

■ POUR LA
SCIENCE

AOÛT 1996

édition française de

**SCIENTIFIC
AMERICAN**

SOLEIL ET PEAU

LA MÉDECINE DES PHARAONS

LES PROPRIÉTÉS DES QUASICRISTAUX

SOMMEILS PROLONGÉS D'INSECTES

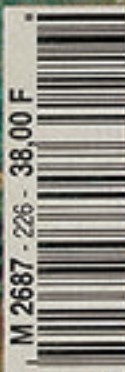
LA PÊCHE À LA MORUE

LES ANTICANCÉREUX DE L'IF

FORAGE CONTINENTAL PROFOND

EINSTEIN ET LES TROUS NOIRS

LA VIE DES DINOSAURES



Canada : \$ 9.95

Bloc-notes de Didier Nordon

Point de vue

Informatique, santé et sécurité
par Jean de Kervadec

Tribune des lecteurs



Jeu-concours

Décompte de cartes
par Pierre Tougne

Science et gastronomie

Dans les papilles

Perspectives scientifiques :

Matériaux mous

Un soja bien mal squatterisé

Vent solaire

Parfum arctique

Protection invisible

La caulerpe

Superphénix demain?

Sans domicile

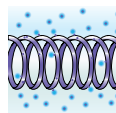
Un roman fleuve

Ô rôles et cris

La cellulose

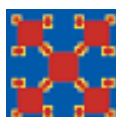
Rides et cratères sur Caramède

Cosmétiques et pépins de raisin



Savoir technique

L'ampoule à halogène
par Terry McGowan



Visions mathématiques

La sculpture et les nombres
par Ian Stewart



L'image du mois

Chargeurs d'Egypte
par Giulio Cuccodoro

Analyses de livres

- Inventaire des plantes protégées en France, par Philippe Danton et Michel Baffray
- Flatland, par Edwin Abbott
- La physique quantique, par Étienne Klein

5

7

9

10

11

12

13

14

15

16

17

20

21

22

22

23

24

25

26

100

108

110

DOSSIER : LA VIE DES DINOSAURES

La reconstitution des dinosaures

par Gregory Paul

Les illustrations de Charles Knight ont ressuscité et rendu les dinosaures bien avant Jurassic Park.



Le baron Nopcsa et les dinosaures

36

Unoiseau chinois du Jurassique?

38

Les plus vieux tyrannosaures

40

Dinosaures du Gondwana

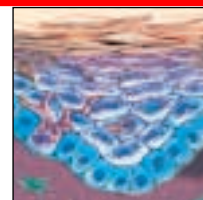
41

Le soleil et la peau

44

par Louis Dubertret

Le soleil est indispensable à la vie, mais l'excès de rayonnement est nuisible. Les ultraviolets que l'on croyait inoffensifs, sont aussi nocifs que les ultraviolets B : ils déclenchent aussi des cancers de la peau.

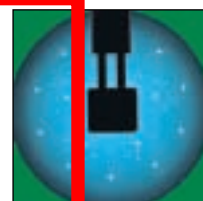


Les propriétés des quasicristaux

52

par Jean-Marie Dubois

Les exceptionnelles propriétés électriques, mécaniques et tribologiques des quasicristaux sont d'heureuses surprises qui permettent d'intéressantes applications technologiques.

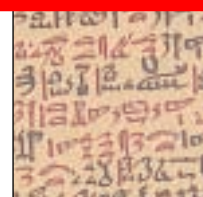


Les papyrus médicaux de l'Égypte ancienne

60

par Thierry Bardinet

L'étude des papyrus médicaux montre que, pour les Égyptiens, la santé ou la maladie dépendaient essentiellement de souffles d'origine extérieure.

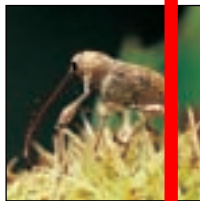


Le long sommeil des insectes

68

par Frédéric Menu
et Domitien Debouzie

Dans certaines populations d'insectes les individus s'endorment pendant des durées variables. L'espèce se protège ainsi contre les variations climatiques.



La pêche à Terre-Neuve

74

par Jacqueline Hersart
de la Ville-Marque

La pêche à la morue sur les bancs de Terre-Neuve a longtemps été rentable et, pendant près de 500 ans, de nombreux ports ont été armés pour cette pêche.



Einstein, père des trous noirs malgré lui

82

par Jeremy Bernstein

Les équations de la relativité générale sont les fondements de la théorie des trous noirs. Einstein voulait toutefois les utiliser pour démontrer que ces objets célestes n'existent pas.

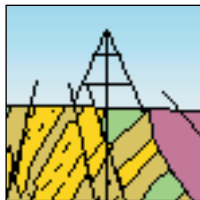


Neuf kilomètres sous l'Allemagne

90

par Rolf Emmermann

En Allemagne, les géologues ont foré à neuf kilomètres de profondeur, afin de comprendre la formation et l'évolution du continent européen.



Les taxoïdes : de nouvelles armes contre le cancer

100

par Kyriacos Nikitaou,
Rodney Guy et Pierre Potier

Après avoir découvert le principe anticancéreux de l'if, les chimistes mettent au point des composés analogues pour combattre la maladie.



ÉDITORIAL

L'odyssée des quasicristaux : un cas d'école

Les quasicristaux sont exemplaires : subodorés il y a une dizaine d'années, ils sont aujourd'hui une réalité industrielle.

L'évidence initiale était ténue : les diagrammes aux rayons X de cet état de la matière présentaient une symétrie d'ordre cinq qui contredisait les lois classiques de la cristallographie. Pour les sceptiques, les observations n'étaient qu'un artefact, pour les plus optimistes et les mieux intentionnés, cette phase solide était une curiosité de laboratoire. Les preuves de l'existence de cette quasi-symétrie reposent sur quelques grammes fabriquées à grand frais ; aujourd'hui de tels quasicristaux, des alliages intermétalliques, sont produits par tonnes (voir *Les propriétés des quasicristaux*, par Jean-Marie Dubois, page 52).

Sur le front de la science, les interactions entre disciplines sont la règle, et les techniques de pointe activement mobilisées. Une telle observation n'est pas nouvelle : elle n'en est pas moins vraie. La compréhension de ces anomalies de la matière a été étayée par un pavage biscornu découvert par le mathématicien Penrose, par une théorie mathématique élaborée juste avant que ces cristaux à symétrie pentagonale aient été découverts, par des observations cristallographiques fines, par les connaissances accumulées en physique des solides ; les structures fractales ont aussi contribué à une meilleure perception de la géométrie de l'alliage et ont grandement facilité le calcul de ses propriétés électriques et thermodynamiques.

Aujourd'hui les ingénieurs mettent au point des alliages quasi cristallins dont les propriétés antifriction et conductrices de la chaleur sont prometteuses : des applications apparaissent sur le marché. La partie n'est pas gagnée car l'industrie est une maîtresse sévère, les voies de la commercialisation semées d'embûches, mais les espérances sont tangibles.

Superbe cheminement entre sciences fondamentales et appliquées. Dans ce domaine, les réalisations françaises sont en pointe : une bouffée d'oxygène en des temps qui peuvent apparaître maussades.

Philippe BOULANGER

Informatique, santé et sécurité

JEAN DE KERVASDOUÉ

La fiabilité des données contenues dans les dossiers médicaux est plus importante que leur confidentialité.

Le secteur de la santé ne peut plus se passer des données informatiques. La France a, dans ce domaine, une petite dizaine d'années de retard sur les autres pays occidentaux. Jusqu'à une date récente, les pouvoirs publics s'en sont peu préoccupés. La mise en œuvre de la carte santé (dont l'idée date de 1975) a pris du retard. Des hôpitaux fabriquent des logiciels et concurrencent ainsi leurs fournisseurs potentiels, les sociétés de service. Les médecins libéraux qui se sont équipés de micro-ordinateurs ont accès à peu de services et leur productivité n'a guère augmenté. Beaucoup plus grave, des réticences à l'informatisation sont apparues, dont la Commission nationale informatique et libertés s'est faite le porte-parole : cette institution ne s'est intéressée qu'à un aspect de la sécurité informatique, la restriction de l'accès aux données médicales nominatives.

Le respect du secret médical impose en effet la protection des dossiers individuels : seules les personnes autorisées doivent pouvoir y accéder. L'informatisation accroît-elle le risque de divulgation d'informations confidentielles ? Une forte hypocrisie règne aujourd'hui dans ce domaine. La règle est de limiter la connaissance de données médicales aux seuls médecins, y compris ceux des caisses de Sécurité sociale. Pourquoi alors l'interruption volontaire de grossesse a-t-elle un code spécifique, qui permet à tous les employés qui instruisent un dossier de remboursement de l'identifier, alors qu'une fracture du bras ou une appendicectomie leur sont cachées ?

En outre, nous sommes dans un état démocratique, où les tribunaux peuvent

instruire les plaintes en cas d'accès à des données médicales et de leur utilisation abusive. Nous n'avons donc pas besoin de créer une procédure (pour ne pas écrire une juridiction) d'exception pour protéger les données médicales numérisées sur des cartes magnétiques ou circulant dans des réseaux entre les cabinets médicaux, les pharmacies et les caisses d'assu-



rance maladie. Si nous étions dans un état totalitaire qui ne garantissait pas ce droit fondamental, les protections imposées par la Commission nationale informatique et libertés ne seraient d'au-

UNE COMMUNICATION VITALE

Les enjeux de la sécurité informatique dans le domaine de la santé sont d'une toute autre nature. Le risque majeur que court chaque Français est celui de la non-transmission de données médicales qui le concernent, entre méde-

cins, entre hôpitaux, voire entre services d'un même établissement. Un malade en urgence qui a perdu conscience ne peut pas dire aux médecins qui l'accueillent qu'il est allergique à telle ou telle substance. Une étude récente montre qu'au moins 25 pour cent (un quart!) des malades admis en urgence un jour donné dans un échantillon d'hôpitaux français ont une maladie liée à la médecine et notamment à l'ingestion de médicaments. Comment prendre en charge ces malades si l'on ne connaît pas précisément les thérapeutiques qui leur ont été prescrites avant leur admission à l'hôpital ? C'est donc la communication entre professionnels de santé qui s'impose et non la construction de protection et de mécanismes de restriction d'accès.

L'autre aspect de la sécurité est la fiabilité des informations décrivant à un moment donné l'état d'un malade. Pour que l'information soit fiable, au-delà de quelques contrôles logiques, il n'y a qu'une règle simple : il faut qu'elle soit utilisée. Le cloisonnement et le non-partage sont les causes de la situation malheureusement la plus fréquente : données incomplètes, peu fiables, inutilisables par un tiers. Les médecins se considèrent toujours comme des travailleurs indépendants, ce qu'ils ne sont plus. La médecine s'est spé-

cialisée, la moindre intervention chirurgicale nécessite certes un chirurgien, mais aussi un anesthésiste, un radiologue, un biologiste, souvent un cardiologue. Les sources d'information sont multiples : elles doivent être par-

taillées. La maîtrise, notamment médicalisée, des dépenses de santé n'est envisageable que si toutes les données sont fiables et que certaines sont partagées.

Sur le plan économique, le coût des duplications d'examens, difficile à évaluer, atteint certainement des montants de l'ordre de plusieurs milliards de francs. En outre, la destruction de fichiers empêche toute étude épidémiologique sérieuse, base de la prévention.

Jean de KERVASDOUÉ dirige la Société de conseil dans le secteur sanitaire et social SANESCO et préside la Formation «Santé-protection sociale» du Conseil national de l'information statistique.

Constructivisme

Paul Caro joint sa voix (voir *Le mauvais procès des constructivistes*, *Pour la Science*, juillet 1996) au chœur des notables et célébrités de la science sûre d'elle-même qui s'est exprimé dans le manifeste de Heidelberg : tous les malheurs viendraient des "fausses sciences" et d'une dangereuse montée de l'irrationalisme. Tout le monde sait pourtant aujourd'hui que la "méthode scientifique" unique, valable dans tous les domaines, n'existe pas. Les erreurs sont nombreuses. Est-ce que ce sont des tenants des parasciences ou des médecines parallèles qui ont poussé à transformer des troupeaux de ruminants dociles en charognards ordinaires, avec les conséquences que l'on sait (partiellement encore)? Ceci s'est bien fait avec l'assentiment répété, sinon avec l'approbation ou à l'initiative des vétérinaires que les fabricants d'aliments pour le bétail se contentent d'avoir à leur service.

La position de P. Caro sur la mémoire de l'eau illustre bien la remarque de Jean-Marc Lévy-Leblond : les sciences confondent "validité" et "pertinence". Cela ne passe pas parce que la validité des résultats est souvent contestable, mais est contestable qu'une recherche dans ce domaine n'est pas pertinente. D'une part les interactions à haute dilution sont mal connues, d'autre part la médecine scientifique a bien besoin d'éclaircissements sur le "mystère" du placebo.

Maurice PASDELOUP, Toulouse

Préférer dire qu'il existe un seul principe de causalité et une seule logique de raisonnement semble, pour P. Caro, la seule manière de ne pas sombrer dans l'ésotérisme : un tel point de vue risque fort d'aboutir au constat qu'un grand nombre de disciplines scientifiques participent au projet constructiviste. L'expérimentation empirique des particules utilise la même méthode que l'expérimentation en psychologie expérimentale. Les résultats sont-ils respectifs relevant d'un même processus physique immuable et définitive? Même en mathématiques, existe-t-il un seul type de raisonnement acceptable? Le raisonnement par l'absurde, valable pour l'école formaliste, est refusé par l'école intuitionniste, au nom précisément de la rigueur mathématique.

Jacques MIERMONT, Paris

Dans le processus de la connaissance, la science est en position inconfortable : il sait que la science conditionne de plus en plus sa vie, mais il ne peut s'approprier cette science. Il doit donc faire une confiance aveugle aux scientifiques. On reconstruit ainsi une relation de croyance superstitieuse, sem-

blable à celles mises en place par les religions et les pensées magiques.

Cette croyance se retrouve chez P. Caro à propos de la mémoire de l'eau : cela n'existe pas parce que les scientifiques n'en parlent pas! Les scientifiques décident donc de ce qui est réel et phon. Cette façon de penser, logiquement, conduit à l'absurde. Le constructivisme change cette conception de la science en distinguant les connaissances scientifiques et les connaissances scientifiques. L'un des paris du constructivisme est que cette démarche soit transmise au non spécialistes de la science.

J. M. ESPUNA, Montpellier

Réponse de Paul Caro

Les apôtres du constructivisme, comme le montrent les lettres ci-dessus, manient facilement le cliché émotionnel et le glissement affectif. Les questions posées par l'émergence des théories "constructivistes" sont difficiles à condenser dans les quelques lignes d'un *Point de vue*. Les stratégies de recherche du milieu scientifique, bien que souvent empiriques, reposent d'abord sur la reproductibilité, d'un laboratoire à l'autre, de toutes les observations, de tous les calculs. C'est ce consensus qui constitue le fait scientifique (et industriel) et qui constitue de fait la méthode scientifique. Il n'existe pas dans le cas de la «mémoire de l'eau». Pour des faits avérés, il y a bien sûr d'abondantes disputes sur les interprétations théoriques, qui souvent dépendent de l'esprit du temps. Celles-ci n'ont pas une grande importance : la science produit finalement des connaissances incarnées dans des produits, dans des machines, ou dans des armes qui, de tout temps, ont contribué à l'établissement des civilisations.

Naturellement les sciences humaines, qui n'agissent pas sur la matière, produisent des connaissances immatérielles, psychologiques, sociales, politiques, économiques, dont l'impact sur la société est considérable, et ceci d'autant plus que leur vocabulaire s'inscrit plus ou moins dans le cadre du langage ordinaire. Au sein de ces sciences humaines naissent aussi des interprétations abusives amorcées par le transfert de méthodes séduisantes issues des "sciences dures" auxquelles on prête soudain une valeur philosophique universelle que, par construction, elles n'ont pas.

Le problème est que cette image déformée convient parfaitement à ceux qui, pour des raisons politiques, sociales, philosophiques, attaquent aujourd'hui le système scientifique et industriel. La tolérance des opinions variées est une chose, mais, dans ce cadre, je crois qu'il est aussi permis aux chercheurs de dénoncer des descriptions inexactes de leur travail qui alimentent une

tentative de déstabilisation internationale. Elle peut conduire à de graves difficultés sociales, culturelles et politiques.

Mauvaises mines

Dans l'article de Gino Strada *L'horreur des mines antipersonnel* (voir *Pour la Science*, juillet 1996).

que des pays d'Europe occidentale font partie des zones où des milliers de personnes sont blessés par ces armes. Qu'en est-il exactement?

Georges BRAM, Orsay

Réponse de Jean-Baptiste Richardier, Handicap International

En Europe occidentale, le dernier conflit armé s'est achevé il y a plus de 50 ans. Pourtant, des mines et des munitions de cette époque continuent d'y faire des victimes : on a choisi de ne pas les éliminer totalement. En France, pour l'année 1991 seulement, 36 agriculteurs sont morts et 51 ont été blessés en passant avec leurs machines sur des munitions non explosées. Lors de la construction de la ligne de TGV Paris-Londres, les démineurs ont collecté environ cinq tonnes de bombes et autres explosifs, hérités de la bataille de la Somme. Ces quelques chiffres concernent un pays techniquement et économiquement développé, ils permettent à peine d'imaginer les conséquences, dans les prochaines décennies, de l'utilisation massive des mines antipersonnel.

Anagrammes

Jean-Louis Lemaire, dans son livre *Les Mots croisés et les anagrammes* (voir *Pour la Science*, mai 1996). Au-dessus de la porte d'une ancienne chapelle située non loin du château de Rochemaure, dans le département de l'Ardèche, est inscrit un vers en palindromes fait. Il s'agit d'un texte en français composé de 5 x 5 lettres lisibles dans les deux sens et signifiant à peu près «Le laboureur Arepon conduit avec soin sa charrue».

SATOR
AREPO
TENET
OPERA
ROTAS

Les logiciels décrits peuvent-ils en trouver d'autres, en français?

Edmond PEYRARD, Sauzet

JEU-CONCOURS

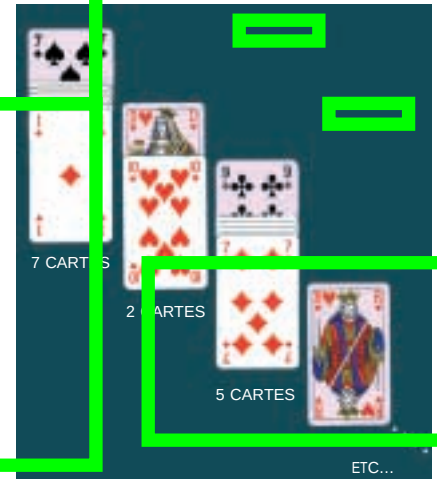
N°26

PIERRE TOUGNE

DÉCOMPTE DE CARTES

Prenez un jeu de 52 cartes faces visibles et distribuez-le en différents tas, faces visibles de la façon suivante : à partir de la valeur de la première carte (valet, dame, roi comptant respectivement pour 11, 12 et 13), formez un tas en comptant depuis cette valeur jusqu'à 13. Ainsi si la première carte est un sept, on formera un paquet de sept cartes ; si la première carte est une dame, un paquet de deux cartes, etc. Le premier paquet constitué, on continue selon le même procédé jusqu'à épuisement du jeu.

Deux cas peuvent se présenter : soit on épuise exactement le jeu, soit on n'a pas assez de cartes pour compléter le dernier paquet, auquel cas on conserve en main les cartes que l'on n'a pu distribuer. Maintenant, mélangez au hasard les trois tas que vous retournez faces cachées et ramassez les tas restants. Retournez la carte du dessus de deux tas quelconques. Comment deviner la valeur de la carte du dessus du troisième paquet à partir des deux cartes retournées et des cartes que vous avez en main ?



Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à **Pour la Science**, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'août 1996, nous enverrons au sort recevant le livre *Les échelles* de la **Collection Univers des Sciences**.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°24

Les réponses au Jeu-concours sur les sigles réinterprétés ont été parfois trop agressives pour ne pas être calomnieuses... Citons néanmoins quelques clins d'œil.

DTT : Dû très Toxique. **FN** : Français Nuisible (la rédaction attend le procès). **IRA** : Intransigeant Rebelle Anglophone. **LSD** : Les Sentiers Détournés. **OPA** : On Peut Aimer. **ONU** : On Nous Utilise. **RER** : Roule En Rolls! **IBM** : Inventa la Bonne Machine. **SDF** : Seul Dans la Foule. **TTC** : Toute Ta Chance. **SPA** : Si Peu Aimés. **RMI** : Retiens Mon Ire. **SARL** : Sans Aucun Rêve Ludique (ou Lubrique). **USA** : Union Sans Avenir. **CQFD** : Chaque Question Fait Doubter. **CGT** : C'est la Grève Totale. **CNRS** : Cherche Nobel Restant Sérieux ou Chercheur Novice Cherchant Situation ou Crânes Nourris de Rutilants Savoirs ou Compote Neuronale et Rata Synaptique. **SNCF** : Stabilisons Nos Coûts Faramineux. **ESA** : École Satellites Ariane. **URSS** : Union Repoussée Sans Suite. **CERN** : Chercheur Espérant Repérer des Neutrinos. **INRA** : Isolez Nous des Ruminants Anglais. **ADN** : À Déciffrer Naturellement. **VSOP** : Versez Sans Oublier Personne. **EPR** : Étrange et Paradoxe Relativité. Enfin pour les anglophones qui ne craindraient pas de prendre l'avion en Chine, la compagnie nationale **CAAC** (Civil Aviation Administration of China) devient : Chinese Aircraft Always Crash.

Dans les papilles

On découvre le fonctionnement des cellules qui perçoivent la saveur des aliments.

Il y a deux ans, Richard Axel et Linda Buck annonçaient la découverte des protéines qui, présentes dans la membrane des cellules du nez, captent les molécules odorantes et permettent l'olfaction. La nouvelle fit alors grand bruit ; néanmoins ceux qui s'intéressent à la saveur perçue par les papilles restèrent... sur leur faim : la biochimie de la gustation demeurait mystérieuse. Aujourd'hui Gwernolyn Wong, Kimberley Gannon et Robert Margolskee, à New York, présentent les résultats d'une étude de la gustducine, une protéine trouvée dans les cellules des papilles gustatives, clonée il y a quatre ans, mais dont la fonction dans la gustation était inconnue. En inhibant la synthèse de la gustducine dans des cellules gustatives de souris, les biochimistes ont observé que les animaux perdent leur aversion contre les saveurs amères et ce qui est plus étonnant, perdent aussi leur sensibilité aux molécules sucrées.

La gustation commence quand une molécule sapide se lie à des récepteurs ou à des canaux, dans la membrane d'une cellule sensorielle des papilles : à la suite d'une série de réactions, le potentiel électrique de la cellule est modifié et, quand la modification est suffisante, la cellule réceptrice excite des neurones de

proche en proche, convoient l'information jusqu'au cerveau.

Toutes les molécules sapes n'agissent pas de la même façon. Si les ions hydrogène (saveur acide) ou les ions sodium (saveur salée) agissent directement sur des canaux des membranes cellulaires modifiant immédiatement le potentiel électrique des cellules réceptrices, en ajoutant leur charge électrique à la charge totale de la cellule, les composés de saveur sucrée, amère ou autres (églisse, par exemple) se lient à des molécules nommées récepteurs (sans doute des protéines), placées dans la membrane des cellules réceptrices et en contact avec le milieu extracellulaire.

On suppose que ces récepteurs sont couplés à d'autres protéines déjà identifiées, les protéines G ; celles-ci déclenchent l'entrée de molécules nommées seconds messagers, qui agissent dans la cellule. Toutefois les récepteurs eux-mêmes n'ont pas été isolés, parce qu'ils ne se lient que faiblement aux molécules sapes. C'est un inconvénient pour l'analyse, mais un avantage gastronomique : si des molécules sapes se liaient trop fortement aux récepteurs, nous ne percevrions pas les successions trop rapides de saveurs.

