entre les Alliés, à la fin de la dernière guerre, et il vit là une piste nouvelle à suivre pour analyser ce type de découpages.

Il commença par chercher un partage plaisant pour trois joueurs, ne comprenant pas que J. Selfridge et J. H. Conway en avaient déjà trouvé un. Dans les trois premières étapes, sa méthode est identique à la leur : elle conduit à un partage plaisant partiel. En revanche, au lieu de leur technique compliquée de division des restes, il conserve la même méthode jusqu'à la fin.

– Ça ne fait que créer d'autres restes, remarqua Léon...

– Oui, mais ces restes de deuxième ordre sont beaucoup plus petits que ceux de premier ordre, et une nouvelle application de la méthode crée des restes de troisième ordre, encore plus petits, et ainsi de suite.

– Mais ce n'est pas un protocole, alors : il ne s'arrête jamais.

– Oui, mais il est simple et efficace.

– Bon, alors allons-y.

– Attends, il y a une dernière méthode, et qui n'est pas infinie. Encouragé par sa découverte, Brams s'attaqua au cas des quatre joueurs, mais il resta bloqué.»

Arthur se remit à tripoter son couteau. Denis, inquiet continua rapidement :

«Alors, s'adressa à un de ses amis, Alan Taylor, qui était mathématicien à Schenectady et qui réfléchit au problème en surveillant l'examen de fin d'études.

Il trouva une solution qui consistait, de façon étonnante, à partager le gâteau en cinq parts.

– Alors qui devait le répartir entre quatre joueurs ? C'est pas clair.

– Oui, et Alan Taylor ne sait absolument pas d'où lui est venue cette idée. En tout cas, son protocole plaisant partiel pour quatre joueurs est le suivant :

1. Arthur coupe le gâteau en cinq parties (qu'il juge égales).

2. Léon retaille si nécessaire deux parts, afin d'en créer trois qui puissent être maximales ex aequo (à son avis) et il laisse les deux autres de côté.

3. Jo retaille si nécessaire une part pour créer deux parties maximales ex aequo (à son avis).

4. Je choisis en premier, puis Jo, puis Léon, et enfin Arthur, qui prend la partie restante. Si Jo ou Léon a retailé une

Le protocole de Brams-Taylor pour quatre joueurs

1. Léon coupe le gâteau en quatre parts (qu'il juge égales) et tend une part à chaque joueur.
2. On demande à Arthur, Jo et Denis s'ils jugent ce partage injuste.
3. Si personne ne se manifeste, on conserve ce partage.
4. Sinon, on poursuit avec le premier qui se manifeste. Supposons que ce soit Arthur. Il choisit une part qu'il envie et la nomme A . Sa part initiale est notée B . Le reste du gâteau est réassemblé.
5. Arthur nomme p un nombre entier supérieur ou égal à 10 (ce nombre p est choisi de sorte qu'il ait la propriété suivante : si A est subdivisé en p parties, Arthur préfère A à B même si les sept plus petites parties sont éliminées. Il peut obtenir cette situation en choisissant p supérieur à $7a(a-b)$, où a est son évaluation de A et b son évaluation de B).
6. Léon divise A et B en p pièces chacune (qu'il pense égales).
7. Arthur choisit trois parts de B (les plus petites) et les nomme S_1, S_2, S_3 . Puis :
 - soit il choisit trois parts (les plus grandes) de A (s'il pense qu'elles sont toutes strictement plus grosses que toutes les parts S_1, S_2, S_3) et il retaille au plus deux d'entre elles (à la taille de la plus petite des trois) ;
 - soit il subdivise (la plus grande) des parties de A en trois parts qu'il juge égales.
 Quoi qu'il fasse, il nomme ces parts T_1, T_2, T_3 .
8. Jo prend les trois parts S_1, S_2, S_3 et les trois parts T_1, T_2, T_3 et :
 - soit il passe (s'il pense avoir déjà deux parts maximales ex aequo) ;
 - soit il retaille une de ces parts (la plus grande) afin d'avoir deux parts maximales ex aequo).
9. Denis, Jo, Léon et Arthur, dans cet ordre, choisissent une part parmi les six parts $S_1, S_2, S_3, T_1, T_2, T_3$ modifiées comme à l'étape 8. Jo doit prendre la part qu'il a coupée si elle est disponible. Léon doit choisir une part S et Arthur doit choisir une part T . À ce stade, on a obtenu un partage plaisant partiel, avec beaucoup de restes et où Arthur juge sa part supérieure à celle de Léon d'une quantité x .
10. Arthur nomme un entier q (choisi tel que $(4/5)q$ soit inférieur à x , où L est l'évaluation faite par Arthur des restes). Ce nombre fixé d'avance évitera que la phase suivante ne se poursuive indéfiniment.
11. Arthur partage les restes en cinq parts (cette idée est reprise de la première solution de A. Taylor).
12. Léon retaille deux parts, si nécessaire, pour créer trois parts maximales ex aequo (à son idée), et il met les restes de côté.
13. Jo retaille une part, si nécessaire, pour créer deux parts maximales ex aequo (à son idée).
14. Denis choisit le premier, puis Jo, puis Léon, et Arthur prend la part restante. Si Jo, ou Léon, a retailé une part, il doit la choisir si elle est disponible quand vient son tour.
15. On répète $q-1$ fois les étapes 11 à 14, en divisant à chaque fois les restes du cycle précédent. À la fin de ce cycle, on a un partage plaisant partiel où Arthur a un avantage sur Léon : il juge sa pièce plus grosse que la somme de la part de Léon et de tous les restes. Dans une «liste des avantages irrévocables», on inscrit la paire (Arthur, Léon).
16. Léon coupe les restes en 12 parties (qu'il juge égales).
17. Chaque un des trois autres joueurs annonce «oui» s'il pense que les 12 parties ont une même taille, «non» dans le cas contraire.
18. Si tout «oui» a un avantage irrévocable sur chaque «non» (voir la liste), alors on donne les 12 parts aux «oui», chacun en recevant le même nombre et le partage s'arrête (c'est pourquoi on utilise 12 : 12 est divisible par 1, 2, 3 et 4).
19. Sinon on choisit la première paire (oui, non) pour laquelle on n'a pas un tel avantage irrévocable et on revient à l'étape 4, avec le joueur «oui» dans le rôle d'Arthur, le «non» dans celui de Léon, et les restes à la place du gâteau.
20. On répète les étapes 11 à 18 jusqu'à ce que (après au plus 15 cycles) chaque paire (oui, non) soit sur la liste des avantages irrévocables. Le cycle s'arrête alors à l'étape 18.

pièce, il doit la choisir si elle n'a pas été prise, quand vient son tour.

Par cette méthode, chaque joueur estime que sa part est la plus grosse ou l'une des plus grosses, de sorte que le partage est plaisant.

– C'est bien joli, dit Arthur, mais cela ne résout pas complètement le problème.