En attendant la découverte des récep-

teurs, R. Margolskee et ses collègues se sont intéressés aux protéines G des papilles. À l'aide de la méthode d'amplification de gènes par l'enzyme polymérase, ils avaient multiplié les gènes des sous-unités alpha de plusieurs protéines G particulièrement abondantes dans les cellules réceptrices, s'intéressant tout particulièrement à la gustducine, qui est une de ces protéines G, exprimée seulement dans les cellules des papilles.

LE G ET LA PAPILLE

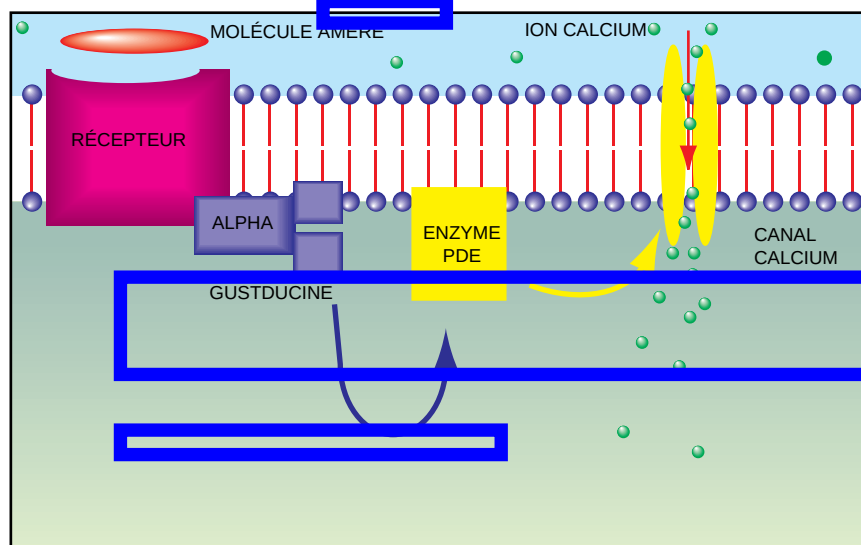
Ces études avaient confirmé des ressemblances entre la gustation et la vision : la gustducine ressemble aux transducines, des protéines G des cellules réceptrices de l'œil. Meux encore, les neurophysiologistes new-yorkais ont retrouvé la transducine des cônes et des bâtonnets dans les cellules réceptrices de la vision.

La ressemblance est éclairante : si les cellules des papilles fonctionnent comme celles de l'œil, la gustducine et la transducine activent une enzyme qui diminue la production d'AMP cyclique ; la raréfaction de ce «second messenger» modifierait alors les canaux ioniques et des enzymes, ou bien perturberait les échanges d'ions calcium entre l'intérieur et l'extérieur des cellules.

Afin de tester cette hypothèse, l'équipe new-yorkaise a inactivé le gène qui code la sous-unité alpha de la gustducine et a étudié le comportement de souris nées avec ce gène inhibé quand on leur proposait à boire des solutions diversement sapes ; simultanément les neurophysiologistes enregistraient les signaux électriques des nerfs de la corde du tympan, qui conduisent au cerveau les informations gustatives. Les réactions étaient normales, pour les saveurs salées ou acides, mais considérablement affaiblies pour les stimuli amers, tels ceux du sulfate de quinine ou du benzoate de dénatorium (deux composés amers), ainsi que du saccharose (le sucre de table) et d'un édulcorant synthétique normalement très intense.

Pourquoi la perception des sucrés et des amers n'était-elle pas complètement annihilée ? Les neurophysiologistes expliquent que la transducine n'était pas éliminée, et qu'elle participerait, avec la gustducine, à la perception de ces saveurs. La prochaine expérience consistera donc à inhiber les deux gènes de la transducine et de la gustducine.

Hervé THIS



La perception d'une saveur amère commence quand une molécule sapide se lie à un récepteur de la surface d'une cellule des papilles. Ce récepteur interagit avec des protéines G, telle la gustducine, qui modifie la différence de potentiel électrique entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule. Quand la stimulation est suffisante, la cellule émet un signal vers le cerveau.

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

Matériaux mous

On explore les bases microscopiques de l'adhésion et du frottement

Galilée eut le génie de comprendre que notre intuition du mouvement nous trompe : comme les objets qu'on lance finissent toujours par s'arrêter, on croyait, avant lui, que le mouvement résulte d'une force. Il comprit qu'il n'est que modifié par les forces ; la vitesse d'un corps sur lequel n'agit aucune force n'est pas nulle, mais constante. Les phénomènes de frottements, que Galilée a ainsi su séparer de celui de mouvement, sont restés, avec l'adhésion, l'un des Graal de la physique moderne.

Les nouveaux outils d'analyse donneront-ils les bases atomiques de ces phénomènes ? L'idée commence à couler. À l'École supérieure de physique et de chimie de Paris, Christian Frétiqny et Charlotte Masire utilisent un microscope à force atomique pour examiner les frottements et l'adhésion à une échelle presque atomique.

Ces nouveaux microscopes sont composés d'une pointe très fine (quelques atomes de diamètre à l'extrémité), que l'on déplace à la surface des échantillons ; la pointe permet de faire des expériences de «nanomécanique». Par exemple, les physiciens observent que la pointe, placée juste au-dessus de la surface d'un matériau polymère, s'enfonce sous l'action des forces d'adhésion : comme le mouvement constant des électrons autour des noyaux d'atomes engendre des dipôles électriques instantanés, des forces de van der Waals s'exercent entre les atomes de la pointe et les atomes de la surface. En mesurant la vitesse d'enfoncement, on détermine la viscosité et l'élasticité des matériaux testés... et l'on retrouve les valeurs obtenues par les mécaniciens, qui avaient observé qu'une

bille de verre posée sur une surface s'enfonçait spontanément.

En quoi la reproduction des expériences microscopiques est-elle alors utile ? Comme le microscope à force atomique explore de tout petits domaines, on peut choisir, à l'aide de sa fonction d'imagerie, un site particulier pour déterminer les réactions de matériaux bien définis. On analyse alors les diverses zones de matériaux hétérogènes, tels les composites. En outre, la nanomécanique explore les échantillons minces ou petits, dont les propriétés étaient inaccessibles par les méthodes macroscopiques. Enfin, en validant les résultats macroscopiques, on s'approche d'une interprétation des phénomènes à l'échelle atomique. La nanomécanique est ainsi une fenêtre ouverte sur l'adhésion.

CHARUE MICROSCOPIQUE

Elle éclaire également les phénomènes de frottement. La pointe enfoncée, on peut la ressortir brusquement, ou la déplacer latéralement afin de mesurer les forces que l'échantillon exerce sur cette «charue microscopique».

Dans le premier cas, on observe que la pointe laisse un sillon qui s'estompe progressivement. Les réactions sont variées : le caoutchouc «cicatrise» si rapidement que le microscope ne permet pas d'en suivre la déformation, mais d'autres polymères ne retrouvent leur forme qu'après plusieurs heures. La microscopie à force atomique ne donne pas encore les mouvements macroscopiques de la cicatrisation, mais elle révèle le phénomène.

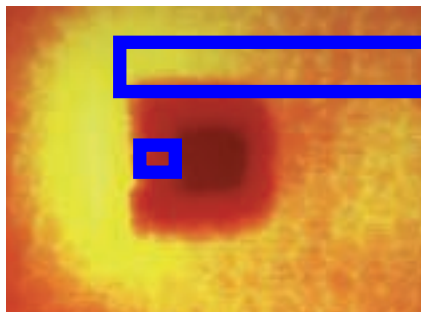
Avec l'équipe de Mathieu Joannicot et de Vincent Granier, au Centre de

recherche Rhône Poulenc, à Aubervilliers, les physiciens de l'E.S.P.C.I. ont caractérisé plus finement ces déformations. Ils ont notamment testé des films composés de microbilles de latex qui avaient été collées par l'évaporation du solvant où elles baignaient initialement ; dans le film finalement formé, chaque bille était une protubérance du film. La déformation du réseau de billes, lors du retrait de la pointe, a montré que l'échantillon ne glisse pas sous la pointe qui s'enfonce : chaque bille s'enfonce en restant à la verticale de sa position d'origine, contrairement à ce qu'on observe devant un bateau. L'absence de glissement, dans le film de latex, résulte de la forte adhérence de la pointe et du matériau.

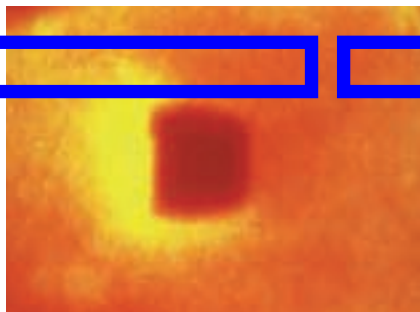
Dans le second cas, un balayage de peu d'amplitude donne accès aux forces de frottement statique, telles celles qui s'exercent sur un caillou qui ne glisse pas, sur une pente peu inclinée. Ces forces sont accessibles si le balayage est lent. En effet, les polymères que la pointe labour se déforment, parce que les longues molécules dont ils sont constitués se déplacent, devant la pointe ; or ces déplacements dépendent de la rapidité de la sollicitation. L'effet est le même que lorsqu'on tire un spaghetti d'une assiette pleine ; si l'on tire lentement, seul le spaghetti sollicité est extrait ; en revanche, une traction rapide fait venir tout le plat.

Avec un balayage rapide de la pointe, d'autre part, on mesure le coefficient de frottement dynamique, qui prévaut quand un corps posé sur un plan incliné se met à glisser. Là encore, la méthode microscopique est sur les études de mécanique classique. L'avantage qu'elle évite les effets, normalement inévitables, de la rugosité : à l'échelle microscopique, les surfaces qui frottent l'une contre l'autre (celle de la pointe et celle du matériau), ont une forme bien définie.

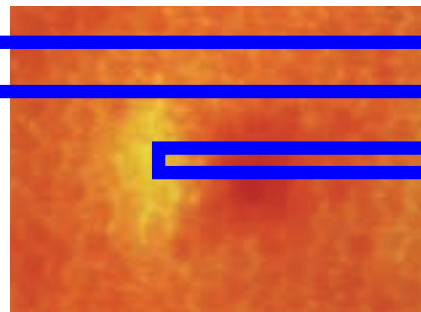
La nanomécanique de surface éclaire ainsi le comportement des matériaux mous, notoirement difficiles à étudier. Elle jette également un pont entre les phénomènes d'adhésion et de frottement. □



La déformation d'un film polymère mou où l'on enfonce une pointe microscopique. Une fois la pointe retirée, le matériau cicatrise pro-



gressivement. À partir de cette cicatrisation, on étudie les propriétés visqueuses et élastiques du matériau.



Un soja bien mal squatterisé

L'introduction d'un nouveau gène dans le soja entraîne des allergies.

Le mal est l'ennemi du bien : maxime éternelle. La manipulation du soja avec un gène de la noix du Brésil prouve les dangers des améliorations forcées : des allergènes ont accompagné le gène transféré au soja pour enrichir ses qualités nutritives, avec les inconvénients que l'on devine.

Pour nourrir les animaux, on utilise surtout des végétaux riches en protéines, notamment le pois sec et le soja. Les techniques de sélection classiques par hybridation ont déjà amélioré les rendements ou la qualité des plants, mais les tourteaux de soja, constitués de résidus obtenus après chauffage et pressage des graines, restent pauvres en méthionine, un acide aminé soufré, indispensable à une bonne nourriture animale. L'addition de méthionine en poudre étant très onéreuse, les chercheurs travaillant pour la firme américaine d'agro-alimentaire *Pioneer Hi-Bred International* ont voulu pallier cette déficience en transférant au soja le gène d'une protéine de la noix du Brésil, protéine dite 2s car riche en deux acides aminés soufrés : la méthionine et la cystéine.

Comme tout matériel originaire de la famille des noix (noix ordinaires, noix de cajou, noisettes et cacahuètes...), la noix du Brésil est très allergisante. Or le soja «complété» a également intégré le gène inopportun d'un allergène de la noix du Brésil.

Les chercheurs ont identifié que la protéine 2s était l'allergène le plus actif, ou majeur, de la noix du Brésil. D'autre part, des tests sérologiques et de réactivité cutanée ont montré que les personnes sensibles aux extraits de noix du Brésil réagissaient aussi aux extraits de soja transgénique, alors qu'elles restaient insensibles au soja normal.

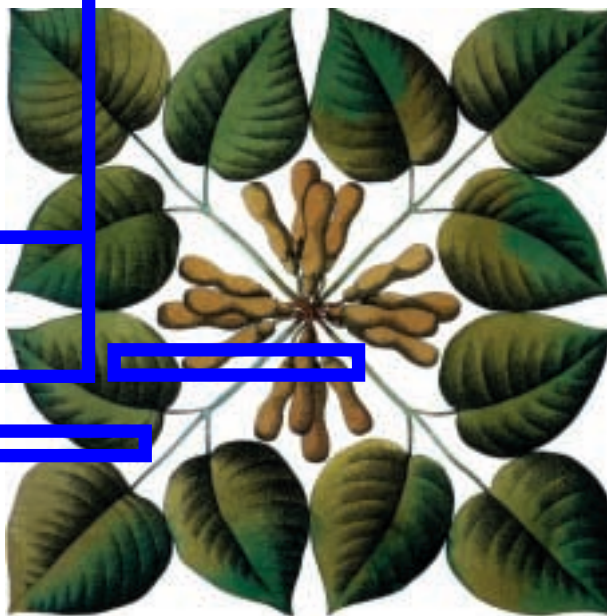
Bien que ce soja manipulé ne soit destiné qu'à la seule alimentation animale, *Pioneer Hi-Bred International* a décidé de ne pas l'exploiter. Les jeunes

animaux, porcelets ou veaux, pourraient en effet reconnaître les mêmes allergènes que les humains : la proportion de ceux qui développent une allergie après le sevrage est environ deux pour cent, comme chez les enfants ! Il est vraisemblable que ce qui ne convient pas aux uns, ne conviendrait pas d'avantage aux autres.

ALLERGIES INDUITES PAR DES PRODUITS EXOTIQUES

De nombreux travaux éludent les «mystères» des allergies. Chaque individu est génétiquement prédisposé à répondre à certaines molécules, pourvu qu'il les rencontre. C'est ainsi qu'aujourd'hui

des produits exotiques, tels les kiwis, encore inconnus dans nos contrées il y a une vingtaine d'années, induisent parfois des réactions allergiques. D'autres allergies «émergent» aussi à la suite de modifications des habitudes alimentaires : ainsi en est-il de la fréquence des allergies au pois chiche, en augmentation depuis que cet aliment est plus fréquent dans nos assiettes.



Graines de soja stylisées.

À l'Institut Pasteur, l'équipe de G. Peltre établit un répertoire des allergènes provenant de plantes ou d'aliments d'origines diverses. Ces chercheurs ont ainsi observé que de nombreuses allergies alimentaires proviennent de fruits secs et de graines, et que l'arachide occupe la deuxième position derrière la farine de blé. Il est d'ailleurs étonnant de constater que la proportion de réactions – parfois très graves – à l'arachide a doublé en France au cours des dix dernières années.

Non déplaît aux végétariens, le soja, comme beaucoup de plantes, est lui aussi allergisant, mais il existe des variétés dites hypoallergéniques vis-à-vis desquelles la réactivité est moindre. Deux allergènes majeurs ont été reconnus, mais la fonction d'un seul a été identifiée : il s'agit d'un inhibiteur de protéase empêchant la dégradation des protéines de la viande. Peut-être pourrait-on envisager, suggère G. Peltre, de «raccourcir» le gène concerné pour tenter de supprimer l'effet allergène sans inhiber la fonction de cette molécule et améliorer ainsi la qualité nutritive du soja (en réservant la transgénèse pour une étape ultérieure). Toutefois, du même coup, en manipulant le génome du soja, court-on le risque de démasquer un nouvel allergène ?

À la technique d'insertion d'un gène nouveau, les chercheurs préfèrent souvent celle qui consiste à «tuer» l'allergène dans l'œuf. En intervenant directement sur le génome, ils tentent d'éliminer un gène ciblé ou de supprimer son expression. Au Japon, une équipe est parvenue à obtenir un riz transgénique dépourvu d'allergène majeur, tandis qu'un autre groupe est intervenu, sur un gène différent du précédent, pour améliorer la qualité d'un riz destiné au saké.

Les généticiens agro-nomes tendent à utiliser des plantes «donneuses» dont l'allergénicité n'est pas reconnue – ce qui, inversement, présente l'inconvénient de rendre le dépistage plus difficile. Il est d'autant plus surprenant d'avoir choisi la noix du Brésil comme donneuse car outre le soja, le gène de la protéine 2s a déjà été introduit dans plusieurs autres plantes : tabac, colza, haricot... Comme le préconisent le Parlement et le Conseil Européen, il ne paraît pas superflu d'envisager un étiquetage des produits issus de plantes génétiquement transformées.

Marie-Thérèse LANDOUSY

Vent solaire

L'hémisphère Sud du Soleil émet plus de particules que l'hémisphère Nord.

Le Soleil émet un vent de particules, principalement des protons, à une vitesse comprise entre 400 et 800 kilomètres par seconde. Deux jours après leur émission, ces protons arrivent près de la Terre et suivent les lignes de champ magnétique terrestre. Les émissions radio que ces particules produisent perturbent les communications radio terrestres.

Comment le vent solaire se forme-t-il ? Les astrophysiciens n'ont pas encore la réponse mais la détection des rayonnements ultraviolets émis par l'espace autour du Soleil révèle que l'hémisphère Sud du Soleil et son équateur émettent plus de protons que l'hémisphère Nord.

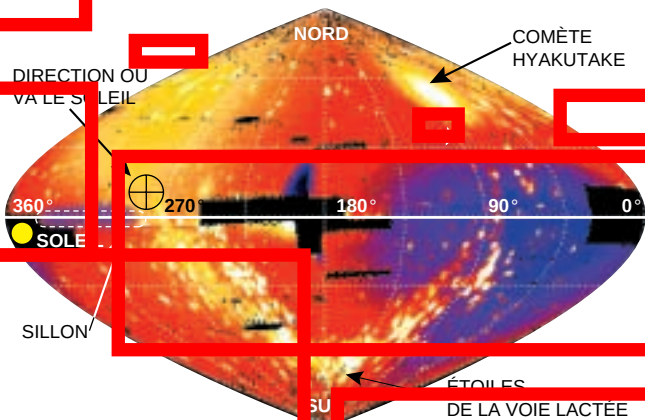
En décembre 1994, une sonde spatiale, *Ulysse*, avait quitté le plan de l'écliptique (le plan de l'orbite de la Terre) et mesuré au-dessus, puis au-dessous de ce plan, une différence d'intensité du vent solaire. Cette différence était-elle un phénomène local et transitoire ou s'agissait-il d'une caractéristique du vent solaire ? Pour le savoir sans déployer une flottille de sondes tout autour du Soleil, les astrophysiciens ont imaginé une méthode indirecte : mesurer la lumière émise par des atomes d'hydrogène présents dans le milieu où se déplace le Soleil.

En effet, dans sa course autour du centre de notre Galaxie en 120 millions d'années, le Soleil traverse des nuages d'hydrogène à une vitesse de quelques dizaines de kilomètres par seconde. Les protons du vent solaire arrachent leur électron à ces atomes, qui sont ainsi ionisés. Tel un navire, le Soleil, qui pénètre le nuage d'hydrogène, laisse derrière lui un sillage où la densité d'hydrogène neutre est inférieure (plus la couleur est claire plus l'hydrogène est abondant, ici on n'a indiqué que les densités dans le plan de l'écliptique). L'instrument SWAN de la sonde SOHO produit des cartes en observant dans toutes les directions les atomes d'hydrogène éclairés par le Soleil. Sur la ligne de visée correspondant à 90°, la faible densité d'hydrogène neutre produira une luminosité plus faible que sur la ligne de visée correspondant à 270°, où l'hydrogène neutre est abondant.

drogène en émettant un rayonnement destructeur, laisse derrière lui un sillage où l'hydrogène neutre est raréfié.

Simultanément, la lumière du Soleil excite les atomes d'hydrogène neutre, qui, en se désexcitant, émettent des rayonnements ultraviolets à la longueur d'onde de 121,6 nanomètres (millardième de mètre), la raie Lyman- α de l'hydrogène. Les détecteurs de l'instrument SWAN, réalisés au Service d'aéronomie du CNRS, à Verrières-le-Buisson, sont sensibles à cette raie, non observable du sol de la Terre (ces ultraviolets sont arrêtés par l'atmosphère). Les cartes du ciel à la longueur d'onde de cette raie révèlent les zones qui contiennent le moins d'hydrogène neutre : ce sont les moins brillantes.

Dans la région du ciel où se dirige le Soleil, on note une première anisotropie : la moitié située au Sud de l'écliptique est moins lumineuse que la moitié située au Nord, indication que le vent

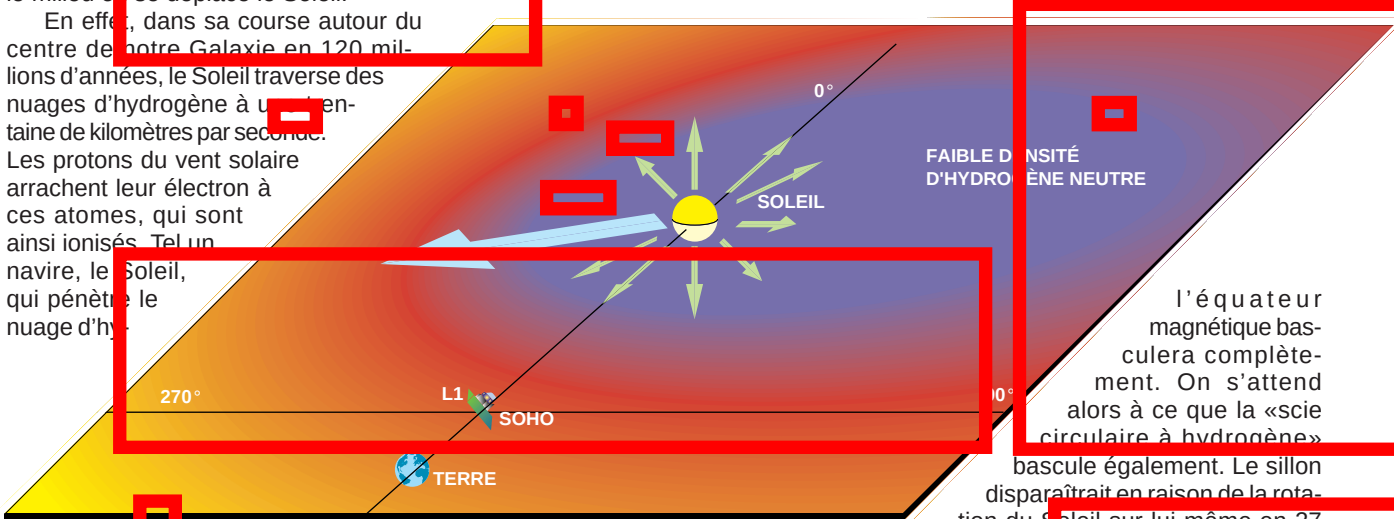


Cette carte indique l'intensité des rayonnements ultraviolets captés autour de la sonde SOHO, le 28 mars 1996. La couleur jaune représente les fortes intensités, la couleur violette les faibles intensités. La lumière diffuse provient d'atomes d'hydrogène éclairés par le Soleil. La partie Nord de la carte, plus lumineuse que la partie Sud, prouve que l'hémisphère Sud du Soleil émet plus de vent solaire que l'hémisphère Nord ; un sillon sombre le long de l'écliptique (ligne blanche) montre que l'équateur solaire est particulièrement actif.

solaire est plus ionisé d'hydrogène au Sud qu'au Nord. On retrouve ainsi les observations de la sonde *Ulysse*. De surcroît, on détecte, dans le plan de l'écliptique, une étroite bande sombre qui montre que l'équateur solaire, actuellement loin de l'écliptique, émet beaucoup de particules chargées, une sorte de scie circulaire qui détruit l'hydrogène dans le plan de son équateur.