– Tu as raison : ce protocole est infini, ce qui ne gênait pas Brams, qui sait qu'en sciences politiques, les miettes ne comptent pas. Toutefois A. Taylor n'était pas satisfait. Pendant plusieurs mois, il étudia le problème, avec William Zwick et Fred Galvin, jusqu'à ce qu'ils trouvent une manière de modifier la séquence des choix, de sorte que la méthode s'arrête toujours, sans laisser la moindre miette.

Même pour quatre joueurs, le protocole résultant est très compliqué, avec 20 étapes, dont l'une est une longue séquence d'étapes "Je coupe, tu choisis", effectuées par divers joueurs (voir l'encadré ci-dessus). À deux étapes, le protocole demande de considérer un nombre

composé des estimations de certains joueurs, de la taille des parts, et le nombre d'étapes dépend des préférences de chacun. Quelles que soient ces préférences, le nombre d'étapes est fini, mais il peut être rendu aussi grand que l'on veut, selon les préférences des divers joueurs. Contrairement à la méthode initialement trouvée par A. Taylor, ce protocole commence plus classiquement par une division en quatre parts : au cours du protocole, on retrouve plusieurs fois l'idée de découper en plus de parts que de joueurs à propos des restes.

Arthur, Léon, Jo et Denis se lancèrent alors dans le partage du butin par la méthode de Brams-Taylor. Deux heures après, la table était couverte de feuilles de papier où s'alignaient de longs calculs. Arthur regardait une grosse éme-raude solitaire :

«Je pense qu'il faut la diviser en douze, dit-il en lançant un regard furieux à Denis. – Oui, bon... le protocole s'applique aux gâteaux et à tout ce qui peut être divisé

facilement. Hum... Le problème, avec les objets indivisibles, est beaucoup plus difficile, voire sans solution pour... Eh, attends, Freddie le receleur pourrait couper cette pierre.

– Je ne veux pas de Freddie dans cette affaire. Tu nous a fait perdre un temps précieux et je n'aime pas ça. La police doit être sur nos traces, et c'est ta...

Il s'arrêta : une sirène approchait. Il reprit :

«A mon avis, les gars, il est temps de passer à un protocole disproportionné et plaisant seulement pour moi.»

Il monta son couteau vers Denis :

«Je coupe ?

– Oui, et je choisirai, dit Léon.

Ian Stewart est professeur de mathématiques à l'Université de Warwick.

S. BRAMS et A. TAYLOR, An envy-free cake division protocol, in The American Mathematical Monthly, vol. 102, pp.9-18, janvier 1995.

Respirations

SHAW CARLSON

Mesurer le métabolisme de petits organismes.

Pas de vie sans métabolisme : tout être qui respire obtient de l'énergie en oxydant chimiquement des molécules énergétiques stockées dans ses tissus. Malgré la simplicité de ce principe, les biologistes n'ont élucidé que les bases du métabolisme, et la vie est si variée, si complexe que nombre de découvertes attendent ceux qui explorent avec rigueur le fonctionnement des animaux et des végétaux. Peu d'amateurs seraient capables de résoudre les nombreuses difficultés techniques ou éthiques des expériences sur les animaux à sang chaud, mais les quelque dix millions d'espèces de petite taille et à sang froid leur offriront utiles. Les insectes, notamment, sont une mine pour les biologistes amateurs.

La mesure du métabolisme d'un insecte est très simple : lors d'une respiration, l'insecte est enfermé dans un récipient clos, sa respiration provoque la libération de molécules d'oxygène et la libération de dioxyde de carbone. Généralement le nombre de molécules libérées est inférieur à celui des molécules captées, de sorte que la pression dans le récipient est réduite.

Cette baisse de pression est une bonne indication du métabolisme. On la mesure à l'aide d'un appareil de Warburg (voir la figure 1), composé de deux tubes à essai communiquant par un tube capillaire : une minuscule gouttelette d'huile qui s'y déplace révèle les différences de pression entre les deux tubes à essai. Cet appareil est très sensible, et la goutte se déplace même si l'on chauffe l'un des tubes à essai en le tenant dans la main : la pression de l'air augmente dans ce tube et pousse la gouttelette vers le tube plus froid. Pour mesurer le déplacement de la goutte, photocopiez une règle graduée en millimètres et fixez la photocopie sur le tube capillaire.

Comme le système est très sensible, un bon moyen d'obtenir l'égalité des températures dans les deux tubes consiste à les immerger dans une grande cuvette d'eau, en le fixant au-dessus d'un gobelet en matière plastique qu'on lèste avec du sable, des cailloux ou des pièces de monnaie. Le système indiqué sur la figure 1 permet de visualiser la goutte d'huile du tube à essai dans une zone qui reste en atmosphère d'air sec. Pour

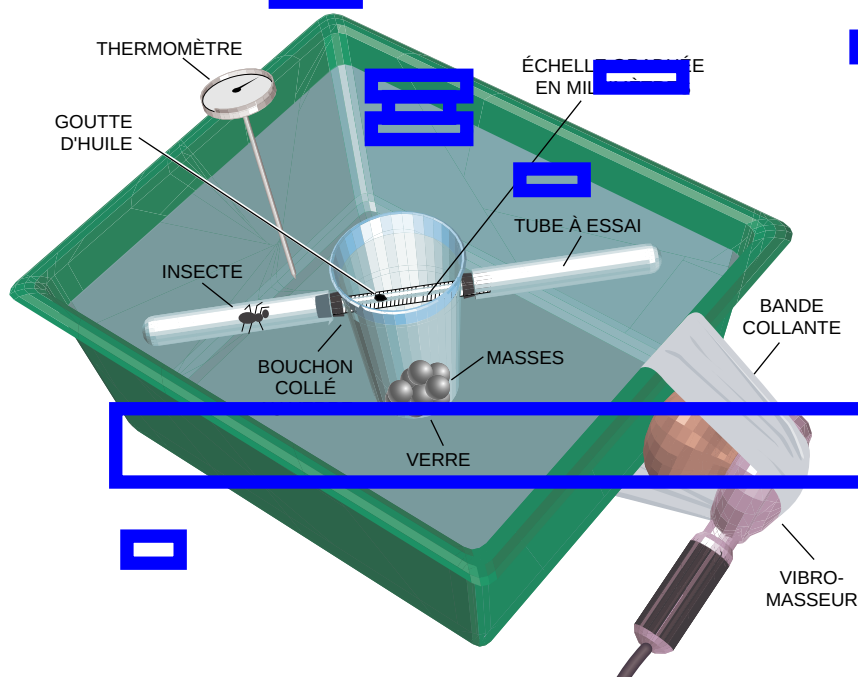
réduire encore les risques de gradients de température, on peut mettre l'eau en mouvement à l'aide d'un agitateur ou d'un vibromasseur. Connaissant la pression de l'air, la température de l'eau et le déplacement de la goutte d'huile, on détermine le nombre de molécules inhalées par l'insecte (voir l'encadré de la page 107).