LES ZONES ACTIVES DU SOLEIL

L'intérêt de cette cartographie sera accru par la surveillance permanente du Soleil par le passage de son état actuel de minimum d'activité, à son état de maximum d'activité dans cinq ans, tandis que



Le Système solaire se déplace (flèche bleue) dans un nuage d'atomes d'hydrogène. Les protons du vent solaire (flèches vertes) ionisent cet hydrogène, le Soleil laisse derrière lui un sillage où la densité d'hydrogène neutre est inférieure (plus la couleur est claire plus l'hydrogène est abondant, ici on n'a indiqué que les densités dans le plan de l'écliptique). L'instrument SWAN de la sonde SOHO produit des cartes en observant dans toutes les directions les atomes d'hydrogène éclairés par le Soleil. Sur la ligne de visée correspondant à 90°, la faible densité d'hydrogène neutre produira une luminosité plus faible que sur la ligne de visée correspondant à 270°, où l'hydrogène neutre est abondant.

l'équateur magnétique basculera complètement. On s'attend alors à ce que la « scie circulaire à hydrogène » bascule également. Le sillon disparaîtrait en raison de la rotation du Soleil sur lui-même en 27 jours. D'autre part, les mesures des flux du vent solaire par l'instrument SWAN, loin de l'écliptique, donneront des données utiles pour les simulations de production du vent solaire, utilisées pour comprendre comment la couronne solaire accélère ces particules. □

Parfum antique

Dans l'Antiquité, les parfumeurs utilisaient l'huile d'olive pour fixer les parfums.

Dans l'*Odyssée*, Ulysse s'enduit d'huile parfumée apportée par Naïssicaa. Aujourd'hui, l'alcool est la base des parfums, mais, les anciens, qui ne l'avaient pas découvert, utilisaient les corps gras pour fixer les arômes. Ils employaient des huiles de ben (une sorte de noix), de sésame, de raifort, d'amandes et surtout l'huile d'olive, aisée à produire en grande quantité. Des vestiges archéologiques de la ville de Paestum, récemment mis au jour en Campanie et que l'on pensait être des pressoirs agricoles, sont des pressoirs à huile pour les parfums.

Dans l'Antiquité, le parfum joue un rôle important dans la vie religieuse, les funérailles et la vie profane. Aux III^e et II^e millénaires, les parfumeurs travaillent dans les palais et les temples mésopotamiens, égyptiens ou crétois pour les besoins du culte et de la cour. Le parfum est alors un produit aristocratique et il faut attendre le VII^e siècle avant notre ère pour qu'il fasse l'objet d'un commerce de masse, notamment à partir de Corinthe. À l'époque hellénistique, puis romaine, le parfum se démocratise en même temps que la fréquentation des thermes et des palestres (la partie du gymnase où se pratiquait l'exercice physique). Pour augmenter la production de parfum, les architectes conçoivent des installations fixes qui laissent des vestiges archéologiques

identifiables, mais rares. Hormis quelques moulins, presses et mortiers mis au jour près de Jérusalem et sur l'île de Délos, en Grèce, seuls des représentations picturales et des textes attestent cette activité.

Dès le III^e siècle avant notre ère, la région de Campanie est réputée pour la fabrication des parfums. Capoue, au Nord de Naples, est le grand centre de production : les *seplasiarii*, parfumeurs, tiraient leur nom d'une célèbre place de la ville. Tous les ingrédients sont disponibles : l'huile d'olive de Vénafre, excellente pour les parfums, les fleurs de Campanie en particulier la rose, l'iris et la violette et les épices d'Orient que l'on débarque au port de Pouzzoles. Durant tout l'Empire romain, la Campanie est l'une des plus célèbres régions de fabrication des parfums, notamment le parfum de rose.

Sur plusieurs peintures de Pompéi et d'Herculanum, des Amours détaillent la préparation des parfums : extraction de l'huile d'olive qui servira d'excipient au moyen d'un pressoir à coins, chauffage de l'huile et des substances aromatiques pour dissoudre les huiles essentielles de fleurs, addition de colorants, de résines, de fixateurs dans un mortier, vente de parfum à des clientes. À Pompéi même, des inscriptions mentionnent des parfumeurs et l'on a retrouvé la base d'une presse qui aurait servi à extraire de l'huile pour parfum.

UNE PARFUMERIE ROMAINE

En octobre 1995, des fouilles ont mis au jour les traces de cet artisanat dans la ville de Paestum au Sud de la Campanie. *Poseidonia* est fondée par les Grecs de Sybaris 600 ans avant notre ère. Trois siècles plus tard, au cours de la guerre entre Pyrrhus et Rome, *Poseidonia* est prise par les Romains et transformée en colonie sous le nom de Paestum (273 avant notre ère). Elle est alors dotée d'une vaste place centrale entourée de boutiques, le forum. Dans l'angle Nord-Ouest du forum, les fouilles ont dégagé une échoppe contenant un mortier en basalte, un bloc de marbre blanc élégamment taillé et pourvu d'une rigole ainsi que les pierres de calage de poteaux verticaux.

Ces vestiges sont interprétés comme les restes d'un pressoir à coins, analogue à ceux représentés sur les peintures de Pompéi et d'Herculanum. Le pressoir a été installé au cours du I^{er} siècle avant notre ère et a dû être utilisé jusqu'au I^{er} siècle. La présence d'un tel instrument agricole est incongrue sur la place principale de la cité, sauf s'il s'agit d'une presse servant dans une parfumerie et symbolisant son activité. Or, la région de Paestum était réputée à la fin de la République et au début de l'Empire romain pour ses roses. Les poètes Virgile, Ovide, Propertius et Martial évoquent leur parfum et l'éternel des roseraies. Dans les *Géorgiques*, Virgile écrit : «*Peut-être chanterais-je l'art de fertiliser et d'orner les jardins, ainsi que les roseraies de Paestum qui fleurissent deux fois l'an*». On peut donc penser que l'on a trouvé les vestiges d'une parfumerie qui produisait à grande échelle du parfum de rose, une spécialité exportée dans tout le bassin méditerranéen, notamment en Égypte.

Jean-Pierre BRUN,
CNRS, Centre C. Jullian, Aix-en-Provence



Sur cette peinture découverte à Pompéi, des Amours préparent les parfums. Les personnages de droite extraient l'huile d'olive au moyen d'un pressoir à coins, tandis qu'à gauche, un Amour dissout les essences aromatiques dans de l'huile chauffée.



Ce bloc de marbre blanc, mis au jour dans une échoppe de la ville de Paestum, en Italie, appartient à un pressoir à l'aide duquel, entre le I^{er} et le IV^e siècle de notre ère, on fabriquait de l'huile d'olive qui entrait dans la composition du parfum de rose.

Protection invisible

Anatomie des couches superficielles qui protègent les objets métalliques.

Les métaux sont instables : à l'air, il s'oxyde. On méconnaît le progrès considérable que fut la mise au point de métaux et d'alliages inoxydables, quand les métallurgistes comprirent que des couches d'oxydes protectrices se formaient à la surface de certains métaux ou alliages. Aujourd'hui les techniques d'analyse chimique des surfaces, au niveau atomique, explorent ces couches et permettent une maîtrise de leur formation.

La corrosion des métaux correspond à leur réaction chimique avec les composés de l'air ou de l'eau qui les entourent, formant des oxydes métalliques de surface. Si certains métaux et alliages sont apparemment protégés, c'est parce que les minces couches d'oxydes qui se forment à leur surface — les couches passives — ont une structure qui bloque la diffusion ultérieure de l'oxygène de l'eau et du métal, ralentissant l'oxydation des couches plus profondes. On connaît ainsi la passivation du fer trempé dans l'acide nitrique fumant, ou la passivation spontanée de l'aluminium dans l'air. Les couches passives ont une épaisseur de quelques nanomètres, ou milliardièmes de mètre ; elles sont invisibles à l'œil nu et si minces que la surface conserve l'éclat du métal.

Ainsi les feuilles d'aluminium que

l'on utilise en cuisine ont l'aspect brillant du métal, bien qu'elles soient recouvertes par une couche d'un ou deux nanomètres d'oxyde d'aluminium, ce qui leur garantit une exceptionnelle durée de vie. Toutefois, cette couche gêne l'industrie aéronautique, qui souhaiterait coller des pièces d'aluminium : pour obtenir des assemblages robustes, elle doit apprendre à maîtriser les couches d'oxydes qui recouvrent le métal de façon invisible. De même, les dentistes ne peuvent utiliser que des alliages dentaires qui résistent au milieu corrosif qui les baigne sans relâcher dans la bouche des métaux toxiques.

LES PREMIÈRES COUCHES

Familiales, omniprésentes, utiles ou gênantes, ces couches d'oxydes sont dignes d'intérêt. Au Laboratoire de physico-chimie des surfaces de l'École nationale supérieure de chimie de Paris, nous les avons explorées par les techniques modernes d'analyse des surfaces : la

mesure de l'énergie des électrons émis par des échantillons soumis à l'irradiation par des rayons X.

Les couches d'oxydes croissent jusqu'à ce qu'elles atteignent une épaisseur stationnaire de l'ordre de un ou deux nanomètres (quelques couches d'atomes) pour des métaux tels que le nickel ou le chrome dans de l'eau acidifiée. La quantité d'atomes qui forment la couche passive est infime, par unité de surface, mais la protection est efficace : la vitesse de corrosion des surfaces passivées est réduite à moins d'un centième de millimètre par an, au lieu de plusieurs millimètres.

Les liaisons chimiques entre atomes d'oxygène et atomes de métal modifient les énergies des électrons des atomes métalliques : comme ces liaisons chimiques participent à l'émission d'électrons, lors de l'irradiation par les rayons X, on identifie la nature des éléments chimiques présents dans la couche superficielle en mesurant l'énergie des électrons émis. L'épaisseur analysée étant environ égale à trois fois le libre parcours moyen des électrons dans le solide, cette méthode détecte la structure des premiers plans d'atomes sous la couche mince d'oxyde.

Les études ont révélé l'existence d'une stratification de ces couches : une couche interne d'oxyde, au contact du métal, est recouverte d'une couche d'hydroxyde, du côté exposé aux solutions aqueuses où les métaux sont plongés. Le principe de cette structure bicouche est assez général : son existence a été retrouvée sur le nickel, sur le chrome, sur les alliages fer-chrome (aciers inoxydables ferritiques), sur les alliages fer-nickel-chrome (aciers inoxydables austénitiques) et sur les alliages inoxydables à base de nickel. Dans le cas des alliages,

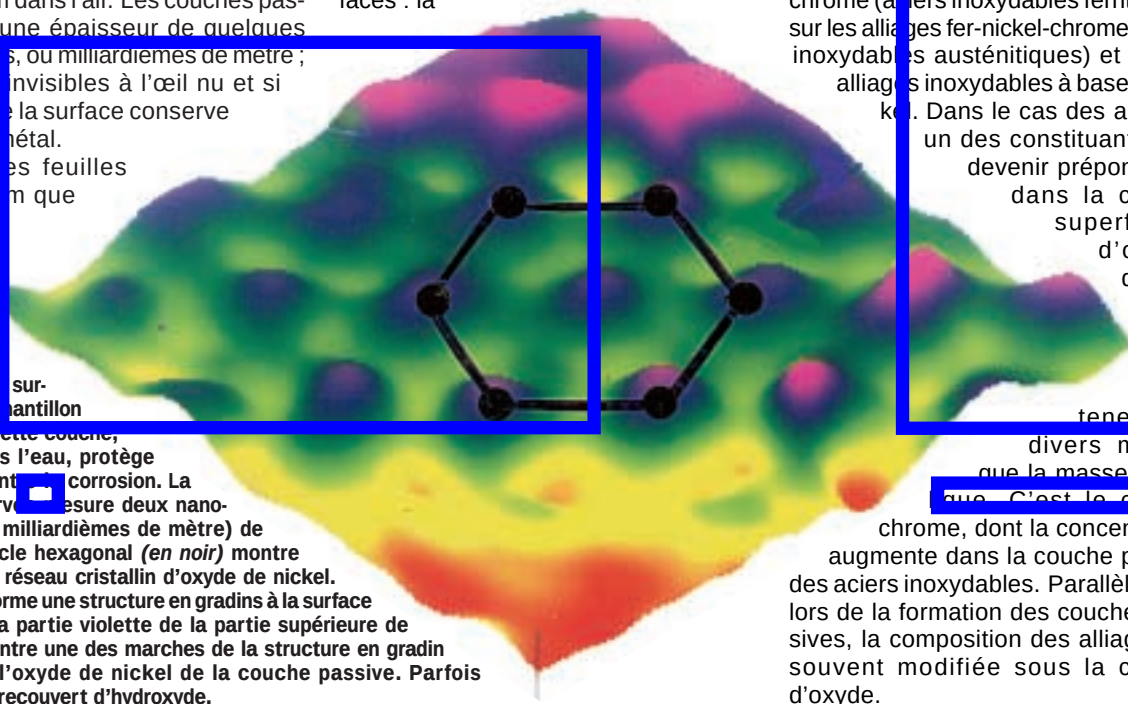
un des constituants peut devenir prépondérant dans la couche superficielle d'oxyde, qui n'a alors plus la même teneur en

divers métaux que la masse métallique. C'est le cas du

chrome, dont la concentration augmente dans la couche passive des aciers inoxydables. Parallèlement, lors de la formation des couches passives, la composition des alliages est souvent modifiée sous la couche d'oxyde.

Couche passive d'oxyde à la surface d'un échantillon de nickel. Cette couche,

formée dans l'eau, protège le métal contre la corrosion. La plage observée mesure deux nanomètres (ou milliardièmes de mètre) de côté. Le cycle hexagonal (en noir) montre un motif du réseau cristallin d'oxyde de nickel. Cet oxyde forme une structure en gradins à la surface du métal. La partie violette de la partie supérieure de l'image montre une des marches de la structure en gradin que forme l'oxyde de nickel de la couche passive. Parfois l'oxyde est recouvert d'hydroxyde.



On pensait que les couches passives, en raison de leur extrême minceur, devaient être amorphes, sans ordre atomique à grande distance. Toutefois les études les plus récentes ont montré que les films peuvent être cristallisés. Ainsi les observations au microscope à effet tunnel, où l'on balaye la surface des échantillons avec une pointe très petite, qui échange des électrons avec l'échantillon par l'effet tunnel, ont apporté des informations essentielles sur la croissance des couches d'oxydes sur des substrats monocristallins.

CRISTAUX PROTECTEURS

La figure, par exemple, est celle de la structure atomique de la couche passive formée sur une électrode de nickel monocristallin. La périodicité observée indique que cette couche était le plan cristallographique le plus compact de l'oxyde de nickel. Dans de telles images, on observe des défauts structuraux : marches monoatomiques, crans, lacunes, et joints... La croissance de l'oxyde s'effectue selon une direction inclinée de huit degrés par rapport au plan cristallographique, ce qui conduit à un système de terrasses et de marches, et à l'existence de fluctuations de l'épaisseur du film. Ce type de croissance minimise les contraintes entre les réseaux de l'oxyde et du métal.

Ce cas n'est pas général. Pour le chrome, par exemple, la couche passive n'est pas constituée de grands cristaux, comme dans le nickel : les très nombreux «nanocristaux» formés sont reliés par de l'hydroxyde de chrome, qui forme un liant, minimisant les défauts interfaciaux qui pourraient affaiblir la couche protectrice. Cette structure nanocristalline est sans doute la clef des propriétés exceptionnelles du chrome, connu pour son excellente résistance à la corrosion et utilisé, à ce titre, comme additif dans de nombreux alliages.

Comment l'industrie métallurgique utilisera-t-elle ces analyses ? Un succès a été obtenu dans le cas des aciers inoxydables fer-nickel : la couche passive qui se forme quand ces alliages sont plongés dans un milieu qui contient des ions chlorures (l'eau de mer, par exemple) est de qualité bien inférieure à celle qui apparaît quand les mêmes alliages sont d'abord placés en milieu oxydant contrôlé, c'est-à-dire au contact de l'air ou de l'eau. On peut aussi faire vieillir les aciers ou alliages inoxydables dans ces milieux, ce qui augmente la concentration en ions chrome dans les couches passives, avant de les employer en milieu chloruré.

Philippe MARCUS
CNRS, École nationale supérieure
de chimie de Paris

La caulerpe

Cette algue aurait des effets bénéfiques, en assainissant les fonds de la Méditerranée.

Aurait-on trop vite décrié *Caulerpa taxifolia* ? Depuis quelques années cette algue unicellulaire géante colonise le littoral Nord-Ouest de la Méditerranée et de l'Adriatique, où elle prolifère par endroits, au détriment d'autres espèces végétales. D'après les résultats d'une étude publiée dans la revue *Nature* par les chercheurs de l'Observatoire océanologique européen, cette algue serait un agent antipollution.

À la différence des autres algues, la caulerpe a des rhizoïdes, l'équivalent des racines des plantes supérieures. Ces rhizoïdes soutirent des substances nutritives aux fonds marins et l'algue prospère indépendamment des nutriments dissous dans l'eau de mer.

La surface des rhizoïdes est couverte de bactéries, et d'autres prolifèrent dans son volume interne. Certaines ressemblent aux bactéries symbiotiques qui assurent la fixation de l'azote dans les légumineuses (la luzerne, le haricot, par exemple). Jean Jaubert et ses collègues de l'Institut océanographique de Monaco ont observé que les pseudo-racines de la caulerpe absorbent du phosphore minéral et des composés organiques, notamment de l'azote et du carbone, et des acides aminés dissous. Ces substances, abondantes dans les zones où prolifère l'algue, proviennent des rejets industriels ou domestiques ; elles s'accumulent dans

les sédiments et dans certaines roches poreuses. Cette faculté d'assimiler des substances nutritives inutilisées par les autres algues expliquerait l'abondance de la caulerpe et la disparition d'une grande partie de la flore, devenue inadaptée. *Caulerpa taxifolia* comblerait les vides laissés par d'autres végétaux éliminés ou fragilisés par la pollution, tels les herbiers de posidonies.

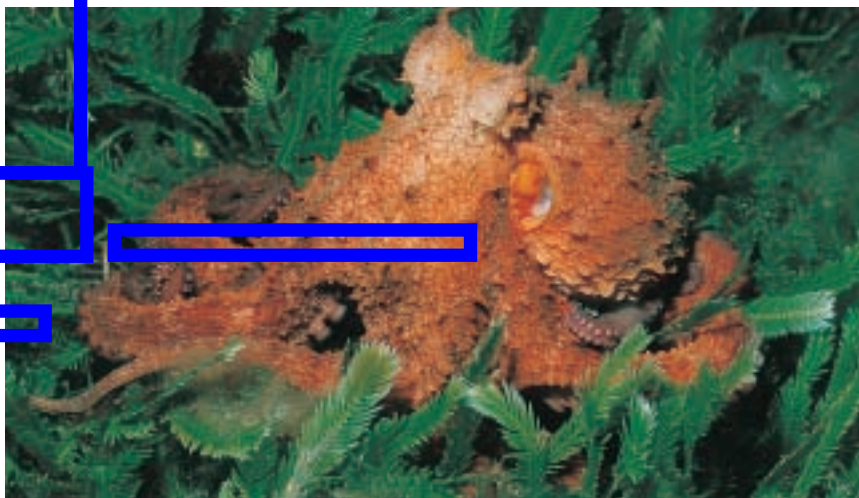
Pourquoi cette algue prolifère-t-elle aujourd'hui ? Les algues du genre *Caulerpa* prospèrent dans les eaux chaudes habitées par des coraux et pauvres en nutriments : leurs rhizoïdes et leur structure unicellulaire les avantagent par rapport aux autres algues car ils facilitent les échanges nutritifs. Plusieurs espèces de caulerpes, dont *Caulerpa taxifolia*, vivent dans la mer Rouge et ont sans doute migré vers la Méditerranée occidentale par le détroit de Suez. Le réchauffement climatique accélérerait leur expansion.

Ce n'est pas la première incursion des caulerpes dans le bassin méditerranéen : avant la crise climatique de la fin du Miocène, il y a sept millions d'années, elles faisaient partie de la flore commune et y prospéraient.

Comme de nombreuses plantes aquatiques, les caulerpes produisent des toxines, notamment la caulerpénine, à laquelle la faune ne semble pas sensible. Le nombre et les espèces de poissons vivant dans les prairies de caulerpes n'ont guère varié : ils ne les «broutent» pas, mais se nourrissent des produits de leur dégradation.

Ainsi, grâce à leur aptitude à se développer sur des substrats imprégnés de matières organiques en décomposition, qui ne conviennent pas aux autres végétaux, les caulerpes assainiraient les fonds méditerranéens.

Marie-Thérèse LANDOUSY



Poulpe vivant au milieu de caulerpes.

Superphénix demain ?

Le surrégénérateur devenu réacteur de recherche devrait étudier l'élimination des déchets.

Dans les années 1970, la construction d'un surrégénérateur, *Superphénix*, a été lancée sur le site de Creys-Malville, dans l'Isère. En 1994, après huit ans d'un fonctionnement ponctué d'incidents et d'arrêts, le gouvernement français en a autorisé le redémarrage dans un but exclusif de recherche. Une commission d'experts a examiné les objectifs proposés : outre une attention soutenue à la sécurité, elle préconise l'étude prioritaire de la destruction des déchets que sont les actinides mineurs (américium, neptunium, curium).

Lorsque la décision de construire le surrégénérateur *Superphénix* a été prise, ses promoteurs pensaient qu'il serait le premier d'une longue série. Les surrégénérateurs, ou réacteurs à neutrons rapides, auraient remplacé terme les centrales nucléaires à eau pressurisée, qui constituent le parc français actuel. L'État français (et *Électricité de France*) souhaitait qu'à moyen terme la production d'énergie électrique soit indépendante du pétrole, dont l'approvisionnement et les cours semblaient incertains. En outre, les économistes prévoyaient une telle augmentation de la consommation d'énergie que les centrales nucléaires à eau pressurisée seraient vite insuffisantes, et que l'uranium qu'elles utilisaient deviendrait, pensait-on, comme le pétrole à l'époque, une ressource rare.

Avec des surrégénérateurs, la source d'énergie paraissait quasi inépuisable. Dans *Superphénix*, l'énergie est produite par la fission du plutonium 239, et non d'uranium 235. On introduit en outre de l'uranium 238, l'isotope le plus abondant, non fissile dans le cœur du réacteur où il est transformé en plutonium : le surrégénérateur produit plus de plutonium qu'il n'en consomme. Du plutonium était disponible pour démarrer le cycle : c'est un déchet produit par les centrales à eau pressurisée.

Une vingtaine d'années plus tard, le constat s'impose : les surrégénérateurs ne remplaceront pas de sitôt les autres types de centrales. Les experts les plus optimistes fixent au milieu du siècle prochain la construction en série de ces nouveaux réacteurs. La consommation d'énergie a en effet augmenté moins vite que prévu. En France, le programme de construction de centrales nucléaires a même été ralenti. Le traitement du plutonium est complexe et coûteux : son utilisation ne deviendrait rentable que si les cours des autres matières premières augmentaient considérablement. Comme les réserves de pétrole et de gaz naturel ont été réévaluées à la hausse et que les cours restent bas depuis 1990, les autres sources d'énergie ne se sont pas taries. L'uranium est aussi abondant et bon marché.

En outre, les ingénieurs ne maîtrisent pas encore la technique nécessaire pour faire fonctionner un surrégénérateur tel que *Superphénix* : depuis l'obtention de la pleine puissance en décembre 1986, l'installation a été arrêtée pendant une durée cumulée de plus de six ans, pour des incidents mettant en cause la sécurité. L'utilisation de sodium liquide, qui réagit violemment avec l'air et l'eau, comme fluide caloporteur, est à l'origine de la plupart des difficultés rencontrées.

LE PROGRAMME DE RECHERCHE

En juillet 1994, *Superphénix* n'a obtenu l'autorisation de redémarrer que pour réaliser un programme de recherche. Celui-ci comprend trois objectifs : démontrer la capacité d'un réacteur à neutrons rapides à produire de l'électricité à un niveau industriel, évaluer le fonctionnement de ce type de réacteur en situation de sous-génération, où consomme du plutonium, et étudier ses possibilités de destruction des déchets de grande durée de vie.

Le gouvernement a nommé, en octobre 1995, une commission scientifique, présidée par Raimond Castaing, pour évaluer la crédibilité de ce programme de recherche. Elle a rendu son rapport en juin 1996. Celui-ci insiste sur l'importance de la recherche fondamentale : les études réalisées avec *Superphénix* auraient pour objectif l'acquisition de connaissances de portée générale, applicables éventuellement dans d'autres types de réacteurs. *Superphénix* ne devrait pas avoir de successeur avant une cinquantaine d'années : même si l'on construit un jour des surrégénérateurs au plutonium, ils seront très différents. Dans cette optique, la sûreté de fonctionnement est prioritaire sur la production d'énergie : l'analyse des incidents et les éventuels arrêts d'exploitation primeront sur la recherche de puissance ou de durée de fonctionnement qui prouveraient la capacité du réacteur à fonctionner industriellement.

Hélas, *Superphénix* n'est pas construit comme un réacteur de recherche : son utilisation dans ce but est malaisée. La commission propose donc de n'utiliser *Superphénix* que pour les expériences impossibles à réaliser dans d'autres installations. La construction d'un nouveau réacteur de recherche, qui remplacerait *Phénix*, en fonctionnement depuis 1973 à Marcoule, lui semble souhaitable.

Le deuxième et le troisième volets du programme de recherche portent sur l'utilisation des surrégénérateurs pour l'élimination des déchets radioactifs. La commission Castaing les a évalués en référence à la loi de 1991 sur le traitement et le stockage des déchets



Superphénix, à Creys-Malville : projet inutile ?

nucléaires. Celle-ci fixe un délai de 15 ans pour l'acquisition de connaissances, afin de prendre des décisions de long terme en 2006.

À quoi est-il urgent d'employer *Superphénix*? L'uranium introduit comme combustible dans les centrales à eau pressurisées contient entre 3,25 et 4 pour cent d'uranium 235, l'isotope fissile, et de l'uranium 238, non fissile. Un noyau d'uranium 238 peut, en absorbant un neutron, se transformer en plutonium 239, fissile. Ce plutonium participe ensuite partiellement à la production d'énergie. Chaque tonne de combustible déchargé contient ainsi, en plus de l'uranium non consommé, dix kilogrammes de plutonium, 0,45 kilogramme de neptunium, 0,3 kilogramme d'américium et 0,03 kilogramme de curium. Ces éléments radioactifs à période longue sont encore dangereux après plusieurs centaines d'années.

La mise au point, ces dernières années, pour les centrales à eau pressurisées, de combustible composé d'oxydes d'uranium et de plutonium ouvre une voie prometteuse pour utiliser ce dernier. En employant un tel combustible, les centrales consommeraient autant de plutonium qu'elles en produisent. Si l'on réussit à purifier le combustible après chaque cycle, on stabilisera le stock de plutonium. En outre, il serait confiné en majeure partie dans les centrales nucléaires : les risques de pollution ou de détournement seraient réduits.

Le neptunium, l'américium et le curium, en revanche, sont inutilisables. Aujourd'hui, on les entrepose dans des endroits protégés. On pourrait en réduire les quantités en plaçant ces éléments dans le flux de neutrons du cœur d'un réacteur à neutrons rapides. Dans ces conditions, les noyaux se cassent en éléments plus légers, à durée de vie plus courte. Quelques noyaux se transforment en éléments plus lourds, mais la masse totale des déchets est réduite par l'opération. Des calculs prévoient que, dans un combustible constitué à cinq pour cent d'américium, une irradiation pendant 15 ans dans *Superphénix* en éliminerait 90 pour cent, laissant seulement 10 pour cent de noyaux lourds. Ce modèle et d'autres doivent être testés avant que cette voie de réduction des déchets ne soit éventuellement utilisée en vraie grandeur. À condition qu'il fonctionne, *Superphénix* est le seul outil qui permette de le faire avant 2006.

Le rapport de la commission (ce n'était pas son objectif), ne répond néanmoins pas à une question : le jeu en vaut-il la chandelle ? Même dans les conditions de fonctionnement les plus sûres, est-il moins risqué de faire fonctionner un *Superphénix* plutôt que de stocker quelques tonnes de produits radioactifs à vie longue ? □

Sans domicile

La première enquête statistique à leur sujet.

Qui sont les personnes sans domicile fixe en France ? Les enquêtes statistiques traditionnelles les ignorent. Maryse Marpsat et Jean-Marie Firdion, de l'Institut national d'études démographiques, ont dirigé la première enquête qui a recueilli des données sur cette catégorie de la population. Les résultats soulignent la diversité des histoires personnelles et le fort lien entre logement et emploi.

Les recensements et les enquêtes statistiques, exhaustives ou sur des échantillons représentatifs de la population, s'appuient sur des listes d'adresses : les personnes sans domicile en sont exclues. L'interrogation des personnes rencontrées dans la rue par les enquêteurs est trop aléatoire : l'exclusion du logement n'est pas visible à tout coup.

Des adresses disponibles pour trouver des personnes sans domicile sont celles des centres d'hébergement et de restauration. En février et mars 1995, une enquête a été menée dans Paris auprès des personnes qui fréquentaient ces lieux. La plus ou moins grande utilisation des services a été pondérée par le traitement statistique de ces données.

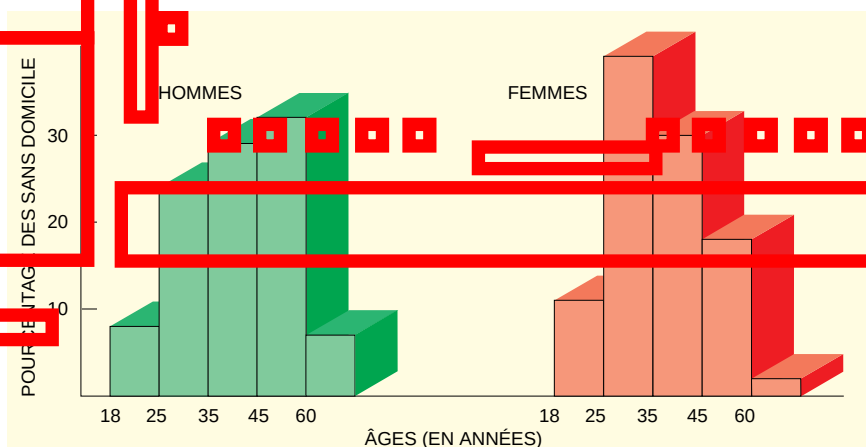
Les sans domicile interrogés sont majoritairement des hommes : la proportion de femmes n'est que de 17 pour cent. Les plus de 60 ans sont peu nombreux, les maisons de retraite les

accueillent parfois lorsqu'ils touchent une pension ; en outre, l'espérance de vie est faible dans la rue. Les moins de 25 ans sont aussi sous représentés : une volonté d'indépendance et des ressources financières plus faibles (ils ne peuvent par exemple pas prétendre au Revenu minimum d'insertion) expliqueraient un moindre accès aux services d'hébergement de moyenne et de longue durée, même à prix modique.

Pourquoi perd-on son logement ? Les trois-quarts des hommes sans domicile ne vivaient plus à 16 ans avec au moins l'un de leurs deux parents, étaient nés à l'étranger, ou avaient vécu un événement négatif avant 18 ans (problème de santé, mauvais traitements...). Les parcours sont toutefois divers et leur reconstitution nécessite un dépouillement approfondi des entretiens : des événements personnels recouvrent parfois des phénomènes sociaux. Ainsi, un homme qui présentait son divorce comme cause première de la perte de son logement avait préalablement perdu son emploi de mineur de fond.

Cette enquête souligne aussi que de nombreuses personnes sans domicile n'en ont jamais vraiment eu. Certaines sont nées d'un foyer de la DASS, ou d'une famille d'accueil, à la rue. D'autres n'avaient un logement que grâce à leur emploi ouvrier du bâtiment, logé sur les chantiers ou à proximité, à perdu emploi et logement après un accident du travail ; une gardienne d'immeuble a perdu son logement de fonction le jour de son départ en retraite.

Associées à celles des enquêtes habituelles, les données collectées, grâce à des enquêtes utilisant la même méthode, auprès des personnes sans domicile, fourniront un tableau plus exact de la population française. Permettront-elles de lutter contre l'exclusion ? □



La pyramide des âges des personnes sans domicile fixe à Paris a été reconstituée à partir des données de l'enquête menée en février et mars 1995 dans des centres d'hébergement et de restauration. Pour les femmes, nettement minoritaires, il ne s'agit que d'ordres de grandeur.

Un roman fleuve

Les sédiments charriés retracent le cours d'un fleuve ancien.

En recueillant les cristaux de zircon dans les collines de la région d'Amarillo au Texas, Nancy Riggs a retrouvé les traces d'un gigantesque fleuve. Ce fleuve, il y a 225 millions d'années, traversait l'ancien supercontinent, la Pangée qui allait se scinder en deux parties, le Gondwana et la Laurasie. Le fleuve de 1 500 kilomètres de long, baptisé Chinle, reliait ce qui est aujourd'hui le Texas au Nevada (Science, 6 juillet 1996).

La curieuse découverte de cristaux de zircon datant de 520 millions d'années dans les sédiments plus jeunes du Nevada lança la recherche. Ces cristaux devaient provenir de roches ignées anciennes, mais il n'existait aucune roche de ce type au voisinage du lieu de leur découverte ; aussi les géologues de l'Université de l'Arizona recherchèrent-ils plus à l'Est la source d'un tel réseau.

On savait que cette zone avait été sillonnée d'un réseau fluvial à la fin du Trias, réseau dont les eaux avaient charrié des alluvions vers l'Ouest. En recueillant des zircons de même âge dans les sédiments d'autres États américains, les géologues ont suivi le lit de la

rivière ancienne. Les zircons, des cristaux d'une extrême robustesse, ne sont affectés ni par l'érosion ni par les transformations des roches. Aussi leur âge est-il mesuré par les quantités relatives d'uranium et de son descendant radioactif, le plomb. En identifiant les zircons de même âge, N. Riggs et ses collègues ont identifié de proche en proche les différentes zones alluviales du lit ancien.

La découverte de la source du fleuve précise notre reconstitution de la géographie de la Pangée pendant la période où les forces tectoniques la craquaient. Pendant la dernière période du Trias, les vieux et majestueux massifs montagneux de la région d'Amarillo-Wichita (datant de 300 millions d'années) n'étaient pas érodés comme on l'avait longtemps imaginé : au contraire, pensent les géologues américains, ils avaient été soulevés à l'ouverture d'un rift du Mexique, épisode pendant lequel les zircons ont fait surface.

Les géologues ne trouvent plus de métaux précieux dans cette zone. Les petits poucets amateurs de zircons trouvent mieux : les témoins sédimentaires d'un fleuve.

Ô râles et cris

Les hurlements des bébés dépassent les limites officielles autorisées.

Mats Zarckrisson écrit dans *New Scientist* (6 juillet 1996) que les cris de son enfant d'un mois dépassent 96 décibels : il a mesuré cette intensité sonore au voisinage de son oreille alors qu'il portait son bébé dans les bras.

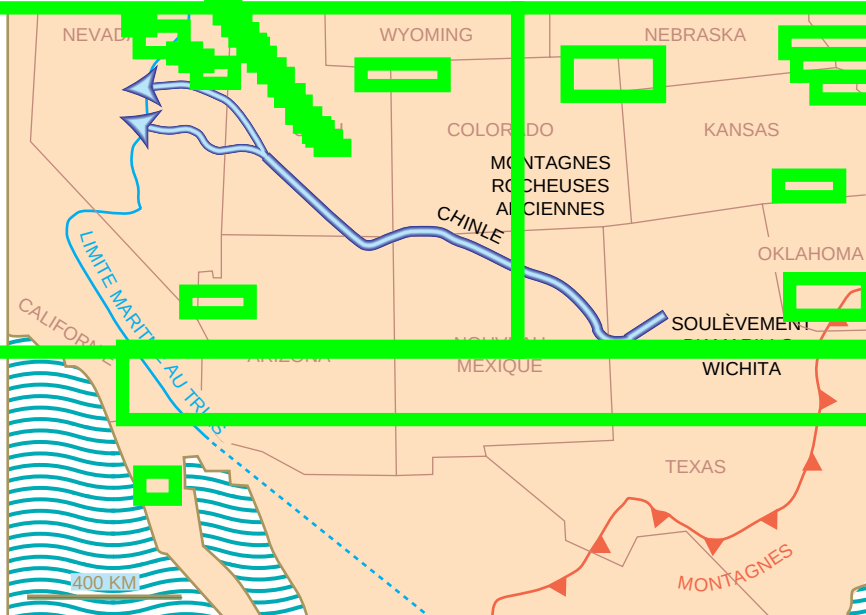
Or la législation suédoise du travail limite à 85 décibels le bruit autorisé sur les lieux de travail. Il semblerait ainsi qu'un son aussi puissant et aussi riche en fréquences aiguës que les hurlements des enfants en bas âge puissent entraîner avec le temps, et dans les familles nombreuses, des troubles rédhibitoires de l'audition.

Le risque a été mesuré par le commentaire associé à la norme ISO numéro 1999, «Acoustique. Détermination des bruits et estimation des niveaux sonores entraînant des défauts d'audition» : des calculs sérieux indiquent qu'un bruit de 96 décibels, huit heures par jour pendant 30 ans se traduit chez quatre personnes sur 10 par une très nette surdité.

Il sera ainsi souhaitable que les mères et le personnel des crèches où une vingtaine d'enfants peuvent hurler de concert, portent les casques de protection auditive. Cette protection est-elle compatible avec les normes de sécurité ? Les cris constituant un appel, les protections sont probablement interdites. D'aucuns le regrettent car ces protections éviteraient des surdités précoces, et rendraient le travail moins pénible.

UN AVANTAGE ADAPTATIF ?

Selon Chris Handley de Nouvelle Zélande, le danger de surdité est réel. Toutefois la sensibilité de l'oreille correspond d'après notre bon physiologue, à un avantage adaptatif. Les bébés hurleurs se transformeront en adolescents revendicatifs et pugnaces et les parents à l'audition handicapée seront sourds aux demandes d'argent de poche de leurs bambins quelque 15 ans plus tard... □



Il y a 225 millions d'années un gigantesque fleuve coulait du Texas au Nevada actuels. Les géologues ont retracé son parcours en suivant les zircons anciens charriés à partir des montagnes du soulèvement d'Amarillo-Wichita.

La cellulose

Des chimistes japonais synthétisent enfin cette molécule qui constitue l'armature des végétaux.

La cellulose est si commune, dans tous les végétaux, que sa synthèse par la chimie semble inutile. Toutefois, cette molécule est emblématique, en science des matériaux, parce qu'elle conduit à la définition des polymères (les «matières plastiques»), dont les très longues molécules sont composées par la répétition de sous-unités, du glucose dans le cas de la cellulose. Base des travaux qui ont finalement donné les polyéthylène, polyuréthane, polychlorure de vinyle, etc. à partir des années 1920, elle résistait à la synthèse chimique. Shiro Kabayashi, Shin-ichi Shoda et leurs collègues de l'Université de Sendai ont enfin mis fin à la frustration.

La chimie des sucres (la cellulose appartient à cette famille) est notoirement difficile, parce que ces molécules réagissent de très nombreuses façons ; l'obtention d'une liaison chimique d'un type précis, entre deux atomes particuliers de deux sucres, est un fait d'homme. Depuis un demi-siècle, les tentatives de synthèse de la cellulose échouaient, parce que l'on ne parvenait pas à enchaîner correctement les molécules de glucose en une molécule de cellulose analogue au polymère naturel.

Il y a deux ans, les chimistes de Sendai obtinrent des polymères du glucose, par une voie non biologique, en utilisant un fluorure de cellobiose, c'est-à-dire une molécule composée de deux glucose enchaînés ; un atome de

carbone était rendu plus réactif par sa liaison à un atome de fluor. Dans un solvant organique, une enzyme de micro-organisme (une «cellulase») qui coupe la cellulose éliminait du fluorure d'hydrogène HF tout en liant les molécules de cellobiose.

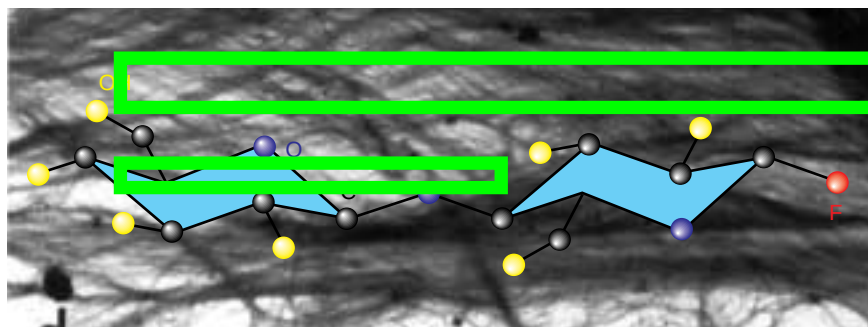
Toutefois les analyses avaient montré que le polymère ainsi formé était la cellulose II, la forme thermodynamiquement la plus stable, obtenue par arrangement tête-bêche des molécules de cellulose, et non la cellulose I, normalement présente dans les végétaux.

Identifiant les raisons de leur premier succès, les chimistes s'étaient alors payé le luxe de reproduire la réaction en changeant les réactifs, et d'obtenir d'autres liaisons sur mesure. Enfin la visualisation au microscope électronique des microfibrilles de cellulose synthétique leur avait permis de mieux comprendre la synthèse naturelle de la molécule. Restait toutefois le lancinant problème de la synthèse de la cellulose I. Ni les polymérisations ni les recristallisations de la cellulose II n'avaient engendré cette forme métastable de la molécule.

Ainsi qu'ils cherchaient à purifier l'enzyme utilisée pour leur synthèse, les chimistes japonais observèrent alors, sur les images au microscope électronique, que les produits initialement synthétisés contenaient parfois des fibrilles de plusieurs types ; certaines d'entre elles ressemblaient à celles de la cellulose I. Avaient-ils obtenu cette dernière sans le savoir ? Modifiant la composition du solvant organique où ils faisaient leur synthèse, ils trouvèrent un mélange qui optimisait la production de ces fibrilles.

Les analyses confirmèrent alors que le but était atteint.

On comprend aujourd'hui mieux le rôle du solvant, et la méthode trouvée à Sendai permet même de produire des dérivés de la cellulose, en variant les réactifs. On obtient notamment le xylane, qui est un composé important de l'hémicellulose, dans les parois cellulaires des végétaux.



Les fibrilles de cellulose I au microscope électronique, et la molécule de cellobiose fluorée utilisée pour la synthèse de la cellulose et de ses dérivés.

Rides et cratères sur Ganymède

La surface du plus gros satellite de Jupiter témoigne d'une activité interne.

À la fin du XIX^e siècle, des astronomes ont observé des structures rectilignes à la surface de Mars. Ils crurent alors que des êtres intelligents qui peuplaient la planète avaient construit des ouvrages d'irrigation. Ou auraient imaginé ces observateurs en découvrant la surface de Ganymède, le plus gros satellite de Jupiter, dont près de la moitié est couverte de cannelures, qui s'enchevêtrent sur des milliers de kilomètres ? La sonde *Galileo*, en orbite autour de Jupiter, a scruté cette surface au mois de juin 1996 : à défaut d'y trouver des extraterrestres, elle a confirmé une activité interne du satellite.

Galilée rapporte, dans *Le messager céleste*, que, le 7 janvier 1610, il a observé trois objets brillants autour de Jupiter. Le dix du même mois, un quatrième est apparu, le plus gros de ces satellites « galiléens ». Quelques années plus tard, l'astronome allemand Simon Marius, rival de Galilée, qui prétendait avoir observé les satellites le premier, les nomma Europa, Callisto, Io et Ganymède, des noms de trois maîtresses et d'un amant de Jupiter, roi des dieux.

Avec son diamètre deux fois et demi plus petit que celui de Terre, Ganymède a la taille d'une planète : plus gros que Mercure et Pluton, il atteint les trois quarts de la taille de Mars. Les images transmises par les sondes *Voyager 1* et *Voyager 2* à la fin des années 1970, avaient laissé entrevoir la profonde originalité de sa structure. Les informations que *Galileo* a transmises, après son passage à seulement 835 kilomètres du satellite, sont encore plus étonnantes.

La surface de Ganymède est constituée de deux types de terrains, différenciés par leur couleur, qui la recouvrent à peu près à parts égales. Des zones sombres, couvertes de cratères, alternent avec des zones claires, où courent des cannelures enchevêtrées. *Galileo* a photographié en particulier la plus grande des zones sombres, nommée Galileo Regio, et une zone claire adjacente, Uruk Sulcus.

Malgré ces différences morphologiques, la composition chimique de la croûte est identique sur tout le satellite :

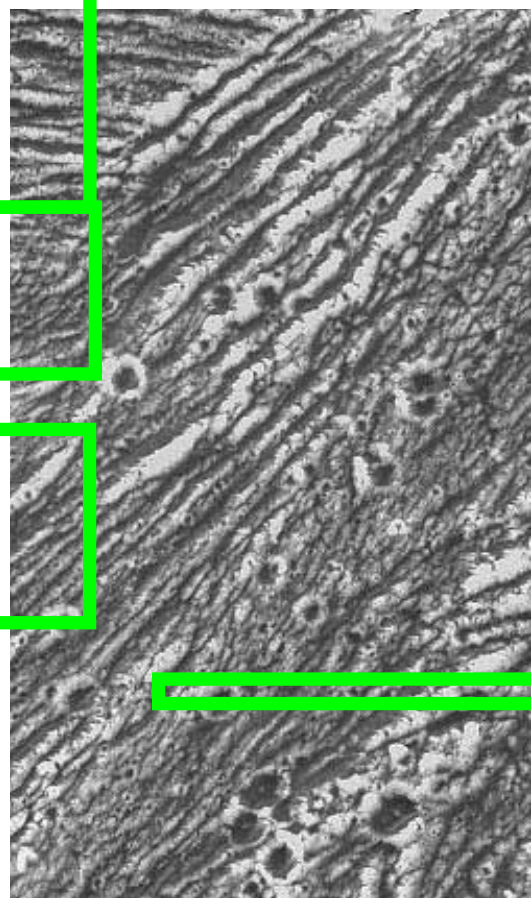
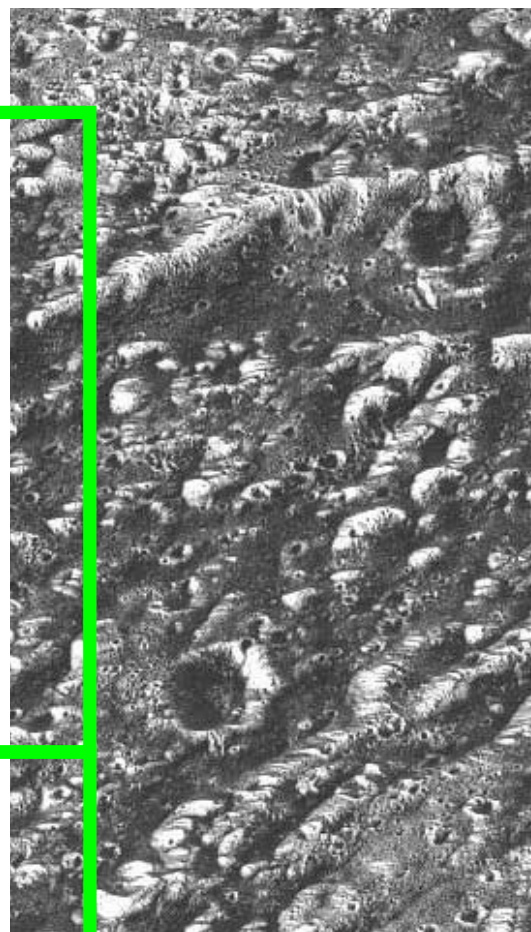
il s'agit de glace, salée par des poussières. La densité de Ganymède est de 1,94. Sous l'épaisse couche de glace, des matériaux plus lourds, essentiellement des silicates, seraient agglomérés en un noyau dense.