Combien de molécules de dioxyde de carbone ont-elles été absorbées et combien de molécules d'oxygène ont-elles été libérées ? Le rapport de ces deux nombres, nommé quotient respiratoire, est une mesure fondamentale du métabolisme, car il révèle quel combustible biologique l'organisme utilise. Quand l'organisme brûle des glucides, ce rapport est égal à 1 ; quand il brûle des grasses, il est égal à 0,70 ; avec des protéines, il est égal à 0,80 ; avec de l'alcool, il vaut 0,67. Pour la plupart des êtres vivants, ce quotient est compris entre 0,72 et 0,97, parce que les organismes métabolisent simultanément plusieurs types de molécules.

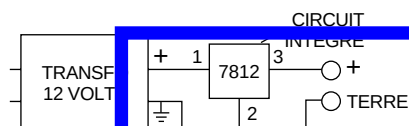
Pour mesurer le quotient respiratoire, je vous propose d'utiliser un peu d'hydroxyde de sodium (NaOH), afin d'absorber le dioxyde de carbone présent dans l'air. On trouve ce composé sous forme solide dans les drogueries (soude en pastilles ou en paquettes) ou dans les magasins de produits chimiques (consultez les pages jaunes de l'annuaire). Prenez quelques précautions : l'hydroxyde de sodium est une substance caustique, qui brûle la peau et les yeux ; aussi ne la manipulez qu'en portant des gants de caoutchouc et des lunettes.

Avant de commencer les expériences, immergez le dioxyde de carbone des tubes à essai dans l'eau. Placez plusieurs grammes de soude dans un seul des tubes à essai, à l'aide d'un bas de nylon ; ce sera une poche idéale qui, si elle est roulée en boule du côté ouvert, empêchera l'insecte de toucher la soude. Mesurez la durée du déplacement de la gouttelette jusqu'à son immobilisation, c'est-à-dire jusqu'au moment où la soude a absorbé le dioxyde de carbone de l'air. Si vous voulez que le système atteigne rapidement l'équilibre, utilisez beaucoup de soude (on pourrait s'inquiéter de la présence de vapeur d'eau, que la soude absorbe également, mais cette absorption ne perturbe pas les mesures).

Pour réaliser les expériences, on placera dans l'un des tubes à essai la soude enveloppée dans le bas et l'animal étudié ; dans l'autre tube, on ne met que la soude. Puis on mesure le temps nécessaire pour que la gouttelette se déplace d'au moins cinq fois le plus petit intervalle repérable sur la graduation. On répète alors l'expérience, pendant la même durée, mais en présence seulement de



1. La respiration d'un insecte se détecte à la différence de pression que l'on mesure entre deux tubes à essai thermostatés. Cette dernière est mesurée grâce au déplacement d'une gouttelette d'huile dans un tube capillaire.



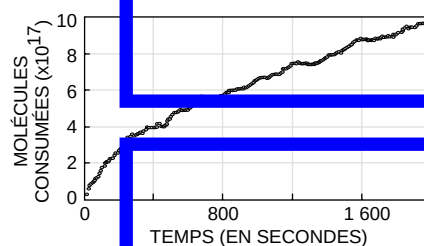
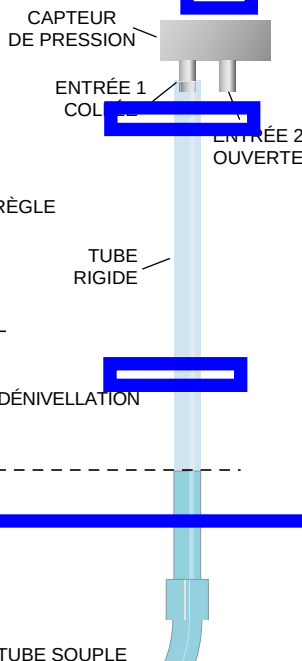
2. Pour calibrer un capteur de pression, on mesure la différence des niveaux d'eau dans deux tubes rigides (à droite). Le capteur est alimenté par un circuit intégré du type 7812 (ci-dessus).

l'organisme. L'encadré donne les équations nécessaires pour calculer le quotient respiratoire à partir des mesures. Les résultats ne seront fiables que si l'organisme est dans les mêmes dispositions physiques au cours des deux expériences (il ne doit pas être inactif dans un cas, et inactif dans l'autre, par exemple), que si la soude a absorbé tout le dioxyde de carbone présent dans l'air avant que la seconde expérience ne commence, et que si les deux expériences ont exactement la même durée.

Si vous êtes prêt à dépenser 500 francs environ, vous pourrez même obtenir des résultats de qualité acceptable par une revue scientifique : procurez-vous un capteur électronique de pression et un voltmètre de mesure. Pour obtenir la courbe de la figure 3, j'ai utilisé le modèle 163PC01D36 d'Honeywell, qui enregistre des différences de pression de 0,0003 atmosphère.

Le circuit d'alimentation de cet appareil est très simple : un transformateur alternatif/continu est connecté à un circuit intégré du type 7812. Sa tension, qui dérive légèrement, provoque une dérive de la tension de sortie du transducteur d'environ dix millivolts, mais cela

n'est pas très gênant. Calibrez le transducteur en le reliant à un manomètre (voir figure 2). Le tube à essai est en matière plastique transparente en forme de U et contenant un peu d'eau (procurez-vous ce matériel dans un magasin d'outillage de jardin ou l'aquariophilie, par exemple). La différence de niveau entre les deux colonnes d'eau



3. On a enregistré la respiration d'un coléoptère. Les petites oscillations de la courbe révèlent que l'insecte « expire » environ une fois toutes les sept minutes (ces mesures ont été faites en l'absence de soude).

du tube en U est une mesure directe de la pression, que vous comparerez à la valeur indiquée par votre capteur de pression.

Le capteur comporte deux orifices qui permettent un raccordement aisé aux bouchons d'obturation de chaque tube à essai de l'appareil de Warburg. J'ai utilisé cet équipement pour mesurer le quotient respiratoire d'un coléoptère et j'ai trouvé, après avoir fait une moyenne sur plusieurs cycles de respiration, une valeur de 0,701. Naturellement vous pouvez mesurer ainsi le métabolisme de bien d'autres organismes vivants : champignons, plantes, moisissures.

Pour obtenir plus de renseignements ou des suggestions d'expériences complémentaires, consultez la messagerie de l'Association des scientifiques amateurs sur le réseau Internet à l'adresse

<http://www.thesphere.com/SAS/>, ou bien envoyez à la rédaction de Pour la Science une enveloppe au format 325 x 230 auto-adressée et timbrée (les informations sont en anglais).

La respiration d'un insecte

Le nombre de molécules ΔN que l'organisme respire pendant qu'il la goutte se déplace de la distance ΔL (en millimètres) est égal à $9,655 \times 10^{16} P S \Delta L / T$. Dans cette expression, P désigne la pression atmosphérique en centimètres de mercure (si vous n'avez pas de baromètre, appelez la météo lorsque vous devez faire une expérience), S la surface de la section intérieure du tube capillaire en millimètres carrés et T la température du bain d'eau en kelvins (pour convertir les degrés Celsius en kelvins, il faut ajouter 273,15).