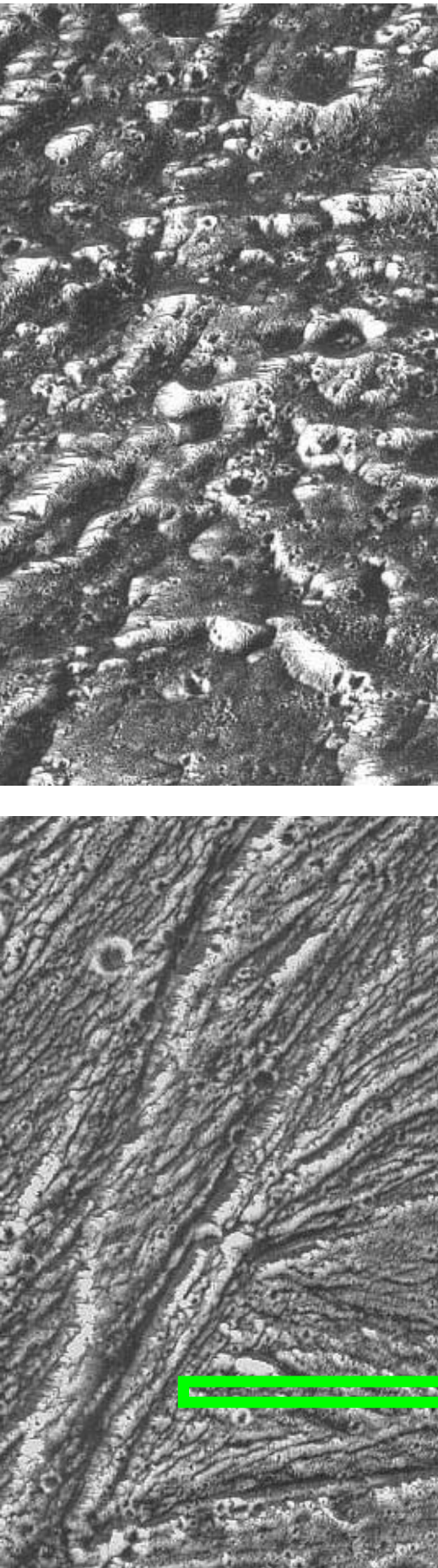
Y a-t-il une tectonique des plaques sur Ganymède ? Les terrains sombres sont les plus anciens : les cratères qui les couvrent sont les traces d'un intense bombardement de météorites qui s'est probablement produit au début de l'histoire du Système solaire, il y a quatre milliards d'années. Les terrains clairs portent moins de cratères d'impact : ils se sont donc formés plus récemment. Les cannelures qui les recouvrent, dont certaines atteignent 700 mètres de profondeur et courent sur plusieurs milliers de kilomètres, ont été créées par des mouvements de la croûte de glace. Ces mouvements ont favorisé l'enfoncement de l'ancienne croûte et son remplacement par de la glace moins dense, située au-dessous.

Les variations du champ magnétique détectées par *Galileo* au voisinage de Ganymède confirment que cet astre n'est pas mort : il crée son propre champ magnétique, ce qui n'est possible que par la circulation d'un matériau conducteur sous la croûte. C'est la première fois que l'on observe ce phénomène pour un satellite. Le champ magnétique des planètes, y compris des plus petites, est produit par un noyau de fer. Ganymède se distinguerait-il par un autre mécanisme ? La circulation d'une couche d'eau salée sous la surface pourrait créer son champ magnétique.

Dans les 18 prochains mois, la sonde *Galileo*, qui tourne en orbite autour de Jupiter, visitera encore trois fois le satellite géant. Les données collectées s'ajouteront à celles des pièces de puzzle, à la reconstitution de l'histoire de Ganymède.

La surface de Ganymède est constituée de deux types de terrains. La croûte ancienne, la plus sombre, est couverte de cratères (en haut, dans la région Galileo), témoins d'impacts météoritiques. Sur les terrains plus récents, s'étendent de longues cannelures, produites par des mouvements tectoniques internes (en bas, la région Uruk Sulcus).





Cosmétiques et pépins de raisin

Des tanins de pépins combattent, des ans, l'irréparable outrage.

Sil on devait élire une molécule de l'année, elle appartiendrait sans doute à la classe des polyphénols, ces cousins des tanins, avec lesquels les tanneurs rendaient les peaux imputrescibles. Abondants dans les végétaux, les polyphénols intéressent aujourd'hui les spécialistes des cosmétiques, qui les utilisent pour leur activité de surface : certains d'entre eux tirent la peau ou gomment les rides.

Les polyphénols ont en commun un cycle à six atomes de carbone, auxquels sont liés plusieurs groupes hydroxyle OH. Les petits polyphénols, tel l'ester caféique, ont des effets biologiques qui intéressent l'industrie des cosmétiques : ce sont de puissants inhibiteurs enzymatiques. Ainsi le gallate de pyrogallolcatéchine extrait du thé vert réduit les inflammations cutanées et évite le rougissement des peaux fragiles ; d'autres petits polyphénols évitent les rides en inhibant l'élastase, l'enzyme qui rigidifie la peau en dégradant la protéine nommée élastine.

En collaboration avec plusieurs organismes de recherche publique, tel l'ORSTOM, le Laboratoire de biologie et des substances naturelles de la Société Christian Dior cherche activement, dans le monde végétal, des molé-

cules présentant une activité cosmétique : à partir de nombreuses plantes acides, Patricia André et ses collègues extraient des composés qu'ils testent *in vitro*, puis sur des cultures de cellules cutanées, et enfin *in vivo*. Lors de leur exploration des remèdes populaires, les chimistes ont découvert l'intérêt de la proanthocyanidine de pépin de raisin, qui possède non seulement les propriétés astringentes attendues, mais aussi des propriétés antiradicalaires qui peuvent protéger la peau contre le rayonnement solaire ou contre le vieillissement.

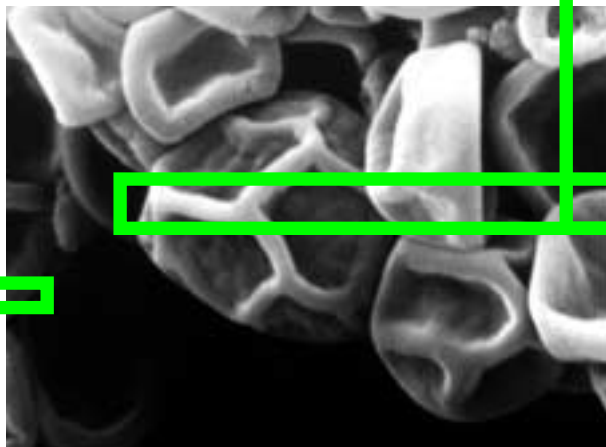
Comment utiliser ce polyphénol ? On ne pouvait pas l'incorporer directement dans les préparations cosmétiques car il est réactif et instable : il se transforme notamment en quinones, qui donnent aux préparations une coloration brune. En outre, les cosméticiens voulaient une action en profondeur, qu'on n'obtenait pas en appliquant les polyphénols en surface : les proanthocyanidines réagissaient avec les kératines, ce qui bloquait leur diffusion dans la profondeur de la peau.

Le laboratoire CNRS de pharmaco-technologie à la Faculté de pharmacie de Reims a proposé une solution aujourd'hui brevetée : la réalisation de vésicules de polyphénols réticulés. Pour préparer ces vésicules, on disperse d'abord une solution aqueuse des proanthocyanidines dans un solvant organique ; puis on ajoute à l'émulsion obtenue un dichlorure d'acide, dont chaque molécule se lie simultanément à deux molécules adjacentes de proanthocyanidines, à la surface des gouttelettes dispersées. Ainsi se forment des membranes sphériques qui limitent les gouttelettes aqueuses initiales. Après lavage et centrifugation, on récupère les vésicules parfaitement stables que l'on peut ensuite disperser dans l'eau ou lyophiliser ; elles conservent suffisamment de groupes hydroxyles

pour exercer leurs effets antiradicalaires.

La stabilisation est obtenue par la réticulation, qui bloque certains groupes chimiquement actifs. Dans un produit commercialisé, le polymère formé

à partir des proanthocyanidines de pépin de raisin reste à la surface de la peau, mais les enzymes estérases de la peau le dissocient lentement ; les polyphénols libérés diffusent et agissent en profondeur. □



Vésicules formées par réticulation de polyphénol de pépin de raisin.

L'ampoule à halogène

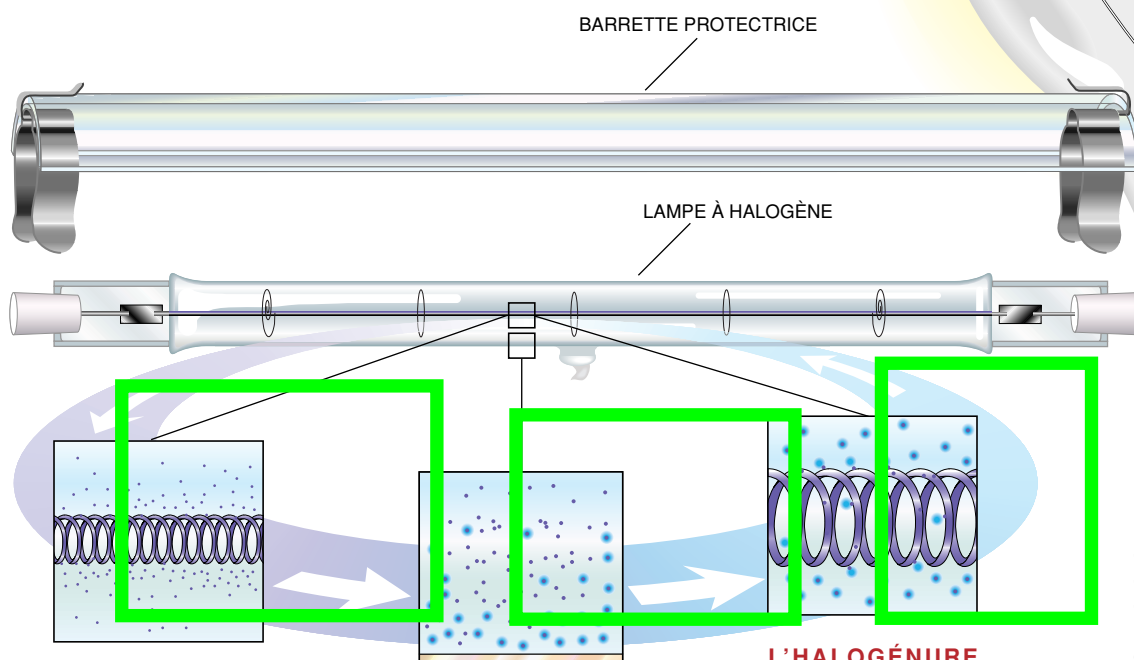
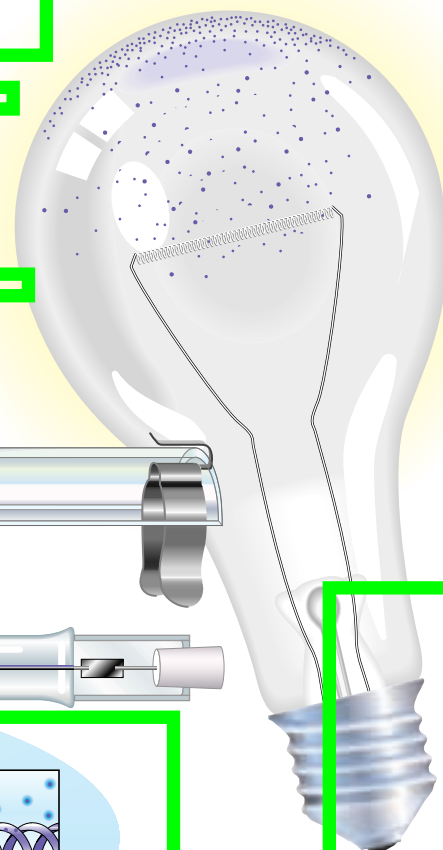
TERRY MCGOWAN

Au cours des années 1950, les ingénieurs de recherche de la Société *General Electric* voulaient construire de petites ampoules électriques pour les loger dans l'extrémité effilée des ailes d'avion supersonique. Ils cherchèrent d'abord à augmenter la température du filament de tungstène, afin d'augmenter sa luminosité, mais le métal s'évaporerait rapidement, comme ils le craignaient.

Ils eurent alors une bien meilleure idée : au lieu d'emplir l'ampoule par un gaz inerte, comme dans les ampoules



LES AMPOULES des avions doivent être petites et brillantes. En cherchant des ampoules pour les avions, les ingénieurs ont mis au point les ampoules à halogène.



UN FILAMENT de tungstène émet de la lumière quand il est chauffé par effet Joule, lors du passage d'un courant électrique. Les températures élevées atteintes provoquent l'évaporation du tungstène, ce qui engendre une vapeur métallique (en violet).

LE REFROIDISSEMENT du tungstène au voisinage du verre provoque la réaction du métal avec l'halogène gazeux (en bleu). L'halogénure de tungstène formé migre vers le filament.

L'HALOGENURE de tungstène se décompose quand les molécules sont chauffées par le filament. Le métal se dépose alors sur le filament et l'halogène est libéré dans l'ampoule.

LES AMPOULES classiques contiennent un gaz chimiquement inerte, de sorte que le tungstène qui s'évapore du filament se dépose sur le verre et le rend opaque. Dans les ampoules à halogène, le tungstène ainsi déposé forme une couche mince.

classiques, ils utilisèrent un élément réactif : l'iode. Ils obtinrent une grande variété de systèmes nommés ampoules à halogènes, qui contiennent des gaz tels que l'iode ou le brome.

Les lampes à halogène tirent parti des propriétés chimiques du tungstène : aux températures atteintes par les filaments, soit environ 3 000 °C, la vapeur de tungstène ne se combine pas à

l'halogène. En revanche, quand les atomes de tungstène approchent du verre, ils se refroidissent à moins de 800 °C et réagissent spontanément avec l'halogène, formant un halogénure de tungstène.

Les molécules ainsi formées diffusent dans toute l'ampoule et atteignent notamment le filament, qui perd de la matière. Comme l'halogénure de tungstène y est

instable, il se décompose, libérant l'halogène et déposant le tungstène auquel il était lié sur le filament brillant.

La lampe à halogène brille ainsi plus et plus longtemps, car le tungstène ne noircit pas le verre, et se recycle sur le filament. Ce type de lampe est largement employé dans les automobiles, dans les foyers, mais aussi dans les avions.



LA VIE DES DINOSAURES

Les dinosaures sont les plus familiers des «monstres» préhistoriques.

Parce que ces monstres évoquent les fantaisies de nos cauchemars.

Parce que leur extinction brutale est associée à une apocalypse, comète ou volcanisme. Parce qu'écrivains, dessinateurs et cinéastes ont évoqué les péripéties de leur existence, reconstruite ou imaginée.

La vie des dinosaures est une partie de la vie de la paléontologie : les articles de ce dossier retracent quelques vicissitudes de notre compréhension de ces animaux fabuleux.

La reconstitution des dinosaures

GREGORY PAUL

Les illustrations de Charles Knight ont ressuscité et réhabilité les dinosaures bien avant Jurassic Park.

Pendant la première moitié du XX^e siècle, les paléontologues pensaient que les dinosaures étaient des reptiles à longue queue traînante synonyme de vétusté. Ces monstres semblaient peu enclins à la vie sociale ou familiale, et certains pensaient que l'inadaptation et la stupidité (?) des dinosaures étaient les causes de leur extinction. Conséquence morale transposable : ils étaient responsables de leur sort funeste. Depuis, les chercheurs ont réhabilité les dinosaures, leur reconnaissant une certaine vivacité d'esprit, tant d'esprit que de corps, et une aptitude à la vie communautaire.

Stephen Jay Gould a qualifié de « Consensus moderne » cette vision primaire des dinosaures, que l'artiste américain Charles Knight (1854-1952) a remis en question par ses illustrations. Toutefois, si l'artiste suivait les préceptes de son époque, sa vision anatomique était nouvelle et intéressante : elle ressuscitait les monstres des légendes antiques et des bestiaires du Moyen Âge, reconstituait la faune passée de notre planète.

Les représentations murales que Charles Knight peignit au début du siècle pour différents musées américains ont inspiré durablement les représentations de la vie préhistorique. La génération actuelle des peintres d'animaux pré-



historiques, dont je fais partie, a grandi en admirant ces représentations qui inspirent encore les paléoartistes. Knight était à la fois un grand artiste et un naturaliste : sa connaissance approfondie de l'anatomie donnait à ses reconstitutions une

Europe et aux États-Unis, et le public réclame des représentations. On ne trouve que des amoncellements de squelettes : comment les artistes, sur la base de ces informa-

Paléontologie et reconstitution

La première publication faisant état de restes fossiles attribués aujourd'hui à un dinosaure date de 1824 : elle est l'œuvre du révérend William Buckland, géologue anglais aussi brillant qu'excentrique. Un grand nombre de dents et d'ossements de dinosaures ont été découverts au début du XIX^e siècle au cours de campagnes de fouilles et

l'environnement de ces animaux? Richard Owen, l'éminent paléontologue qui inventa le nom *Dinosauria* («terribles lézards») en 1842 conseille les peintres et les sculpteurs. Il commande en 1854, pour en doter le Crystal Palace de Londres, des sculptures de dinosaures en vraie grandeur, qui existent toujours.

Le seul squelette complet mis au jour avant les années 1880 provient d'Allemagne : c'est un carnivore de petite taille, qui ressemble à un oiseau, et dénommé *Compsogna-*

1. PEINTURE MURALE DE CHARLES R. KNIGHT où s'affrontent deux ennemis mortels, *Triceratops* et *Tyrannosaurus*. Cette œuvre, réalisée à la fin des années 1920, est très remarquée, et son rayonnement est très important. De telles peintures servent encore de référence aujourd'hui pour les artistes en paléontologie. S'appuyant sur sa connaissance approfondie de l'anatomie et sur son imagination fertile, Knight reconstitua des tranches de vie préhistoriques précises et détaillées. Par exemple, bien que la maquette de *Stegosaurus* qu'il avait réalisée en 1899 (photographie de droite) porte un nombre de plaques osseuses trop élevé par rapport à ce qui est aujourd'hui admis, leur disposition en alternance est, à l'heure actuelle, considérée comme exacte. Sur la photographie, Charles Knight a 25 ans.





thus. Les grandes découvertes datent de la période 1870-1880, durant laquelle deux paléontologues américains, *Edward Cope* et *Othniel Charles Marsh*, ont exploré l'Ouest américain, riches en dinosaures. Ils sont courageux, car les guerres indiennes font rage dans ces territoires. Ils ont découvert des squelettes entiers de saurionodes, d'allosaures prédateurs et de stégosaures à plaques. Les informations concernant l'aspect et la taille des dinosaures s'accumulent, et, dès les années 1890, Knight commence à peindre les dinosaures. Il a la chance de tomber au bon moment, et il saisit l'opportunité au vol.

Knight est de caractère sensible et lunatique. Sa vocation se révèle de bonne heure : il commence à peindre des animaux et des paysages à cinq

2. LES MAÎCAGES DE RANCHO LA BREA, en Californie, ont été peints par Knight dans les années 1920, une quinzaine d'années après leur fouille en 1906. Le site était très riche en fossiles de l'âge glaciaire, tels que tigre à « dent de sabre » : *Sabertooth*, lions des cavernes, éléphants, mastodontes, paresseux, chameaux, chevaux, coyotes, bisons, antilopes et oiseaux. Dans ses peintures de mammifères, Knight a tendance, contrairement à ses dessins de dinosaures, à représenter les animaux en action. Les squelettes montés de mammifères réalisés d'après les peintures murales de Knight, telles que ces paresseux du Musée d'histoire naturelle de New York (*photographie*), ont de ce fait des postures très vivantes.





3. CES DINOSAURES À BEC DE CANARD, du genre *Anatosaurus*, ont été peints par Charles Knight en 1909 (*peinture de gauche*), en s'inspirant, pour la composition, de deux squelettes présentés au Musée américain d'histoire naturelle. Dans ce musée, les salles consacrées aux dinosaures présentent côte à côte les squelettes et les peintures de Charles Knight.

ans, en dépit d'une myopie et d'une vision réduite par une mauvaise blessure à l'œil droit. Encouragé par le contexte familial, notamment une belle-mère artiste et un peintre ami de la famille, Knight étudie à l'École de beaux-arts à New York. À 16 ans, il est mandaté pour peindre des paysages dans des églises : c'est son premier et unique poste salarié.

Après cette tâche, pour s'éloigner de sa belle-mère par trop jalouse et autoritaire, Knight quitte Brooklyn pour Manhattan. Il commence alors une carrière florissante d'illustrateur pour les publications de l'American Museum of Natural History, une des institutions d'histoire naturelle. Il prend plaisir à fréquenter les zoos et les parcs de la cité et retranscrit ses périples en des croquis détaillés des animaux et des plantes. Cet exercice, tout comme ses visites fréquentes au Musée américain d'histoire naturelle où il affine ses connaissances en anatomie en disséquant des carcasses, améliore la qualité de son travail. Quand un paléontologue

travaille au musée, il découvre sa véritable vocation.

Après un long périple en Europe – où il s'intéresse aux différentes écoles artistiques et visite d'autres zoos – Knight se spécialise dans les dinosaures. Il travaille brièvement pour le magazine *Natural Science*, juste avant la mort de ce paléontologue réputé, spécialiste des vertébrés. Cope et son rival, Othniel Marsh, créent le premier engouement américain pour les dinosaures au début des années 1870.

Au musée américain d'histoire naturelle, Knight collabore avec un paléontologue distingué, Henry Osborn, qui recherchait un peintre capable de transformer ses collections de vieux ossements desséchés en images captivantes, susceptibles, pensait-il, d'attirer les foules.



Knight confirme son talent et contribue à la renommée du musée, reconstituant fidèlement les conceptions originales d'Osborn. Selon ce paléontologue, les sauropodes étaient de grands herbivores terrestres, se nourrissant de feuillages à la cime des arbres. Aussi, à la demande d'Osborn, Knight peint l'un de ces sauridiens se dressant sur ses pattes postérieures comme s'il essayait d'atteindre les frondaisons (voir la figure 4). Knight montre également d'énormes théropodes – les plus redoutables dinosaures prédateurs – dans des combats que l'on devine meurtriers (voir la figure 5) : il représente ces théropodes comme des chasseurs agiles, alors que la plupart des paléontologues de l'époque refusaient cette vision.