Le quotient respiratoire, c'est-à-dire le rapport entre le nombre de molécules de dioxyde de carbone libérées et le nombre de molécules d'oxygène prélevées, est donné par l'expression :

$$\frac{\Delta N_{O_2 + NaOH} - \Delta N_{O_2}}{\Delta N_{O_2 + NaOH} + \Delta N_{O_2}} = \frac{\Delta L_{O_2 + NaOH} - \Delta L_{O_2}}{\Delta L_{O_2 + NaOH} + \Delta L_{O_2}}$$

où ΔN_{O_2} est le nombre de molécules prélevées par l'organisme seul et $\Delta N_{O_2 + NaOH}$ le nombre de molécules prélevées quand l'organisme et l'hydroxyde de sodium (NaOH) sont simulta-

nément présents dans le tube à essai. Pour ΔL comme pour ΔN , les indices correspondent aux conditions de l'expérience : soit l'organisme seul est présent, soit l'organisme et la soude le sont simultanément. On n'a besoin de connaître ni la pression atmosphérique, ni la température, ni la surface du tube capillaire pour ne déterminer que le quotient respiratoire.

Avec un capteur différentiel de pression, les équations sont légèrement différentes. La valeur de ΔN est alors égale à $4,582 \times 10^{19} V \Delta P / T$, où V désigne le volume, en centimètres cubes, du tube à essai contenant l'organisme (en tenant compte du volume occupé par l'insecte et la soude), ΔP la variation de pression mesurée en centimètres d'eau, et T la température du bain d'eau en kelvins. Le quotient respiratoire est alors égal à :

$$(\Delta P_{O_2 + NaOH} - \Delta P_{O_2}) / (\Delta P_{O_2 + NaOH} + \Delta P_{O_2})$$

où $\Delta P_{O_2 + NaOH}$ est la variation de pression mesurée lorsque l'organisme et la soude sont tous deux dans le tube à essai, et ΔP_{O_2} la variation de pression mesurée lorsque l'organisme s'y trouve seul.

Craquelures tectoniques

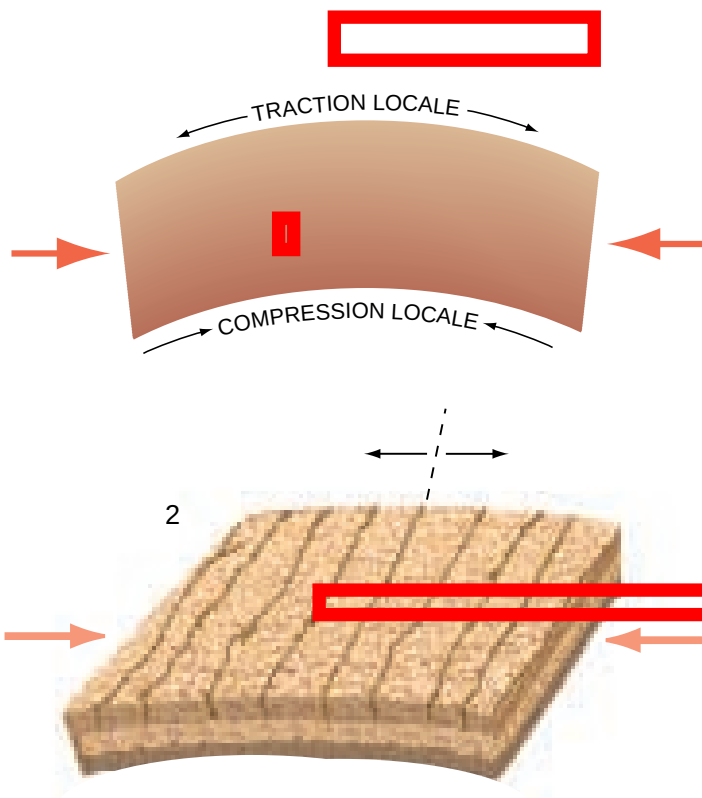


Système de craquelures artificielles évoquant fortement le réseau de diaclasses de la photographie de droite. Il s'est développé dans une fine couche de vernis recouvrant une plaque de plexiglas soumise à un plissement dont l'axe a tourné au cours du temps.

Nous voyez sur la photographie de droite n'est pas un sol d'argile humide craquelé par le Soleil. Nous sommes sur un site géologique côtier du Sud de l'Angleterre, aux environs de Bristol, et nous voyons une strate de roche calcaire (avec d'autres qui lui succèdent, derrière le personnage) qui s'est tranquillement déposée dans la mer il y a quelque 190 millions d'années (au Lias), alors que l'Atlantique Nord n'était pas encore ouvert.

À l'époque, la région s'affaissait lentement et les sédiments s'accumulaient. Ces couches, visibles sur la photographie de droite, furent ainsi progressivement recouvertes par un enlèvement de strates, sur une épaisseur de plus de 500 mètres. Au cours du Tertiaire, il y a 30 à 40 millions d'années, la région a subi les forces tectoniques. Elle a été légèrement comprimée, soulevée, puis attaquée par l'érosion qui a mis au jour les couches visibles actuellement, qui ont été décompressées lors de leur remontée. Les rainures sont dues au creusement, par l'érosion marine actuelle, de fines fissures qui traversent l'épaisseur de la strate. Elles correspondent à une rupture franche par faible écartement (inférieur à 100 micromètres). Ces fissures, extrêmement communes, mais rarement aussi spectaculaires, sont dénommées diaclasses.

Comment et quand se sont-elles formées ? Il est raisonnable de penser qu'elles se sont créées, en profondeur, lorsque les strates ont été comprimées et se sont incurvées en formant des voûtes, dites « anticlinales » (ce qui signifie que les couches plongent dans des sens opposés). En effet, au sommet (à l'extrados) d'un anticlinal, les strates calcaires se comportent comme une règle de plas-





Réseau de «diaclasses» sur une dalle de calcaire marin d'âge jurassique, près de Bristol (Grande-Bretagne).

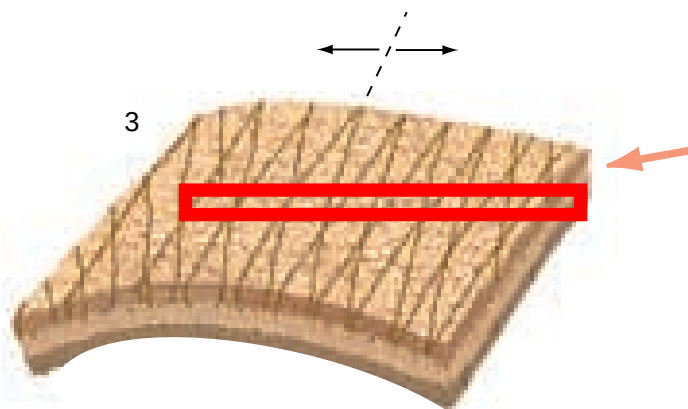
tique que l'on soumet à une flexion et qui subit une «traction». Celle-ci a été suffisante pour ouvrir des diaclasses qui sont une conséquence indirecte d'une compression locale. La présence de plusieurs directions de diaclasses indique que la direction de compression a évolué au cours du plissement, comme l'ont montré des expériences effectuées en laboratoire sur des vernis craquelants (*photographie de gauche*).

Pourquoi le Sud de l'Angleterre était-il soumis à une contrainte compressive? L'explication est simple et majes-

tueuse. Les plaques Afrique et Eurasie, dès la fin du Secondaire, se sont rapprochées en édifiant les chaînes des Pyrénées et des Alpes; ces chaînes sont caractérisées par des structures de compression très intenses, avec des plissements accentués et de grandes failles de chevauchement. Nos diaclasses prouvent, à une échelle très fine, qu'une grande partie de l'avant-pays de ces chaînes transmettait des contraintes compressives jusqu'en Angleterre, européenne à l'époque. Ces faibles contraintes (quelques dizaines de bars) suffisaient pour créer une fissuration intense.

Les diaclasses constituent ainsi des marqueurs ultrasensibles des grands événements tectoniques. Ce type de fracture régit l'exploitation des roches, en carrières et dans les couches souterraines, et joue un rôle important dans la circulation et le stockage des fluides de l'écorce. Elles sont actuellement étudiées par les compagnies pétrolières.

Jean-Pierre PETIT et Maurice MATTAUER



Les strates se fissurent perpendiculairement à la poussée tectonique. Deux systèmes de diaclasses d'orientation différents témoignent de deux stades successifs de plissement. Toute l'épaisseur de la zone craquelée de la photographie correspond à une couche en extension.

Botanique

Connaître les arbres

Bernard Fischesser.
Éditions Nathan, 1995.

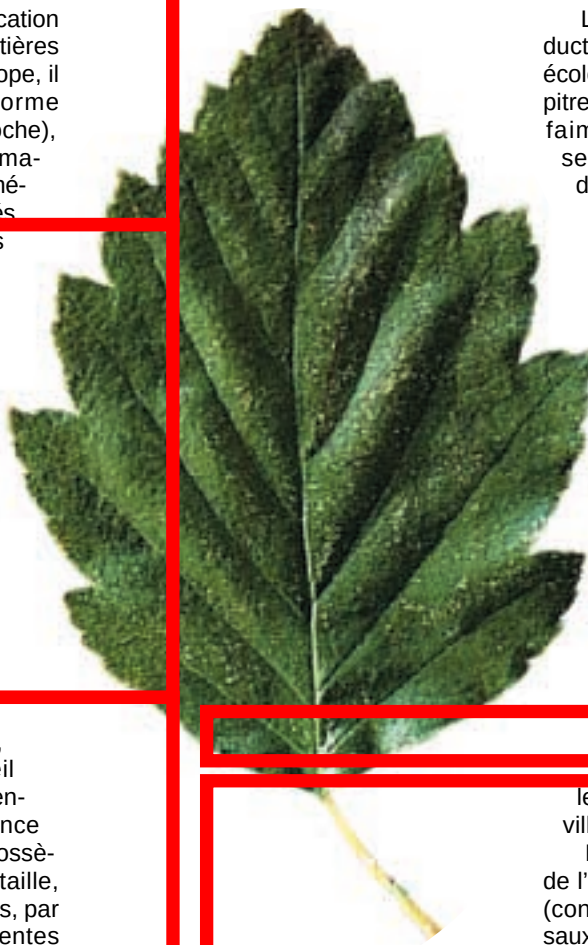
Euvre d'un forestier éminent, ce livre, de présentation agréable et soignée, dépasse l'intérêt les ouvrages récents, pourtant nombreux, consacrés aux arbres des forêts et des parcs. Si, comme ses prédécesseurs, il permet l'identification de la plupart des essences forestières spontanées ou introduites en Europe, il apporte en outre, sous une forme maniable (presque un livre de poche), une somme considérable d'informations scientifiques et techniques généralement dispersées dans des traités de sylviculture ou dans des revues spécialisées. Beaucoup de ces données sont présentées, de façon condensée, mais parfaitement claire, sous forme de tableaux illustrés, particulièrement didactiques, dont les figures auraient, fort démonstratives, sont dues à M. et J. Campan.

L'histoire de la genèse des végétaux arborescents au cours des temps géologiques est d'abord esquissée, conduisant à la définition de l'arbre ; botanistes et forestiers ne s'opposent pas autant que le suggère l'auteur sur cette définition qui repose, pour les uns et pour les autres, sur la permanence d'un appareil végétatif dressé, de grandes dimensions, et non sur la seule existence de formations secondaires que possèdent bien les plantes de petite taille, même herbacées, et que n'ont pas, par exemple, les fougères arborescentes et les palmiers.

Suite logique de cette définition, le panorama des «arbres records» (par leurs dimensions, leur âge...) est dressé à l'échelle du monde, puis de la France ; celle-ci compte aussi nombre d'arbres singuliers pour d'autres raisons : chêne porte-gui, hêtre tortillard («faux») de la Montagne de Reims... À ce sujet, on peut regretter que l'auteur semble prendre à son compte les vertus anticancéreuses attribuées au gui du chêne (la sensibilité individuelle de l'arbre est sans doute plus en cause que les particularités génétiques de son parasite) ou l'explication ancienne de l'origine des «faux» par les effets mutagènes de la chute d'une

météorite ou de «courants telluriques défavorables».

La structure des arbres, les liens entre leur biologie et leur morphologie, les multiples influences extérieures susceptibles d'agir sur leur port, enfin les techniques d'estimation et de mesure de la hauteur, du volume ligneux, de l'âge de chaque arbre sont présentées avec tout le talent du praticien forestier. Le chapitre concernant le fonctionnement et l'anatomie de l'arbre privilégie naturellement les points de vue du sylviculteur et des divers utilisateurs du bois. Ainsi sont notamment



Feuille d'Alnus glutinosa de Fontainebleau, une espèce protégée en France.

rassemblées des données précises sur les divers types d'enracinement, de mycorhizes, enfin sur la structure et l'évolution du bois, d'une part, en relation avec les fluctuations climatiques saisonnières et historiques (présentation de la dendrochronologie) ; d'autre part, avec l'âge de l'arbre. À cet égard, la formation (ou non, selon les essences) de duramen, ou «bois parfait», joue un rôle essentiel sur les propriétés physiques, notamment mécaniques, du bois, autorisant ses multiples utilisations. Si

ces propriétés sont propres à chaque espèce, ou même à certaines formes génétiques à l'intérieur de l'espèce, il faut encore que n'apparaissent pas, dans le bois de certains sujets, des défauts dont l'origine résulte principalement des conditions de croissance de l'arbre. Très claire, enfin, est la présentation des méthodes permettant une identification probable, par l'observation à l'œil nu ou à la loupe, du bois des principales essences couramment utilisées (Bernard Fischesser souligne toutefois à juste titre que seule l'étude microscopique permet d'espérer une reconnaissance certaine).