Au début du XX^e siècle, des fouilles en Amérique du Nord et en Asie livrent des restes de dinosaures remarquables datant du Crétacé supérieur : les terribles tyrannosaures, les cératopsiens à cornes, les hadrosaures à bec de canard et bien d'autres encore. Les tableaux de Knight de cette époque, essentiellement des peintures murales, sont des œuvres d'une grande qualité. Ses paysages embrumés, peut-être en raison de sa mauvaise vue, et les anime de représentations minutieuses et réalistes des dinosaures les plus connus. C'est sa période la plus productive, et ses tableaux acquièrent une renommée mondiale.

Knight fait école

Vers 1920, sa vie est harmonieuse : avec son épouse, l'opéretteuse Annie Hardcastle, ils forment un couple à la mode, coqueluche de la société new-yorkaise. La bonne gestion d'Annie leur assure une vie aisée : elle décharge Knight de toutes les questions financières, lui alloue son argent de poche et traite de la rémunération de ses œuvres avec les éditeurs (Knight ne s'occupe que de la présence pour les questions d'argent) ; leur fille, Lucy, à l'âge des 15 ans, et, à 20 ans, obtient du musée Field 150 000 dollars pour les fresques de son père. Vers 1930, Knight donne aussi des cours, et son prestige augmente encore. Aujourd'hui de nombreux artistes reconstituent des dinosaures de par le monde, mais, à l'époque, Knight, étoile solitaire, est seul à pratiquer cet art.

4. SAUROPODE PRESSÉ peint par le jeune Knight au tournant du siècle ; cette peinture a été influencée par l'une des théories du paléontologue Henry Osborn, selon laquelle ces dinosaures auraient été des animaux terrestres herbivores se nourrissant du feuillage au sommet des arbres (peinture ci-dessus). À l'époque, la plupart des paléontologues n'admettaient pas cette idée ; cependant, c'est dans la même attitude (photographie ci-contre) qu'a été disposé le fameux barosaure au Musée américain d'histoire naturelle.

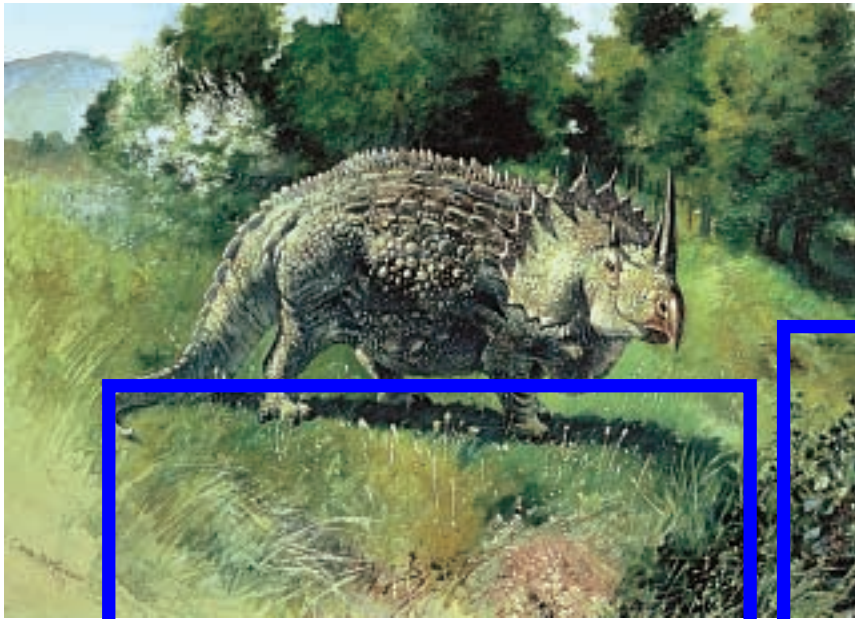




5. COMBAT DE CARNIVORES du genre *Dryptosaurus*, tels que décrit par le paléontologue Edward Cope ; Knight achève cette peinture en 1897, peu après le décès de Cope. Pendant une décennie, la plupart des spécialistes doutent que des dinosaures puissent bondir ainsi ; aujourd'hui, les paléontologues pensent que ces théropodes ont été des chasseurs agiles et des combattants très agressifs.



6. KNIGHT PEINT EN 1922 ces petits protoceratopsiens, peu après la découverte en Mongolie des premiers nids de dinosaures. Sur la suggestion d'Osborn, il représente ces dinosaures cératopsiens en train de protéger leurs œufs (des paléontologues ont récemment montré que ces œufs étaient ceux d'un *Oviraptor*).



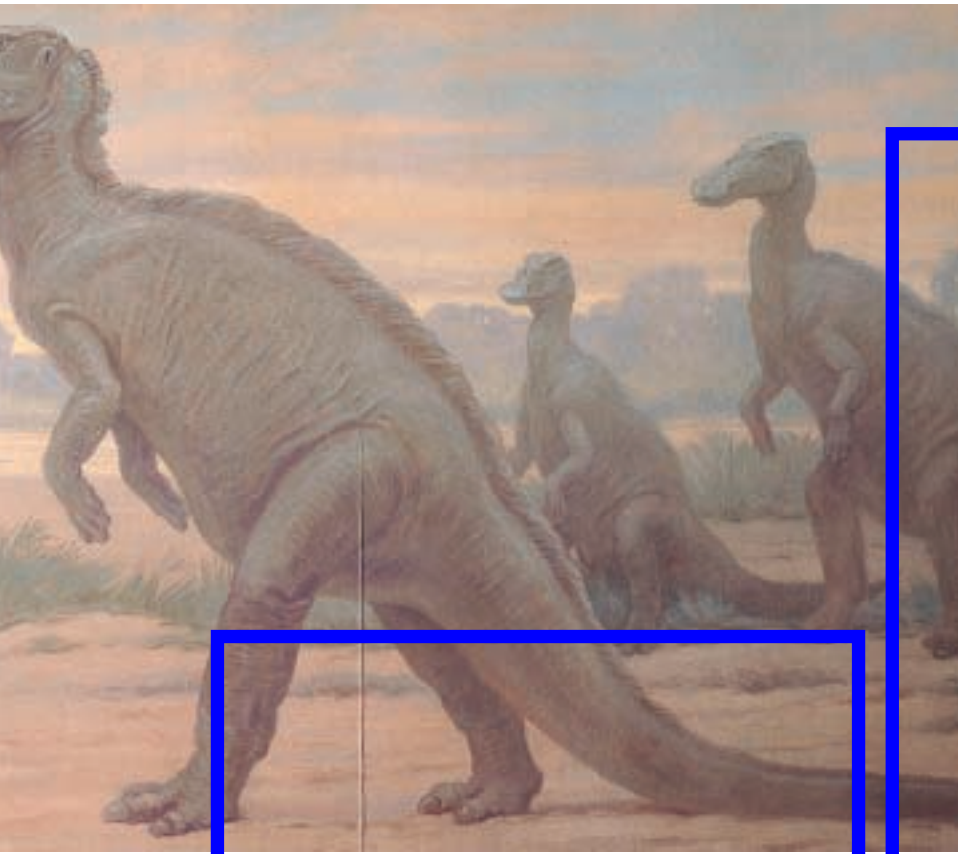
7. AGATHA MAS CORNU, l'une des premières œuvres de Knight, est achevée en 1897 sous la direction de Cope. Durant la période «Cope», les paléontologues proposent de nombreuses descriptions de dinosaures fantaisistes et imaginaires. Cet animal, à gauche, arbore un nombre d'ornements qui paraîtrait extravagant pour les normes classiques.

avec rapidité, et plutôt intelligent pour un reptile». Il ne dessine d'ailleurs pas toujours les dinosaures comme on les imagine aujourd'hui. Ici, il représente ainsi un couple de *Triceratops* en train de veiller sur un petit et montre en quelques occasions des groupes de dinosaures herbivores. Après la découverte en Asie centrale de nids de dinosaures, il peint, sous la direction d'Osborn, de petits protocératopsidés qui veillent sur leurs œufs.

Les connaissances limitées de

Knight travaille en étroite collaboration avec des paléontologues, aussi suit-il leurs préceptes, mais pas de façon absolue. Ainsi, dans *La vie à travers les âges* – un catalogue de dinosaures qu'il peint en 1946 –, il traite les dinosaures de créatures «stupides, inadaptées, arriérées et à la démarche lente», vouées à l'extinction et qui seront remplacées par des mammifères «vifs et au sang chaud». Il consigne toutefois, sur la même page, qu'un dinosaure prédateur était «de constitution légère pour agir

dans son œuvre la plus connue, où l'on voit un *Triceratops* à cornes, solitaire, qui tient en respect deux *Tyrannosaures* (voir la figure 1). Knight ignore que d'énormes accumulations d'os peuvent révéler que certains dinosaures à cornes vivaient en troupeaux. De plus, dans la composition de cette œuvre de Knight, l'herbivore et ses prédateurs s'ignorent : chaque pied des animaux est fermement ancré sur le sol. En fait, cette règle du «chaque-pied-au-sol» s'applique à presque toutes les représen-



8. CETTE PEINTURE MURALE, exécutée par Knight à la fin des années 1920 représente des dinosaures nord-américains du Crétacé supérieur. Diverses créatures se profilent sur un fond brumeux, notamment, de gauche à droite, un troupeau de *Parasaurolophus*, un *Paleosincus* à armure, plusieurs *Struthiomimus* et quelques hadrosaures (*Edmontosaurus*) à tête plate.

un troupeau de *Parasaurolophus*, un *Paleosincus* à armure, plusieurs *Struthiomimus* et quelques hadrosaures (*Edmontosaurus*) à tête plate.

ou compose à main levée des reconstitutions très vivantes, exemple que de nombreux peintres de dinosaures ont suivi.

À la fin des années 1960, alors que je n'étais qu'un artiste peintre de dinosaures «en herbe», une caractéristique anatomique adoptée par Knight m'a embarrassé. Je savais que l'on classait les dinosaures parmi les reptiles, et que les lézards et les crocodiliens ont des cuisses aux muscles fins attachés à des hanches de petite taille. Conformément à ce principe, les cuisses des dinosaures de Knight étaient étroites, comme celles des reptiles. Je pensais néanmoins, en observant les squelettes, que les dinosaures étaient plutôt bâtis comme des

tations de dinosaures de Knight. Il ne dessine pratiquement jamais de dinosaures en mouvement, ils ne courent, ils ne sautent, ils ne se battent pas. Ils sont toujours debout, comme des mammifères, même pour les plus imposants. Il peint généralement les dinosaures avec des teintes brunes et verdâtres nuancées de gris. Leur peau avait peut-être ces couleurs. Toutefois, comme leur vision des couleurs se rapprochait probablement de celle des reptiles et des oiseaux, leur peau à écailles avait probablement des pigmentations plus intenses. Aujourd'hui, les artistes peignent les dinosaures de teintes plus vives.

La musculature des dinosaures

Knight tire parti de ses connaissances en anatomie et redonne à ses dinosaures une apparence réaliste. Pour les spectateurs les intégrer dans leurs visions du monde. C'est, aujourd'hui encore, une raison de leur succès. Pourtant, cette apparence de réalisme reste superficielle sur nombre de points. Knight représente en détail les squelettes et les muscles d'animaux vivants, mais il ne dessine pas de croquis similaires pour les dinosaures – notamment parce que l'ossature ne donne que des informations limitées sur la musculature d'un animal. En revanche, à partir de squelettes, sculpte les esquisses

des hanches larges où se fixaient les puissants muscles des cuisses. Que pouvait bien faire un «artiste» adolescent et indécis? Imiter servilement Knight, son idole! Or, vers 1920, Alfred Romer, paléontologue spécialiste des vertébrés, avait étudié l'évolution de la musculature des tétrapodes, et décrit des dinosaures aux fortes hanches et dotés de cuisses aux muscles larges, comme les oiseaux. Vers les années 1970, la conception de Romer s'imposa.

Les années 1920 furent une époque où les dinosaures étaient perçus comme des créatures fantastiques, des monstres. Les artistes de cette époque ne cherchaient pas à représenter des dinosaures réalistes, mais plutôt à créer des œuvres spectaculaires qui leur peignent une réalité. Le répertoire de l'illusionniste grossit avec le temps, et la plupart des artistes s'améliorent avec l'âge. Pourtant, les reproductions de Knight datant des dix dernières années n'ont pas la qualité des précédentes. La faute en incombe peut-être à sa vue défaillante. D'autre part, Osborn n'était plus le seul à influencer Knight. À cette époque, les scientifiques avaient mis au rancart l'art de la représentation des dinosaures : il existait des préoccupations plus urgentes.

Néanmoins, Knight n'a jamais connu les lieux de nidation des dinosaures, la migration massive des troupeaux, les habitats polaires, la forme de la tête de l'*Apatosaurus*, les impacts géants des météorites, le fait que les oiseaux sont des dinosaures vivants. Ces reproductions sont toutefois d'une qualité artistique difficilement égalable et suscitent encore des vocations.

Gregory PAUL est écrivain et illustrateur-paléontologue.
Charles R. KNIGHT, *Life Through the Ages*, Alfred A. Knopf, 1946.
S.M. CZERKAS et D.F. GLUT, *Dinosaurs, Mammoths, and Cave-men*, E.P. Dutton, 1982.

Dinosaurs Past and Present, sous la direction de S.J. Czerkas et E.C. Olson, University of Washington Press, 1987.
Don LESSEM et Donald F. GLUT, *The Dinosaur Society's Dinosaur Encyclopedia*, Random House, 1993.

Le Baron Nopcsa et les Dinosaures

Les premiers dinosaures de Transylvanie ont été découverts il y a 100 ans et mis en valeur par un noble paléontologue hongrois.

Le mot Transylvanie évoque la région d'Europe centrale où vécut le sanglier Comte Dracula. Or la Transylvanie est riche d'un important patrimoine paléontologique, notamment une intéressante faune de dinosaures. Les découvertes paléontologiques de cette région située aux pieds des Carpates nous renseignent sur les dernières faunes de dinosaures d'Europe, qui vécurent il y a environ 70 millions d'années.

La découverte de restes de dinosaures en Transylvanie est liée à la vie d'un personnage hors du commun : le Baron Nopcsa. En 1895, Ilona Nopcsa, fille d'une noble famille hongroise, découvrit des restes fossiles de dinosaures sur les terres familiales, près de la ville de Szentpéterfalva, au cœur de la Transylvanie. Cette trouvaille suscita la vocation paléontologique de son frère Ferenc, alors âgé de 18 ans. Le jeune Nopcsa se mit alors à prospecter les affleurements du Bassin de Hateg et découvrit en peu de temps de nombreux spécimens d'un grand intérêt scientifique, parmi lesquels un crâne

complet d'*Hadrosaurus* (dinosaur à « bec de canard »).

Ferenc, qui était étudiant à Vienne, profita de l'un de ses voyages pour montrer les fossiles à son professeur, le célèbre géologue Eduard Suess. Celui-ci vit l'importance de la découverte. Les os provenaient de sédiments de la fin du Crétacé et appartenaient aux ultimes représentants des lignées de dinosaures européens. L'Académie des Sciences de Vienne organisa une campagne de fouilles paléontologiques dans la région, qui ne se firent malheureusement pas, faute de financement. Devant l'insistance de Nopcsa, Suess l'encouragea à étudier lui-même le matériel. Nopcsa qui n'avait pas de formation en paléontologie, accepta dans l'enthousiasme de sa jeunesse la proposition et décida de consacrer tous ses efforts à l'étude des dinosaures de Transylvanie. En juin 1899, il présenta son premier travail, l'étude d'un crâne d'*Hadrosaurus*, devant l'Académie des Sciences de Vienne. Ainsi commença une brillante carrière.

L'axe principal de l'œuvre paléontologique de Nopcsa est l'étude des faunes de vertébrés de Transylvanie et en particulier des dinosaures. Nopcsa organisa plusieurs campagnes de fouilles dans cette région et réunit une importante collection d'os de reptiles. Cette collection fut vendue plusieurs fois au Musée d'Histoire Naturelle de Londres (un des lots fut acquis en 1923 pour 200 livres sterling), où elle se trouve toujours. Une autre collection de fossiles ramassés à la même époque par le géologue hongrois O. Kadlec étudiés par Nopcsa est déposée à l'Institut géologique de Budapest. En 30 ans, Nopcsa publia plus d'une vingtaine d'articles scientifiques sur la géologie et la paléontologie transylvanienne. Il fut le premier à y découvrir une faune abondante de reptiles, comprenant dinosaures, crocodiles, tortues et ptérosaures.

Nopcsa identifia cinq espèces différentes de dinosaures, dont une espèce carnivore et quatre espèces végétariennes, ces dernières étant le saurionode titanosauridé *Magyarosaurus*, les ornithomorphes *Telmatosaurus* et *Rhabdodon* et l'ankylosaure *Struthiosaurus*. Une des principales caractéristiques de ces dinosaures était leur petite taille comparée à celle de leurs contemporains Nord-américains : *Telmatosaurus* et *Rhabdodon* mesuraient entre quatre et six mètres de long, tandis que *Struthiosaurus* dépassait à peine les trois mètres.

NANISME DÙ À L'ISOLEMENT

Nopcsa en déduisait que les dinosaures de Transylvanie étaient « nains » et reliait ce phénomène à la géographie insulaire de l'Europe à la fin du Crétacé. À cette époque, l'Europe était un chapelet d'îles séparées par une mer peu profonde et isolée des autres masses continentales par des barrières géographiques.

Nopcsa pensait que la restriction du territoire était responsable de la petite taille des dinosaures européens et comparait ce phénomène au nanisme qui affectait certains mammifères (éléphants, rhinocéros, cervidés, etc.) qui avaient peuplé les îles méditerranéennes pendant le Plio-Pleistocène (entre 5 millions d'années et 10 000 ans). Similairement l'isolement géographique expliquait le caractère primitif de beaucoup des éléments de la faune.

Dans un article publié à titre posthume, Nopcsa proposait que la faune herpétologique de Transylvanie était formée d'un mélange de formes primitives et spécialisées. Selon lui, les reptiles les plus primitifs étaient les survivants d'une faune européenne ancienne qui avait évolué de manière isolée, tandis que les plus spé-



1. Reconstitution du dinosaure cuirassé *Struthiosaurus* proposée par Nopcsa en 1929.

cialisés étaient des émigrants provenant des continents de l'hémisphère Sud.

Ce modèle paléobiogéographique au cachet résolument moderne n'eut pas d'écho au sein de la communauté scientifique de l'époque. Nopcsa rompaît avec les idées frustes alors en vogue et s'inscrivait dans une conception wegenerienne de la géologie. En effet, il défendait avec ferveur la théorie de la «Dérive des continents» proposée par l'Allemand Alfred Wegener. Ces idées, qui impliquaient le déplacement des continents les uns par rapport aux autres au cours des temps géologiques, étaient minoritaires au début du siècle. Nombre de paléontologues pensaient que les dispersions animales s'effectuaient à partir de «ponts continentaux». La contribution de Nopcsa était tout à fait originale et pour cette raison, il est aujourd'hui considéré comme un pionnier dans l'étude biogéographique des reptiles mésozoïques.

Après la mort de Nopcsa en 1933, la faune de vertébrés de Transylvanie tomba dans l'oubli durant un demi-siècle. Ce n'est qu'à la fin des années 1970 que des géologues et paléontologues roumains repriront les fouilles dans le Bassin de Hateg, en collaboration avec des scien-

tifiques étrangers.

En plus des reptiles décrits par Nopcsa, on a découvert d'autres groupes fossiles, notamment des poissons osseux, des amphibiens, des lézards, des mammifères multituerculés, ainsi que de nouveaux dinosaures carnivores et des œufs d'hadrosaures. La faune de vertébrés de Transylvanie est une des plus riches d'Europe et rivalise en diversité avec celles

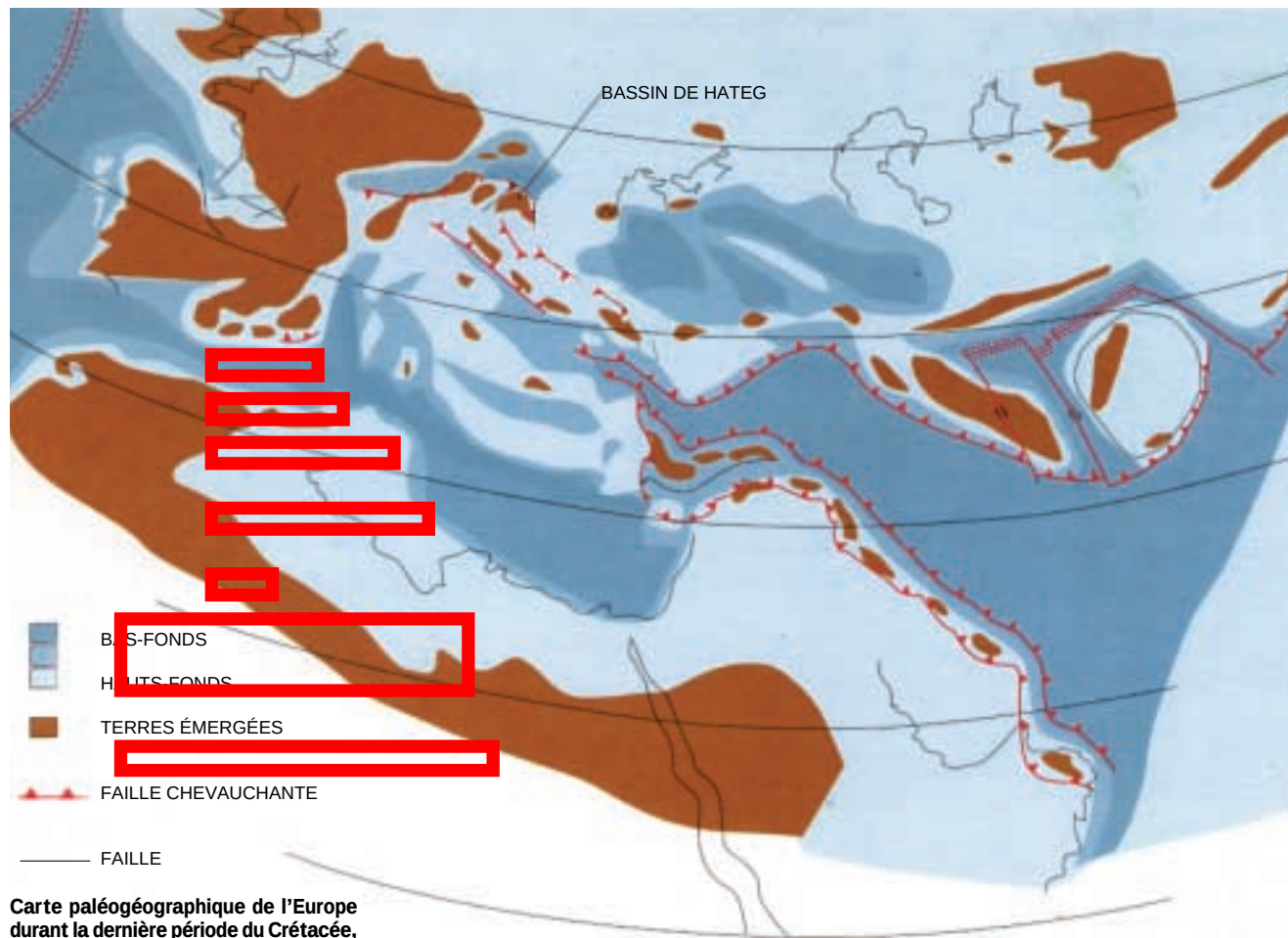
d'autres gisements de la fin du Crétacé, tels que la Provence, le Languedoc, la Catalogne et le Pays Basque.

Ces faunes nous renseignent sur la composition des écosystèmes continentaux peu avant la grande crise biologique qui sonna le glas des dinosaures et d'autres organismes à la fin de l'Ère Secondaire. L'extinction des dinosaures demeure un mystère mais, grâce en par-



2. Crâne de l'hadrosaure *Telmatorhinus*, une des premières découvertes de dinosaure en Transylvanie.

tie à la faune de Transylvanie, nous savons aujourd'hui que ces reptiles ont été capables de s'adapter aux changements climatiques qui se sont produits à la fin du Crétacé. Par ailleurs, les faunes européennes de l'époque apparaissent encore bien diversifiées, ce qui laisse supposer que les dinosaures n'étaient pas sur le déclin, tout au moins en nombre d'espèces. Bien que cela reste encore à démontrer, ceci



Carte paléogéographique de l'Europe durant la dernière période du Crétacée, il y a 65 millions d'années.

Ferenc Nopcsa (1877-1933)

Ferenc Nopcsa von Felső-Szilvas, plus connu sous le nom du Baron Nopcsa, est né le 3 mai 1877 à Sacel (Szacsal en hongrois) en Transylvanie. Ferenc était le neveu du Baron F. Nopcsa, maître de cour de l'Empereur François-Joseph et de l'Impératrice Elisabeth (à cette époque, la Transylvanie faisait encore partie de l'empire Austro-hongrois). Nopcsa montra dès sa jeunesse un grand intérêt pour les Sciences naturelles et fut diplômé de l'Université de Vienne en 1903. Sa situation financière confortable lui permit de se consacrer à la Science et de voyager à travers l'Europe pour visiter des musées et des centres de recherche. Son esprit d'aventurier le mena à plusieurs occasions jusqu'en Albanie, un pays inhospitalier qu'il dénommait «le coin d'ombre de l'Europe», mais qui le fascinait à tel point qu'il lui consacra un grand nombre d'études géologiques et ethnologiques.

Durant la Première Guerre mondiale, Nopcsa fut agent secret au service de l'empire Austro-hongrois et envisagea de devenir roi d'Albanie. En décembre 1918, la Roumanie annexait la Transylvanie et Nopcsa perdit la majeure partie de ses terres. À la suite d'une altercation avec des paysans roumains, il eut le crane fracassé et souffrit de troubles nerveux. Nopcsa compensa sa nature fragile par un caractère fort et arrogant.

L'image de Nopcsa qui prévalait dans certains cercles scientifiques est celle d'un personnage pittoresque, quelque peu dilettante, au mode de vie hétérodoxe lié à son goût pour l'aventure et ses tendances homosexuelles. Ceci semble au premier abord à l'opposé de l'image classique du paléontologue à la Indiana Jones». Il n'en demeure

pas moins que Nopcsa fut un grand aventurier qui donna la «poudrière» des Balkans, ce qui ne devait pas être moins dangereux que de traverser l'Ouest américain comme l'avaient fait Cope et Marsh. D'autre part, Nopcsa fut un scientifique de premier ordre et il est considéré comme l'une des figures les plus marquantes de la Paléontologie des Vertébrés de la première moitié du 20^{ème} siècle. Sa curiosité naturelle, sa vaste culture et sa connaissance de la littérature scientifique de l'époque lui permirent de s'intéresser à des thèmes variés des sciences naturelles.

Son héritage scientifique, une œuvre écrite en plusieurs langues (hongrois, allemand, anglais, français et albanais) comporte des contributions notables sur des sujets tels que la paléobiologie des reptiles, la paléobiogéographie, la géologie structurale et la biologie évolutionniste. L'activité scientifique développée par

Nopcsa fut récompensée par de nombreuses responsabilités. Il fut directeur de l'Institut géologique royal de Hongrie de 1925 à 1929, membre de l'Académie des Sciences de Hongrie et de nombreuses sociétés savantes, dont la prestigieuse Société Géologique de Londres.

Le 25 avril 1933, accablé par les problèmes de santé et les difficultés financières, Nopcsa décida de mettre fin à sa vie. Après avoir administré un somnifère à son ami et secrétaire albanais E.D. Bajazid, il le tua d'un coup de revolver, puis retourna l'arme contre lui. Ainsi finit l'ultime représentant d'une des plus anciennes familles nobles de Transylvanie et d'une des figures de la Science hongroise de ce siècle.

appuie l'hypothèse d'une disparition brutale et non graduelle des dinosaures.

Un siècle après les premières découvertes en Transylvanie, la faune de Vertébrés demeure un centre d'intérêt pour les paléontologues. En témoigne, un symposium sur le thème «les faunes de vertébrés mésozoïques d'Europe centrale» qui a lieu ce mois-ci à Deva, tout près des célèbres gisements à dinosaures.

Il est à parier que la figure et l'œuvre de Nopcsa y seront évoquées et que les paléontologues ne manqueront pas de rendre hommage à l'homme et au scientifique qui laissa son empreinte dans l'étude de la faune de Transylvanie, l'une des plus importantes du Crétacé final de l'Europe.

X. PEREDA et N. BARDET, Lab. de Paléontologie des Vertébrés, Paris VI ■

Un oiseau chinois du Jurassique?

La découverte, dans le Nord-Est de la Chine, d'un oiseau primitif suggère que les oiseaux ont vécu sur tout l'ensemble du Globe ou que leur origine est plus ancienne que le Jurassique supérieur.

Les dinosaures vivent encore parmi nous, par leurs descendants : les oiseaux. Le plus ancien oiseau connu de l'histoire de la Terre était jusqu'à présent *Archaeopteryx*, dont on a retrouvé dès 1860, une plume fossilisée. Ensuite sept autres squelettes ont été mis au jour dans les sédiments calcaires de Solnhofen en Allemagne datés du Jurassique supérieur (vieilles de 140 à 150 millions d'années). Cette antériorité d'*Archaeopteryx* n'est pas battue en brèche par des fossiles découverts dans des couches nettement plus anciennes datant du Trias - tel que *Protoavis* du Texas - car leur examen critique ne permet pas de les classer avec certitude parmi les oiseaux.

L'OISEAU CHINOIS

Les paléontologues ont découverts dans la province de Liaoning au Nord-Est de la Chine, les restes fossilisés d'un oiseau dont l'âge géologique (Jurassique supérieur) est voisin de celui d'*Archaeopteryx*. Ces fossiles ont été trouvés dans des sédiments lacustres de la formation du Yixian où les paléontologues chinois avaient déjà découvert en 1992 des restes fossilisés d'oiseaux des genres *Sinornis*, puis *Cathayornis*.

De même, on a signalé la découverte en Corée du Nord des restes fossilisés d'un oiseau dans des couches datant

du Jurassique : *Archaeopteryx* pourrait ne pas être le seul oiseau qui vivait au Jurassique supérieur, il y a quelques 140 millions d'années!

Le matériel fossile de la formation du Yixian est composé des squelettes de trois individus que le paléontologue Hou Lianhai de l'Académie Chinoise des Sciences à Beijing a baptisé *Confuciusornis sanctus*. Ces restes sont constitués du crâne, long d'environ cinq centimètres, des os du bras et de la jambe ainsi que du bassin. Des traces de plumes sont visibles au voisinage du membre postérieur, et on dispose en outre d'une série d'empreintes isolées de plumes d'oiseau qui ont été attribuées à la même espèce. Toutefois la colonne vertébrale, la ceinture scapulaire et un possible sternum manquent.

CONFUCIUSORNIS, UN OISEAU PRIMITIF

Confuciusornis a la taille du plus petit *Archaeopteryx* connu, celui d'Eichstatt. Le crâne est relativement petit, de profil triangulaire et creusé de grandes orbites. La surface de l'os de la partie avant de la mâchoire, apparemment dépourvue de dents, est creusée de nombreuses petites cavités et pores qui indiquent l'existence d'un ramphothèque ou bec corné. En pareil cas, *Confuciusornis* serait le plus ancien oiseau pourvu d'un bec et représenterait un stade d'évolution plus avancé qu'*Archaeopteryx* qui possédait une dentition bien définie. Au cours du processus de fossilisation, le crâne a cependant subi d'importantes déformations qui pénalisent l'interprétation de certaines caractéristiques.

En revanche l'allure du reste du squelette est relativement primitive et correspond au degré d'évolution d'*Archaeopteryx*, comme en attestent les os relativement massifs des ailes ainsi que l'humérus avec son extrémité supérieure exceptionnellement large. La main à trois doigts est pourvue de fortes griffes courbes et les os du métacarpe ne sont pas soudés entre eux. A la naissance de la main, un os carpien en forme de demi-lune est considéré à ce stade de développement comme la caractéristique-clé des dinosaures théropodes et des oiseaux primitifs.

Le squelette du membre postérieur est, lui aussi, fort primitif et ressemble beaucoup à celui de l'*Archaeopteryx* ; il se termine par un pied coureur à trois doigts. Les trois os du métatarse ne sont soudés que dans leur partie supérieure et le cinquième, comme dans le cas de l'*Archaeopteryx* et de nombreux thé-

ropodes, est recourbé en clavette. Enfin, le doigt supérieur, orienté vers l'arrière est, tout comme les autres doigts, pourvu de puissantes griffes recourbées.

On retrouve tout comme chez l'*Archaeopteryx* le plan anatomique caractéristique des théropodes. Le pubis est incliné vers l'arrière et n'était probablement pas soudé dans sa partie inférieure. Comme la colonne vertébrale et la ceinture scapulaire manquent, on suppose que la queue articulée n'était pas encore raccourcie pour donner un coccyx ou pygostyle tel qu'on le trouve chez les oiseaux du Crétacé inférieur. On ignore si cet animal était pourvu d'un sternum ossifié, mais l'humérus présente de grandes surfaces d'attache pour de puissants

muscles de vol qui étaient vraisemblablement ancrés dans un sternum adapté.

Il est malheureusement impossible de définir exactement l'âge du *Confuciusornis* par rapport à celui de l'*Archaeopteryx*, car la datation des sédiments du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur de Chine est sujette à controverse. Il est difficile d'établir une corrélation entre celles-ci et des couches d'origine marine telles que celles de Solnhofen, en raison des différences entre les fossiles caractéristiques qu'elles contiennent et qui sont représentatifs de la faune soit terrestre, soit marine.

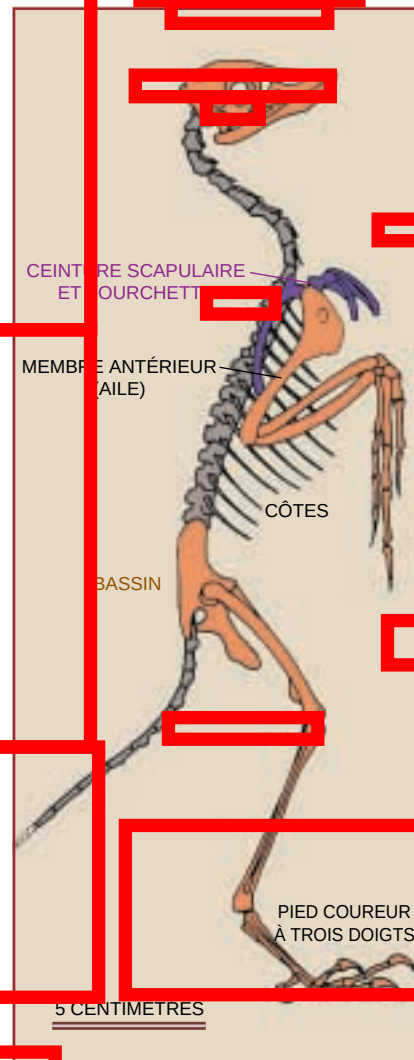
JURASSIQUE DU CRÉTACÉ

La formation de Yixian, qui mesure entre 1000 et 3000 mètres d'épaisseur, est partiellement constituée de roches d'origine volcanique qui contiennent des isotopes radioactifs permettant une datation absolue. Ainsi, la méthode au potassium/argon donne un âge de 137 ± 7 millions d'années, et la méthode au rubidium/strontium $142,5 \pm 4$ millions d'années. Mais les tables chronologiques actuellement utilisées font remonter la limite entre le Jurassique et le Crétacé soit à 135 millions d'années, soit à 145 millions d'années. Dans ces conditions, on peut rattacher la formation de Yixian soit au Jurassique supérieur, soit au Crétacé inférieur. D'un autre côté, l'attribution des calcaires lithographiques de Solnhofen au Jurassique supérieur ou plus exactement au Tithonien inférieur repose sur la présence de fossiles marins caractéristiques tels que l'ammonite *Hybonoteras hybonotum*, et l'âge absolu de cette formation serait, d'après les tables chronologiques, compris entre 140 et 150 millions d'années.

Ce mélange d'une structure évoluée du crâne et du reste du squelette primitif incite à penser que *Confuciusornis* représenterait un stade d'évolution intermédiaire entre *Archaeopteryx* et les oiseaux du Crétacé inférieur tels que *Sinornis* et *Iberomesornis*, et qu'il aurait vécu dans la période de transition entre le Jurassique supérieur et le Crétacé inférieur.

Cette découverte ainsi que celles d'autres oiseaux du Jurassique en Corée du Nord et en Chine indiquent que dès la fin du Jurassique supérieur, des lignées différentes d'animaux à plumes capables de voler existaient en Europe et en Extrême-Orient. Aussi les oiseaux, soit auraient des ancêtres plus anciens qu'on ne le supposait, soit se seraient répandus très rapidement à la fin du Jurassique.

Peter WELLNHOFFER, Conservateur du Musée de Paléontologie de Munich ■



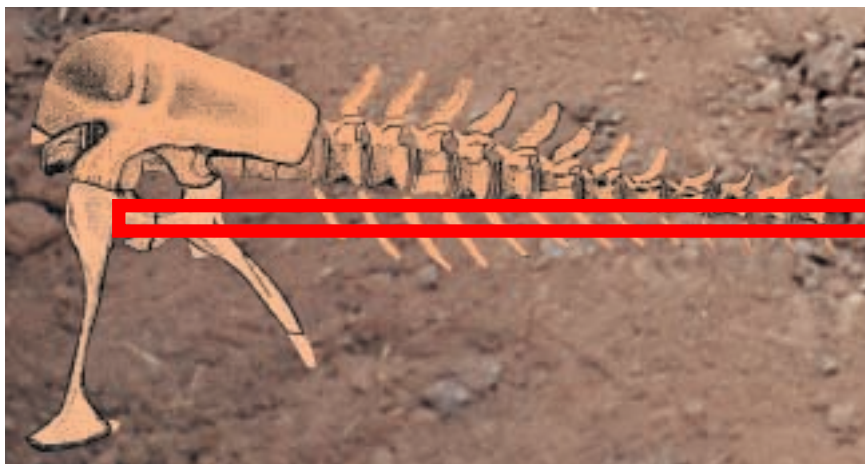
Reconstitution du squelette de *Confuciusornis sanctus* de la formation de Yixian dans la province de Liaoning au Nord-Est de la Chine. La colonne vertébrale et la ceinture scapulaire ne sont qu'hypothétiques et ne figurent pas parmi les restes fossiles retrouvés par les paléontologues chinois.

Les plus vieux tyrannosaures

Découverts en Thaïlande, ils allongent d'au moins 20 millions d'années l'histoire de ces dinosaures carnivores.

Un des dinosaures les plus célèbres est sans conteste *Tyrannosaurus rex*, un énorme carnivore atteignant une longueur de 12 mètres, qui vivait en Amérique du Nord il y a un

peu plus de 65 millions d'années. Outre le fameux *Tyrannosaurus rex*, on connaît d'autres membres de la famille des Tyrannosauridés (*Tarbosaurus*, *Albertosaurus*, etc.), qui diffèrent les uns des autres



Reconstitution du bassin et d'une partie de la queue de *Siamotyrannus isanensis*.



Le site où furent découverts les ossements de *Siamotyrannus isanensis*, dans les collines de Phu Wiang (Nord-Est de la Thaïlande).

surtout par leur taille et leur robustesse. Ces animaux vivaient en Amérique du Nord et en Asie à la fin du Crétacé, il y a 65 à 83 millions d'années environ.

Les tales fabuleuses de ces tyrannosaures excitent notre curiosité, et les paléontologues souhaitent évidemment connaître leur filiation : les ancêtres des géants étaient-ils eux-mêmes gigantesques ? Hélas, on ne savait jusqu'ici que très peu de choses de l'histoire plus ancienne des tyrannosaures. Quelques restes fragmentaires trouvés dans le désert de Gobi et dans l'Ouest américain témoignent de leur existence il y a environ 95 millions d'années, mais les roches plus anciennes n'avaient pas encore livré de fossiles attribuables à des tyrannosaures.

Une découverte réalisée en Thaïlande par les membres de la Mission paléontologique franco-thaïlandaise apporte désormais des informations sur des stades bien plus anciens de l'évolution des tyrannosaures. Dans les collines de Phu Wiang, sur le plateau de Khorat (Nord-Est de la Thaïlande), les paléontologues ont trouvés des éléments d'un squelette appartenant à un tyrannosaure primitif, plus vieux d'une vingtaine de millions d'années que le plus ancien tyrannosaure jusqu'ici signalé. Les grès et argiles rouges de la Formation Sao Khua, riches en restes de dinosaures, sont en effet datés par les grains de pollen qu'ils contiennent du Crétacé inférieur, leur âge étant compris entre 120 et 130 millions d'années.

Le squelette incomplet trouvé à Phu Wiang en 1993 se compose d'une partie de la colonne vertébrale (y compris un bon nombre de vertèbres de la queue) et du bassin. C'est surtout ce dernier élément, composé, comme chez tous les dinosaures, de trois os, qui a permis l'attribution à la famille des Tyrannosauridés. On observe en effet sur les os du bassin une combinaison de caractères osseux connus chez les tyrannosaures de la fin du Crétacé, et qui permet d'attribuer ce nouveau fossile à cette famille de dinosaures carnivores. Mais le spécimen thaïlandais présente aussi, dans le bassin et les vertèbres, un certain nombre de caractères peu évolués : ils montrent qu'il s'agit d'un représentant très primitif de la famille, en accord avec son grand âge géologique.

Le tyrannosaure de Thaïlande présente donc un ensemble de caractères anatomiques spécifiques et a été attribué à un nouveau genre et une nouvelle espèce, *Siamotyrannus isanensis* (le nom du genre fait allusion à la fois à l'appartenance aux tyrannosaures et au Siam, ancien nom de la Thaïlande, alors que le nom de l'espèce se réfère à la provenance géographique précise du fossile,

Dinosaures du Gondwana

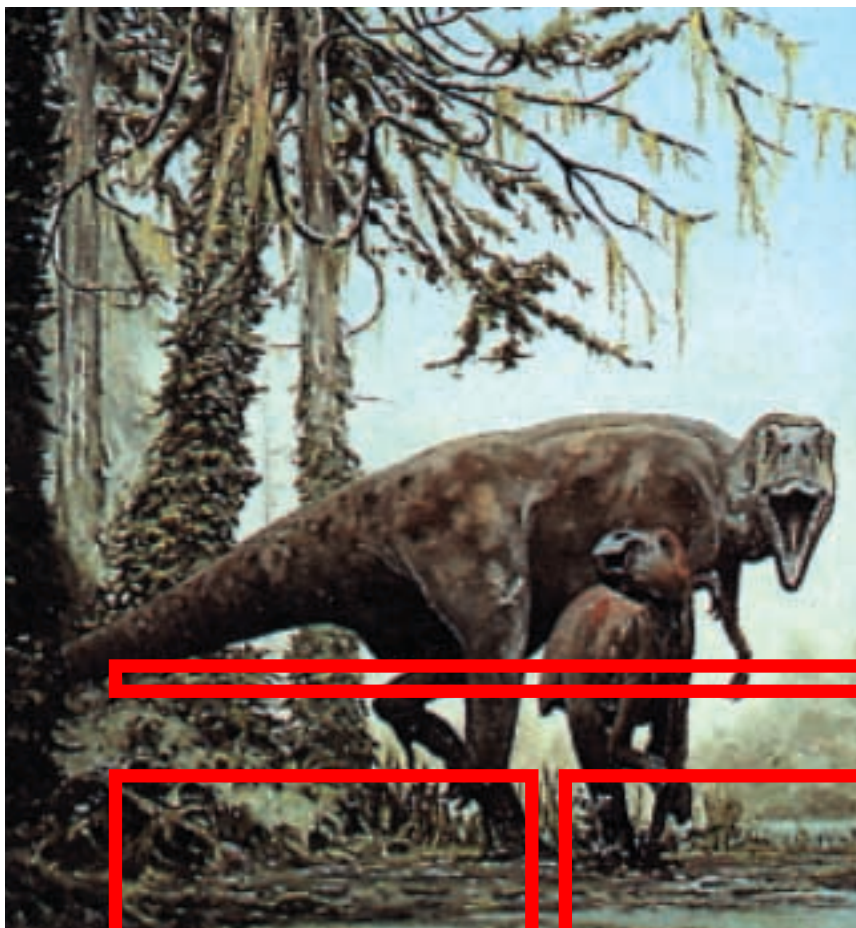
Tyrannosaurus rex est-il doublement détrôné ?

Paul Sereno, de l'Université de Chicago, a découvert dans la région de Kenil Kem au Maroc un nouveau spécimen de *Carcharodontosaurus* («le reptile aux dents de requin»), dinosaure carnivore dont la tête mesure 1,6 mètre. Cette découverte succède à celle, annoncée l'année dernière, de *Giganotosaurus* en Argentine. Le géant sud-américain et son analogue africain, parallèlement à une autre découverte marocaine de Paul Sereno, un espèce de coelurosaurien plus petite appelée *Deltadromeus* ou le «coureur du Delta», donnent des informations de la paléobiogéographie il y a une centaine d'années.

Carcharodontosaurus et *Giganotosaurus* étaient plus lourds et avaient la tête proportionnellement plus grosse que le fameux *Tyrannosaurus rex* (bien que ce dernier ait des pattes arrières plus longues), mais les paléontologues ne savent pas encore qui était réellement le plus grand. Ils vivaient tous deux à la même époque, il y a environ 90 millions d'années, et appartenaient à la même famille de dinosaures carnivores, les carcharodontosauridés. La distribution de ces théropodes, dont un troisième représentant, contemporain de *Carcharodontosaurus* et *Giganotosaurus*, provient d'Amérique du Nord, indique que les carcharodontosauridés avaient, au Crétacé inférieur, colonisé les continents des deux hémisphères.

À la fin du Jurassique, il y a quelque 150 millions d'années, l'ancien supercontinent, la Pangée, se divise en deux masses, la Laurasia au Nord et le Gondwana au Sud. Les affinités des dinosaures marocains avec des formes nord- et sud-américaines, suggèrent qu'à la fin du Jurassique et durant le Crétacé inférieur, les faunes se sont échangées alors qu'à cette époque la tectonique de la Pangée n'était pas encore achevée.

Par conséquent, mais différents : la composition de la nouvelle faune africaine de dinosaures est distincte de celle de faunes contemporaines d'Amérique du Nord et du Sud. Ainsi le provincialisme de ces faunes est manifeste dès le début du Crétacé supérieur, et, il y a quelques 90 millions d'années, la Pangée était disloquée et les barrières océaniques séparaient la Laurasia et le Gondwana. La Terre à cette époque ressemblait déjà à un patchwork de continents isolés.



3. Reconstitution d'*Albertosaurus*, tyrannosaure du crétacé inférieur d'Amérique du Nord.

Isan étant le nom local du Nord-Est de la Thaïlande). *Siamotyrannus isanensis* était un dinosaure d'une taille respectable, puisqu'on peut estimer sa longueur totale à environ 6,5 mètres, mais il était encore loin d'atteindre la douzaine de mètres de certains de ses successeurs.

LES ANCÊTRES DES TYRANNOSAURES

Siamotyrannus isanensis nous renseigne ainsi sur les débuts de l'histoire des tyrannosaures. Ses caractères indiquent que les tyrannosaures ne sont pas les descendants des grands dinosaures carnivores du Jurassique (la période qui précède le Crétacé), comme *Allosaurus*, mais sont plutôt apparentés aux «coelurosauriens», un ensemble de dinosaures carnivores généralement de petite taille, ainsi que divers chercheurs l'avaient déjà suggéré.