Les données essentielles sur la reproduction des arbres forestiers et sur leur écologie sont rassemblées dans un chapitre qui laisse un peu le lecteur sur sa faim à propos de la biologie des semences (dormances des graines, durée de leur conservation selon les essences...), bien que l'on retrouve à ce sujet certaines données dans des chapitres ultérieurs. Les fiches et tableaux monographiques qui suivent, véritable cœur de l'ouvrage, modèles de présentation et d'illustration, rassemblent dans le minimum d'espace le maximum d'informations sur les essences présentées. Aux critères morphologiques d'identification sont jointes les particularités biologiques et écologiques, la répartition altitudinale, les propriétés et utilisations du bois de chaque espèce... Ces tableaux concernent non seulement les principaux arbres forestiers indigènes chez nous ou largement plantés, mais un certain nombre d'essences introduites dans les parcs et dans les avenues de nos villes.

Le chapitre consacré aux relations de l'arbre avec les autres êtres vivants (consommateurs, parasites, commensaux...) est également remarquable par la richesse des informations présentées. À propos des attaques parasitaires les plus importantes, éventuellement des autres pathologies (effets des pollutions...) sont précisés, pour chacune des essences concernées, les dégâts et leurs symptômes, les agents pathogènes, les moyens pratiques de lutte...

Les techniques de plantation des arbres en forêt (régénération artificielle) que l'auteur ne semble pas discuter) tiennent de plus en plus compte de la variabilité génétique de chaque espèce. À l'intérieur de chacune se distinguent des sujets («arbres d'élite») ou des populations, différenciées au cours des âges (races géographiques), aux pro-

priétés remarquables (par leur port, les qualités de leur bois, leur résistance aux conditions climatiques locales...) : l'exemple classique est celui des épicéas colonnaires du Jura. Les conseils, pour la réussite des plantations forestières ou d'ornement, s'enchaînent avec précision le long de tous les stades, de la récolte des graines aux soins à apporter aux arbres en cours de croissance, puis adultes. Notons (en le regrettant) que la remarque de l'auteur : «retenir [pour la plantation en forêt] une essence adaptée au sol et au climat...», essentielle du point de vue de l'économie forestière comme de la protection de la nature, ne figure qu'à propos des feuillus. Peut-être aussi aurait-il été opportun d'inciter dans certains cas à ne pas planter, non seulement du fait de la quasi-certitude d'échec dans certaines conditions écologiques extrêmes, mais surtout dans certains types de milieux méritant protection par leur originalité (pelouses calcaricoles, dunes, tourbières...), et dont le boisement (parfois réussi, souvent avorté) a anéanti nombre de sites remarquables de notre pays, ou fortement appauvri leur biodiversité.

Les derniers chapitres concernent essentiellement le rôle des plantations arborées dans l'agrément du cadre de vie rural et citadin (planter un parc, les haies brise-vent, l'arbre et la rivière, l'arbre en ville, l'arbre et le droit...), avec des pages particulièrement vivantes sur le «mythe de l'arbre» dans l'Histoire et dans le Monde (arbres cosmiques ou religieux, arbres symboles...). Un tableau sur «la protection des arbres» ne concerne (malheureusement) que les «individus» exposés aux accidents, principalement à la suite d'actions humaines dans le cadre urbain. La conservation d'essences rares ou menacées n'a pas été envisagée, qu'il s'agisse d'espèces protégées sur le plan national, comme l'alisier de Fontainebleau (*Sorbus latifolia*), le faux chêne-liège (*Quercus crenata*) ou qui devraient l'être, comme l'orme lisse (*Ulmus luevis*)... Ces problèmes, concernant moins les individus (périssables) de certaines espèces en cause que leurs populations, ont peut-être davantage leur place dans un ouvrage sur «la forêt» que sur l'arbre (conformément à l'avertissement liminaire donné par l'auteur). Toutefois, évoquer ce problème ne serait sans doute pas inutile.

Les trois espèces en cause n'ont d'ailleurs pas été retenues par l'auteur dans le chapitre consacré aux fiches monographiques. S'agissant d'essences peu communes, voire rares, cette omission est sans doute justifiée ; en

revanche, l'absence d'autres espèces d'arbres relativement répandus, au moins dans une partie notable de notre territoire, est plus étonnante : ainsi, pour le frêne oxypylle (*Fraxinus angustifolia*), commun dans la moitié Sud de la France et malheureusement introduit en Picardie ; le charme-houblon (*Ostrya carpinifolia*), relativement fréquent dans les collines des Alpes-Maritimes, l'aulne de Corse (*Alnus cordata*), planté jusqu'aux environs de Paris, plusieurs saules arborescents...

Ces remarques ne diminuent en rien l'intérêt que le lecteur tirera de l'utilisation pratique de cet ouvrage, riche d'idées et de données, dont l'agrément est renforcé par quelques superbes photographies en couleurs. B. Fischesser s'adresse aussi bien aux élèves et aux étudiants de tous âges et de toutes disciplines (pas seulement naturalistes), à leurs enseignants, aux techniciens forestiers ou paysagistes (des parcs urbains aux travaux publics), aux promeneurs à l'esprit curieux et naturellement à ceux qui aiment les arbres. Il est certain que le succès de l'ouvrage permettra sous peu une nouvelle édition, où pourraient être abordés quelques aspects des relations entre l'arbre, le forestier et la protection de la nature. L'auteur a d'ailleurs montré sa sensibilité en ce domaine, à travers les nombreux et remarquables ouvrages qu'il a consacrés aux milieux forestiers et à leur conservation.

Marcel BOURNÉRIAS

Paléontologie

Paléontologie. Paysages et environnements disparus

Jean-Claude Gall.
Éditions Masson, 1995.

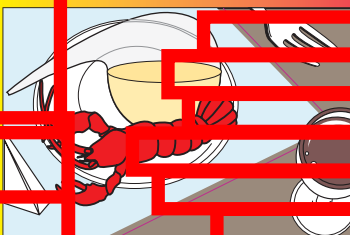
Les tentatives de reconstitution des environnements disparus sont presque aussi anciennes que la paléontologie puisque, avant même que celle-ci ne s'individualise en tant que science, les implications des fossiles avaient frappé l'esprit des hommes : des coquilles marines se concentraient sur la terre ferme et jusqu'au sommet des montagnes ; des restes de plantes et d'animaux d'aspect tropical étaient trouvés dans les régions tempérées, voire froides, du Globe... Autant d'indices qui suggéraient que les environnements du passé avaient pu être

FRANCE INFO
et
POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Moncheccari.

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 11 heures 44,
16 heures 21,
18 heures 14,
20 heures 12,
22 heures 21
et 0 heure 51



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 27 février 1996.

FRANCE
info

très différents, dans les mêmes lieux, de ceux d'aujourd'hui, et qui incitaient à reconstituer ces milieux anciens aussi exactement que possible.

Ainsi débute une paléoécologie avant la lettre, puisque le terme est relativement récent (le mot «écologie» lui-même, proposé par Ernst Haeckel en 1866, est nettement postérieur à «paléontologie», introduit en 1822 par Blainville). La paléoécologie, dans le sens où l'entend l'auteur de ce livre, c'est-à-dire une discipline carrefour combinant des informations provenant de la paléontologie, de la sédimentologie, de la géochimie et de la géologie structurale, a été objet de nombreuses études, surtout depuis le début de ce siècle. Au cours du temps, ses méthodes se sont perfectionnées, développées et affinées, et, de ce fait, les reconstitutions proposées pour un même gisement ou pour une formation fossilifère (le plus souvent, c'est de cela qu'il s'agit) ont varié considérablement (les interprétations des calcaires lithographiques de Solnhofen ou de Cerin sont des exemples particulièrement parlants).

Jean-Claude Gall, qui a consacré sa carrière à l'étude paléoécologique de

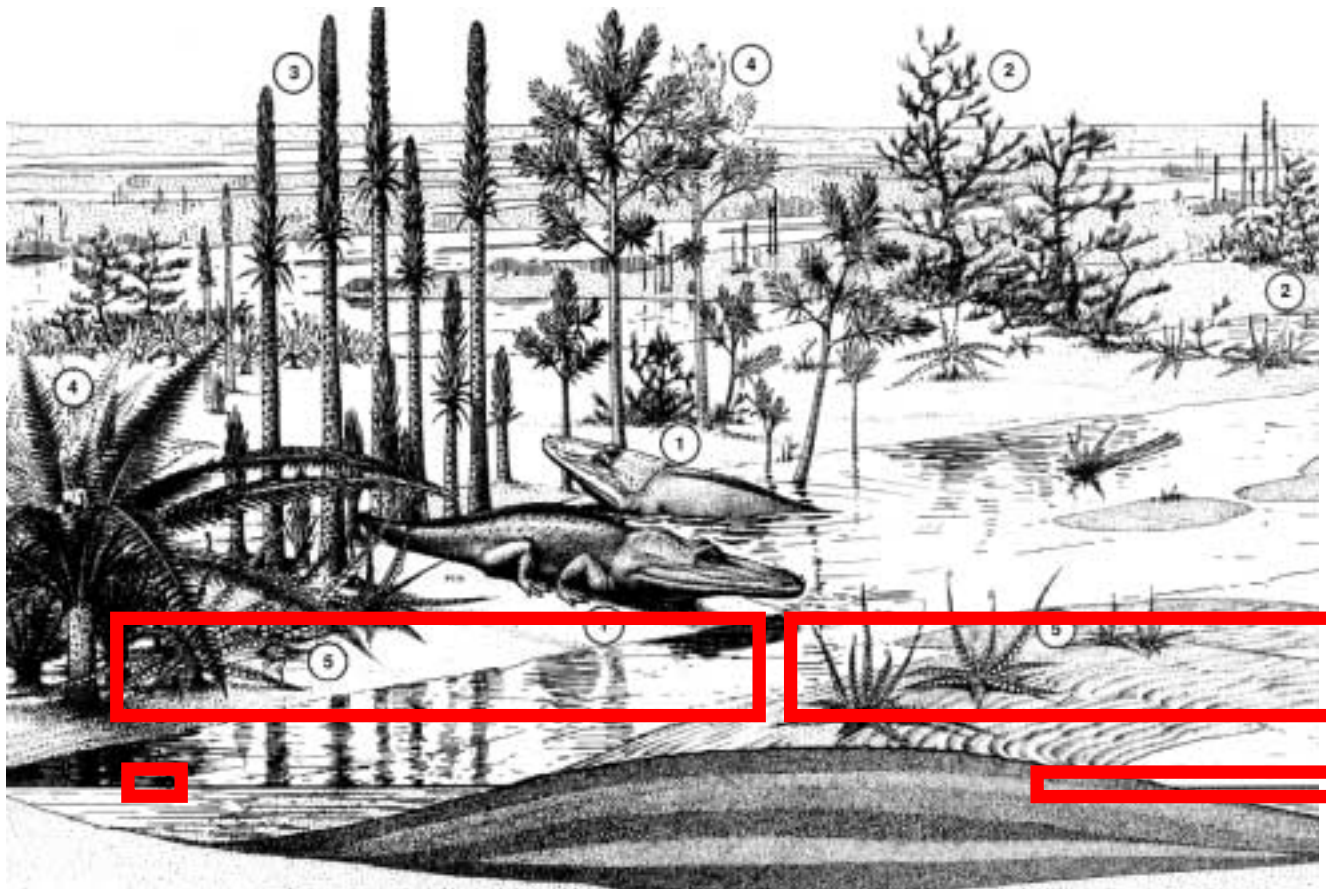
formations fossilifères remarquables, tels le grès des Vosges ou les calcaires lithographiques de Cerin, présente ici un ouvrage en deux parties. La première passe en revue les indices et les approches qui permettent d'aborder l'étude des paléoenvironnements. Le champ ouvert est très vaste, au point de ne pas toujours permettre un exposé très approfondi, puisqu'il aborde aussi bien les aspects biologiques que les aspects physico-chimiques des environnements, des stratégies démographiques des êtres vivants aux caractères sédimentologiques des roches. Les généralités ainsi présentées pourront justement paraître trop «générales» au spécialiste, mais elles seront sans nul doute utiles au public visé par le livre, c'est-à-dire essentiellement les étudiants.

On regrettera tout de même que certains passages soient quelque peu dépassés : la page consacrée à la mesure des paléotempératures (à partir de l'étude des isotopes de l'oxygène) ne fait guère référence qu'aux recherches d'Urey, remontant à 1951, sur des bélemnites jurassiques, alors que cette technique est devenue depuis l'un des outils les

plus efficaces et les plus utilisés pour l'étude des climats et de la chronologie du Quaternaire.

C'est lorsque l'auteur passe aux applications (il y consacre les deux tiers de son livre) que l'intérêt des approches, des techniques et des méthodes présentées dans la première partie du livre devient vraiment clair. Après quelques pages générales sur les gisements fossilifères, la deuxième partie de l'ouvrage est, en effet, la présentation de nombreux cas d'espèce illustrant les résultats obtenus par la recherche paléoécologique dans des situations variées.

Les milieux reconstitués vont des flysch déposés dans les régions alpines à des profondeurs comprises entre 2 500 et 5 000 mètres sous le niveau de la mer aux sédiments déposés dans des grottes lors de leur occupation par l'homme préhistorique, en passant par les célèbres «Vieux Grès Rouges» d'Écosse, les récifs de coraux et autres organismes constructeurs du Trias autrichien, les fonds marins dépourvus d'oxygène du Jurassique inférieur de Souabe ou encore le lac éocène de Messel, près de Darm-



Paysage de chenal fluvial, dans une zone de delta qui occupait les Vosges, au début de l'ère secondaire. La paléoécologie cherche à reconstituer de tels paysages. Ici on a déduit que les berges étaient fréquentées par de grands batraciens (1). La végé-

tation clairsemée était dominée par des conifères, les Voltzia (2), qui étaient accompagnés par des arbustes élancés, les Pleuromzia (3) et les Yuccites (4), ainsi que par des fougères Neuropteridum (5).

stadt, dont les sédiments livrent de si magnifiques fossiles.

Au total, une quinzaine de reconstitutions de paléoenvironnements, d'âges divers et correspondant à des milieux variés, sont étudiées. L'auteur, même s'il s'efforce de présenter chaque fois un tableau cohérent, ne cache pas les principales divergences d'interprétation qui ont existé ou qui persistent encore sur certains aspects de ces reconstitutions. Pour apprécier pleinement les efforts qui ont permis de reconstituer ces paysages disparus, il faudrait d'ailleurs se rendre sur place, ne serait-ce que pour voir, concrètement, ces roches et ces fossiles qui ont servi de point de départ. C'est là, face aux «cailloux», que l'on apprécie à sa juste valeur l'ampleur du travail nécessaire pour parvenir à une reconstitution paléocéologique convaincante à partir d'indices qui, souvent, n'ont rien d'évident.

parfois, sont ambigus (car l'actualisme a ses limites : si le présent est la clef du passé, suivant la formule consacrée, cette clef n'ouvre pas toujours sans difficulté les portes des environnements disparus).

La paléocéologie a eu son heure de gloire dans certains pays (l'Allemagne notamment) peut-être plus que dans d'autres. Aujourd'hui elle peut paraître un peu passée de mode à certains paléontologues préoccupés uniquement de reconstitutions phylogénétiques, considérées certainement à tort comme scientifiques et plus rigoureuses que celles des milieux disparus. Même s'il n'évoque guère certains développements récents, comme ceux de la paléoclimatologie du Quaternaire, qui contribuent à nous renseigner sur la dynamique même des climats actuels (voire futurs), J.-C. Gall rappelle fort à propos que la paléocéologie a eu des réussites à son actif. Elle est bel et bien une branche importante des sciences de la Terre, dont il n'aurait pas oublié qu'elles ont, parmi leurs buts principaux, la reconstitution d'une histoire qui inclut au premier chef celle

Ce livre bien illustré et écrit de façon claire constitue une introduction utile à cette discipline, que les étudiants et aussi les enseignants en sciences de la Terre apprécieront.

Eric BUFFETAUT

RÉFÉRENCES DES ILLUSTRATIONS

Couverture : *La nourrice*, par Alfred Roll, avec l'aimable autorisation du Musée des Beaux-Arts de Lille, Giraudon/Art Resource. P. 8 : JACQUANA. Pp. 12 et 13 : Bibliothèque municipale de L'Aigle. P. 14 : Jean-Loup Charmet. P. 16 : document PLS. P. 20 : F. Rijli. P. 21 : document PLS. P. 22 : PLS/CNRS. Paul Loubeyre. P. 23 : document PLS. P. 24 : Guy Le Roux. P. 25 : document PLS. P. 26 (à gauche) : Olivier Dutour. P. 26 (à droite) : Jean-Loup Charmet. P. 28 : Jean Lescure. P. 29 : document PLS. P. 30 : Philippe Sautet. P. 31 : document PLS. P. 32 : *Nature*/PLS. P. 33 : JACQUANA. P. 34 : Dictionnaire de l'Académie française. P. 36 : document PLS. P. 38 : Photographie de Bernard Henri, Bibliothèque municipale de Senlis. P. 39 : Jean-Loup Charmet. Pp. 40 et 41 : Photographies de Bernard Henri, extraites de *Histoires prodigieuses*, de Pierre Boastua. P. 42 : Photographies de Bernard Henri, extraites de *De monstrorum natura, caussis et differentiis Fortunio Liceti*. Pp. 43 et 44 (en haut) : Photographie de Bernard Henri, extraites de *Œuvres* (1573), d'Ambroise Paré, Bibliothèque municipale de Senlis. P. 44 (en bas) : CNRS-Embryologie. Pp. 46 et 47 : Dana Burns-Pizer. P. 49 : Dana Burns Pizer, d'après Jiri Mestecky. P. 52 : Skidata Computer. Pp. 53 et 56 : Michael Goodman. P. 67 : Abraham Menashe. P. 68 : Roberto Osti. P. 69 (en haut) : Carey Ballard. Pp. 69 (en bas) à 71 : Roberto Osti. P. 72 : David M. Phillips,

Population Council, Science Source. Pp. 76 et 77 : Gravure de J. Carter ; Mesures et dessins d'Edward Cressy et George L. Taylor. P. 78 (en haut) : Tomo Narashima. P. 78 (en bas) : Gravure de J. Carter ; Mesures et dessins d'Edward Cressy et George L. Taylor. P. 79 (en haut) : Tomo Narashima. P. 79 (en bas) : Gravure de J. Carter ; Mesures et dessins d'Edward Cressy et George L. Taylor. P. 80 : Tomo Narashima. P. 81 (en haut) : Philip Vanoutrive, SIPA. P. 81 (au milieu à droite) : Massimo Sestini, *Gamma Liaison*. P. 81 (au milieu à gauche) : Gianni Giansanti, *Sygma*. P. 81 (en bas) : Massimo Sestini, *Gamma Liaison*. Pp. 84 et 85 : William Haxby et Laurie Grace. P. 86 (à gauche) : UPI/Bettmann. P. 86 (en haut à droite) : UPI/Bettmann Newsphotos. P. 86 (en bas à droite) : *Third Eye Photo Alaska Stock*. P. 87 : Laurie Grace. P. 88 (à gauche) : Hokusai, *Beaman Archive*. P. 88 (en haut à droite) : Edward Sheriff Curtis, avec l'aimable autorisation du Muséum d'histoire naturelle américaine. P. 88 (en bas à droite) : Roy Hyndman. P. 89 : Laurie Grace. P. 90 (à gauche) : *Trimble*. P. 90 (en haut à droite) : James C. Staveland, *U.S. Geological Survey*. P. 91 : Timothy Johnson. P. 93 (à gauche) : documents PLS. P. 93 (à droite) : Roger-Viollet. P. 94 : document PLS. Pp. 106 et 107 : Michael Goodman. P. 108 (en haut) : Jean-Pierre Petit. P. 108 (en bas) : document PLS. P. 109 (en haut) : Jean-Pierre Petit. Pp. 109 (en bas), 110 et 112 : documents PLS.

POUR LA SCIENCE
8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti, Bénédicte Leclercq, Luc Allmar, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelir. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Fabienne Louis. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Daniel Collobert, Béatrice Debû, Paul Decaux, Yves Gaudemer, Eveline Host-Platret, Marie-Thérèse Lecomte, Philippe Machetel, Anne Masé, Carmen Müller, Claude Olivier, Jean-Claude Rage, F. Rijli, Laurence Schaffar, Françoise Siri, Pascale This, Jean-Louis Taupin, Serge Vaudenay.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Renne. Board of Editors : Michelle Press (Managing Editor), Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemcek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Co-Chairman : Pierre Gerkens. Executive Committee : John Moeling, Vincent Barger, Robert Biewen.

PUBLICITÉ FRANCE
Cheffe de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06. Tél. (0) 46 34 21 42. Téléc. LIBE 01 209278F. Télécopieur 01 43 25 18 29. **Étranger** : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP
Henri Gibelir.
DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE
Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada.
Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Monay.
Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressés par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.
Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de «Scientific American Inc.». La licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.» En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront en pages 18A, 18B, 98A et 98B des bulletins d'abonnement.