Le nouveau dinosaure thaïlandais autorise une reconstitution de l'histoire biogéographique des tyrannosaures. Ceux-ci ne sont connus, notamment au Crétacé supérieur, qu'en Amérique du Nord et en Asie (Mongolie et Chine sur-

tout). On pouvait donc se demander si la famille était apparue en Amérique du Nord, pour ensuite gagner l'Asie, ou vice versa. La découverte de *Siamotyrannus* joue en faveur d'une origine asiatique des tyrannosaures. La seule région du monde où soient actuellement connus des tyrannosaures du Crétacé inférieur est l'Asie et, plus précisément, l'Asie du Sud-Est. À la même époque vivaient sur les autres continents, y compris l'Amérique du Nord, d'autres grands dinosaures carnivores, qui n'étaient pas des tyrannosaures. On suppose donc que c'est en Asie qu'a débuté l'évolution des tyrannosaures, et que ce n'est que plus tard, il y a peut-être une centaine de millions d'années, qu'ils ont atteint l'Amérique du Nord. Il est probable que ce passage s'est fait par la région de l'actuel détroit de Bering, qui pendant le Crétacé fut à diverses reprises une zone émergée, sorte de «pont continental» permettant les migrations de dinosaures et d'autres animaux entre l'Asie et l'Amérique du Nord.

E. BUFFETAUT (CNRS, Paris)

V. SUTEETHORN (Bangkok)

H. TONG (Paris) ■

Le soleil et la peau

LOUIS DOBERT (1)

Le soleil est indispensable à la santé de la peau, mais l'excès est nuisible. Les ultraviolets A, que l'on croyait inoffensifs, sont aussi nocifs que les ultraviolets B : ils déclenchent aussi des cancers de la peau, mais par des mécanismes différents.

Au cours de centaines de millions d'années, l'énergie des rayons solaires a entretenu des réactions chimiques qui ont conduit, il y a environ 3,5 milliards d'années, à l'apparition des premiers organismes vivants. Des bactéries photosynthétiques qui produisent l'oxygène, aux plantes dont la fonction chlorophyllienne transforme le gaz carbonique en oxygène, la vie dépend de l'énergie solaire. Certains effets du soleil sur la peau humaine témoignent de cette dépendance bénéfique.

Bénéfique, sauf pour les personnes trop sensibles au soleil, et l'histoire des colons britanniques d'Australie illustre que nous ne sommes pas tous égaux devant le soleil. Au XVIII^e siècle, le gouvernement britannique condamnait à la peine de mort les crimes et les délits, vols ou contrefaçons. Quand des mesures de clémence salutaires commuèrent les peines, les prisons furent vite surchargées. Aussi, vers 1780, les autorités britanniques décidèrent-elles de bannir les criminels dans des contrées éloignées. En quelques dizaines d'années, la côte Est de l'Australie fut peuplée de colons britanniques et irlandais à la peau claire, et souvent blonds.

Aujourd'hui, leurs descendants souffrent de cancers de la peau, plus que toute autre communauté ailleurs dans le monde.

Les Aborigènes d'Australie qui ont la peau plus foncée. Comment expliquer cette sensibilité particulière? Comment le soleil agit-il sur la peau? Son action est-elle toujours néfaste? Nombre de ces questions sont aujourd'hui résolues; éducation et prévention devraient limiter la multiplication des cancers de la peau.

Ultraviolets A et B

Le rayonnement solaire est constitué de rayons ultraviolets A et ultraviolets B. Avant d'expliquer leurs modes d'action, examinons les différents constituants de la peau.

L'épiderme se subdivise en quatre couches : la couche basale contient une épaisseur de cellules souches, les kératinocytes, qui migrent vers la couche cornée, la surface de l'épiderme. La forme et la fonction de ces cellules changent. Dans la couche basale, les kératinocytes ont une forme cubique; ils adhèrent à la membrane basale qui sépare l'épiderme du derme sous-jacent. Outre les kératinocytes, la couche basale renferme des mélanocytes, les cellules qui produisent la mélanine, le pigment de la peau.

De plus, la couche de Malpighi est constituée de plusieurs couches de kératinocytes arrondis. La couche granuleuse est formée de deux à trois couches de kératinocytes aplatis. La couche cornée est faite de cellules mortes hexagonales, aplaties et régulièrement ordonnées, comme des écailles microscopiques : ce sont les cornéocytes. La cohérence et le caractère hydrophobe des cornéocytes confèrent à la couche cornée sa fonction de barrière protectrice. En surface, la couche cornée est constituée de cellules mortes hexagonales, aplaties et régulièrement ordonnées, comme des écailles microscopiques : ce sont les cornéocytes. La cohérence et le caractère hydrophobe des cornéocytes confèrent à la couche cornée sa fonction de barrière protectrice. En surface, la couche cornée est constituée de cellules mortes hexagonales, aplaties et régulièrement ordonnées, comme des écailles microscopiques : ce sont les cornéocytes. La cohérence et le caractère hydrophobe des cornéocytes confèrent à la couche cornée sa fonction de barrière protectrice.

Les rayons ultraviolets B sont partiellement responsables du caractère ambivalent du soleil, indispensable, mais nocif à trop forte dose. Ce sont les plus énergétiques des rayons ultraviolets qui parviennent sur la Terre. Le rayonnement solaire contient aussi des ultraviolets A dont la longueur d'onde est comprise entre 320 et 400

nanomètres; les ultraviolets B ont une longueur d'onde comprise entre 290 et 320 nanomètres. Les ultraviolets A sont arrêtés par le verre, mais, quand ils pénètrent dans la peau, ils sont absorbés par les cellules de l'épiderme et du derme et y créent des dommages notables. Les ultraviolets A sont moins absorbés et traversent le verre; ils sont, en outre, environ 100 fois plus abondants que les ultraviolets B, à proximité du sol.

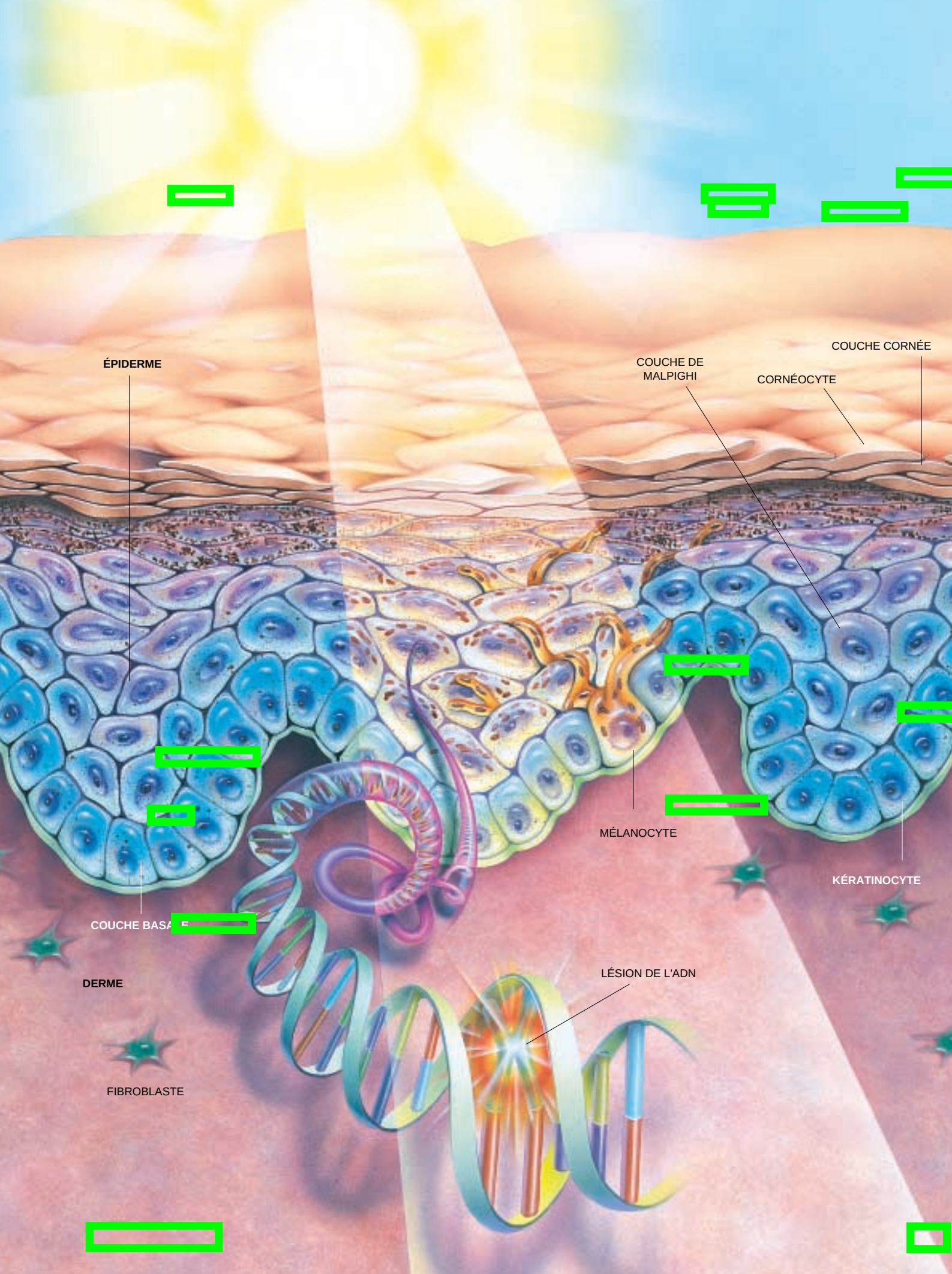
Les bienfaits du soleil

Les ultraviolets B transforment une partie du cholestérol en vitamine D₃, molécule elle-même inactivée, puis dans le rein, en vitamine D active : cette dernière prévient le rachitisme. De plus, la vitamine D améliore la différenciation terminale de l'épiderme, garantissant la production de cellules cornées; elle a aussi une action immunosuppressive qui calme des mécanismes inflammatoires cutanés, et elle a des propriétés antitumorales.

Pourtant l'excès de vitamine D est toxique, car il entraîne une augmentation excessive de la concentration sanguine en calcium. Les ultraviolets B favorisent la synthèse de cette vita-

1. LE SOLEIL calme certaines inflammations de la peau et favorise la formation d'une barrière cutanée de bonne qualité. Toutefois, les rayons ultraviolets B peuvent aussi provoquer l'apparition de cancers de la peau.

Quand une cellule anormale n'est pas éliminée et qu'elle échappe aux mécanismes qui protègent l'organisme, elle peut se multiplier sans frein et donner un cancer de la peau. Les kératinocytes sont responsables des cancers de la peau les plus fréquents. Les mélanocytes dégénèrent en mélanomes, plus rares, mais plus agressifs.



ÉPIDERME

COUCHE DE
MALPIGHI

COUCHE CORNÉE

CORNÉOCYTE

COUCHE BASALE

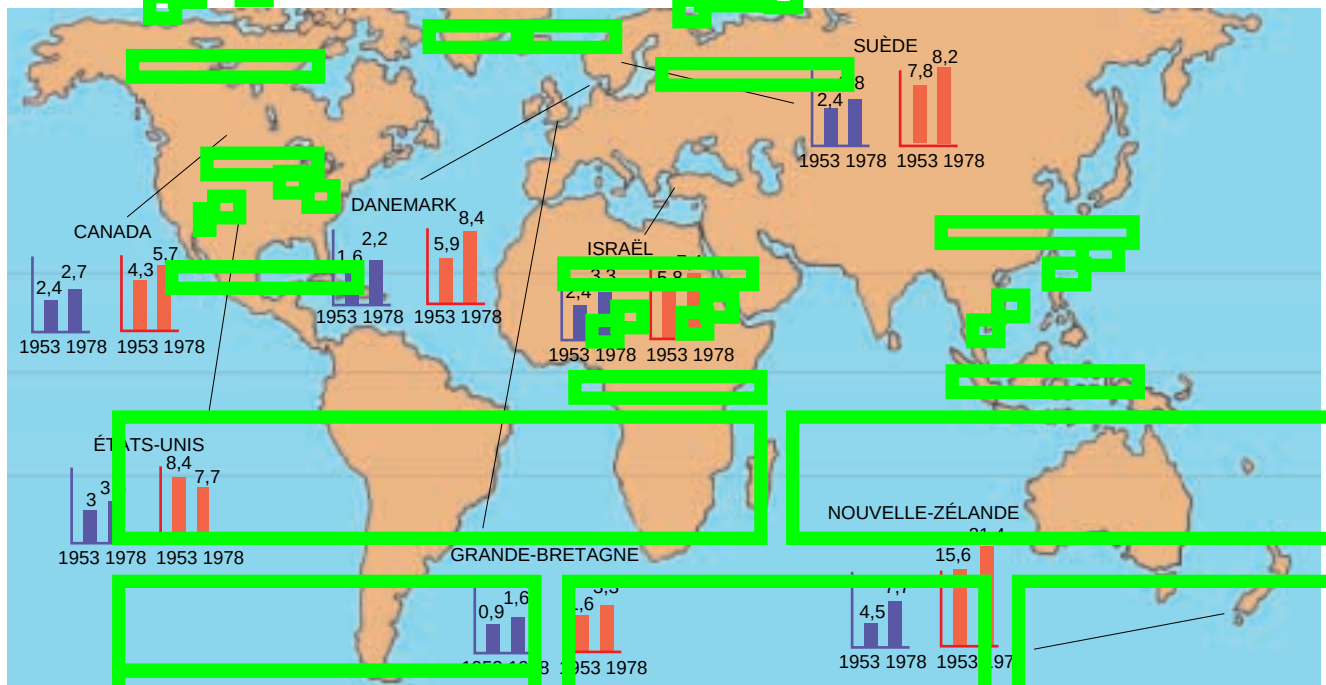
MÉLANOCYTE

KÉRATINOCYTE

DERME

FIBROBLASTE

LÉSION DE L'ADN



2. AUGMENTATION DU NOMBRE DES MÉLANOMES dans des pays où les habitants sont sensibles. On a comparé le nombre de nouveaux cas de mélanomes pendant les années 1953-1963 et pendant les années 1978-1982 pour les hommes (en bleu) et pour les femmes (en rouge). Entre ces deux périodes, le nombre

de cas a notablement augmenté dans les pays nordiques, en Nouvelle-Zélande et en Australie. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de nouveaux cas enregistrés chaque année pour 100 000 habitants. En France, aujourd'hui, on dénombre annuellement un dizaine de nouveaux cas pour 100 000 habitants.

mine, mais ils en transforment aussi la majeure partie en dérivés inactifs, ce qui évite tout excès.

L'exposition au soleil, et notamment aux ultraviolets B, favorise la formation d'une barrière cutanée de bonne qualité. On a constaté qu'appliqués sur la peau avant l'été différents produits déclenchent une irritation; après l'été, l'irritation déclenchée est moindre, car la barrière cutanée est plus efficace: les produits irritants pénètrent moins profondément dans la peau. Chaque année, le soleil restaure la barrière cutanée.

Les ultraviolets A et B inhibent les fonctions immunologiques de la peau, notamment diverses réactions allergiques. Ainsi, l'état des enfants souffrant d'eczéma rebelle s'améliore au soleil. La lumière solaire a aussi un effet thérapeutique sur le psoriasis. Les personnes atteintes de psoriasis ont une inflammation chronique de la peau, laquelle entraîne une desquamation accélérée et la formation de plaques blanches, accumulation de cellules épidermiques mortes. Sous l'action du soleil, l'état de santé de près de trois personnes sur quatre atteintes de psoriasis est amélioré.

D'autres maladies inflammatoires, tel l'acné, sont également soulagées

par le soleil. En effet, l'exposition à la couche cornée, le soleil augmente la formation de comédons (le sébum sécrété par les glandes sous-cutanées s'accumule alors et forme des comédons ou « points noirs »); dès la fin des beaux jours, alors que l'effet anti-inflammatoire disparaît, les comédons qui se sont développés pendant l'été aggravent l'acné.

On a récemment montré que les ultraviolets B favorisent la formation, dans l'épiderme humain, de molécules proches de celles produites par les cellules solaires et qui sont des analogues naturels de la morphine. La libération d'endorphines serait-elle responsable de la sensation de bien-être que l'on éprouve quand on s'expose au soleil? Expliquerait-elle que certaines personnes soient des « drogués du soleil »? Ces questions restent à élucider.

Les dangers des ultraviolets A

Toutefois, le soleil, aliment de la peau nécessaire à la qualité de la vie, a des effets secondaires toxiques, et l'abus entraîne des dommages partiellement irréversibles qui s'accumulent. Les premiers dommages sont les coups de soleil dus aux ultraviolets B: ils tuent

les brunes cellules épidermiques et la peau brune. Ce n'est pas le fait des ultraviolets A, qui ont été, pour cette raison, longtemps considérés comme inoffensifs car ils n'ont pas d'effet aigu dans des conditions normales d'exposition.

Les ultraviolets A et B, quand ils sont absorbés par une molécule, perturbent le fonctionnement des cellules. Les ultraviolets B sont particulièrement toxiques: ils ont pour cible à la fois l'ADN et les protéines, de sorte qu'ils modifient le code génétique cellulaire et toute la machinerie cellulaire. En revanche, les ultraviolets A ne sont ni absorbés ni par l'ADN ni par les protéines. Il faut 1 000 fois plus d'ultraviolets A que d'ultraviolets B pour entraîner les mêmes dommages aigus et pour provoquer des tumeurs de la peau chez l'animal. Selon ces données, les ultraviolets A semblaient inoffensifs.

Il n'en est rien: il y a environ cinq ans, on a découvert que les ultraviolets A déclenchent la formation de radicaux libres dans le cytoplasme des cellules. Ces radicaux libres sont de puissants oxydants qui attaquent divers composants cellulaires, tels les lipides, les protéines et l'ADN. Ils créent des mutations sur l'ADN et

entravent le fonctionnement cellulaire. Ainsi, les ultraviolets A endommagent-ils les cellules en créant le biais de radicaux libres. Cette toxicité indirecte est presque aussi importante que la toxicité des ultraviolets B, lesquels agissent à la fois directement et indirectement. Patrice Morlière, à l'hôpital Saint-Louis, a montré que les ultraviolets A créent des radicaux libres seulement dix fois plus que les ultraviolets B.

Simultanément, l'équipe d'Alain Sarasin, à l'hôpital Gustave Roussy, à Villejuif, a découvert que les ultraviolets A créent des mutations dans les cellules de la peau humaine dès que la dose est 700 fois supérieure à la dose toxique des ultraviolets B.

Sur une plage, la quantité d'ultraviolets A captée par la peau est 100 fois supérieure à la quantité des ultraviolets B, et ces ultraviolets A pénètrent beaucoup plus profondément dans la peau que les ultraviolets B. Ces derniers sont, pour la plupart, absorbés par la couche cornée : ainsi, les cellules de l'épiderme reçoivent environ 700 fois plus d'ultraviolets A que d'ultraviolets B. Or, les mutations sont dangereuses dans la région de l'épiderme où sont localisées les cellules germinatives. Ainsi les mutations cellulaires sont presque autant dues aux ultraviolets A qu'aux ultraviolets B.

Le pouvoir cancérogène des ultraviolets A

Les ultraviolets A jouent un rôle direct dans la formation des cancers cutanés, et pourraient même potentialiser la toxicité des ultraviolets B. Ils seraient en grande partie responsables de la survenue du mélanome malin.

On distingue trois types de cancers de la peau : les cancers basocellulaires, les cancers spinocellulaires et les mélanomes malins. Les cancers basocellulaires sont localisés et ne métastasent jamais. Ils se présentent comme des plaques ou des nodules sur la peau ou comme des zones scléreuses (durcies). Ils guérissent toujours après avoir été traités par ablation chirurgicale.

Les cancers spinocellulaires ont un aspect de croûte ou de bourgeons de peau qui se développent rapidement, saignent facilement et métastasent parfois. Ils sont traités par la

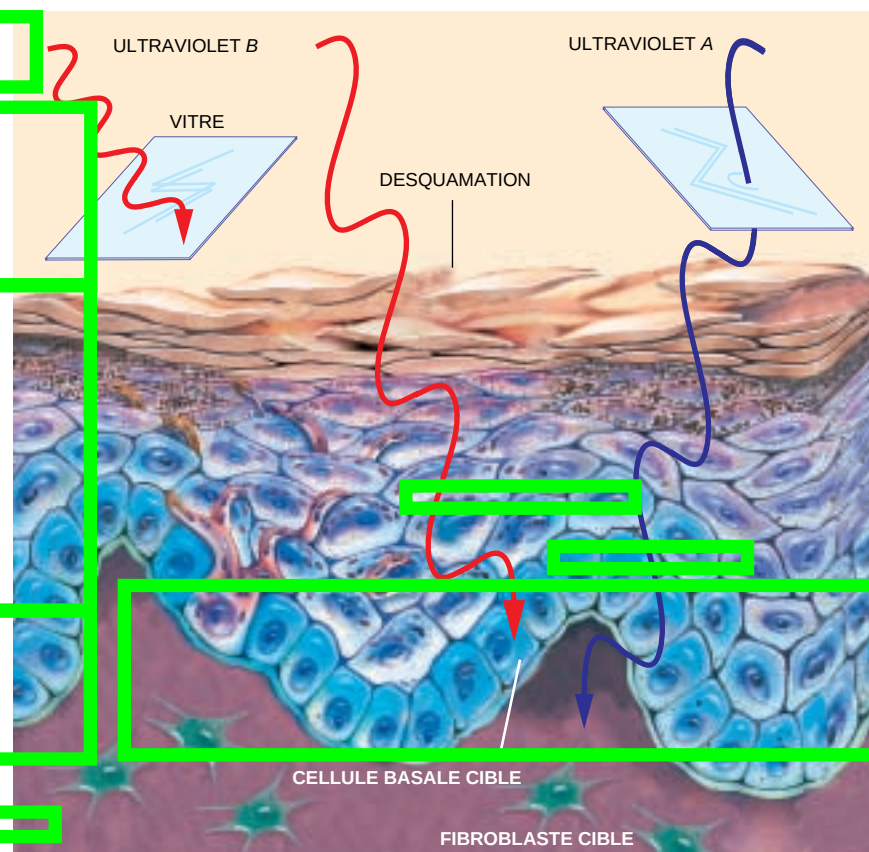
chirurgie et nécessitent parfois radio- et chimiothérapie. Les carcinomes cutanés sont dus à l'expositions chroniques au soleil, et leur fréquence augmente avec l'irradiation. Ce sont les cancers des sujets qui travaillent en plein air, les marins et les cultivateurs par exemple.

En revanche, le cancer des mélanomes, le mélanome malin, est le cancer des « cols blancs », le cancer des personnes qui travaillent dans un bureau et qui, dès les beaux jours, exposent leur peau au rayonnement solaire. Les études épidémiologiques ont montré que les sujets à risque de mélanome malin sont (1) les sujets à peau très blanche, (2) ceux qui apparaissent, à la suite d'expositions solaires, de nombreux grains de beauté normaux, (3) les sujets très exposés au soleil et ayant reçu de nombreux coups de soleil pendant leur jeunesse et enfin, (4) les sujets ayant d'autres membres de leur famille souffrant de mélanome.

Un mélanome malin se présente sous la forme d'une tache pigmentée plate, d'un grain de beauté dont la surface augmente, qui devient asymétrique, dont le bord est festonné et la couleur hétérogène. Tout grain de beauté qui se modifie doit inciter le patient à consulter son médecin.

Le rôle des ultraviolets A est géré par des corrélations entre occurrence des mélanomes et mesures des caractéristiques du rayonnement solaire. Ces études menées en Norvège et en Australie montrent que le nombre de mélanomes malins dépend plus de l'augmentation de l'exposition aux ultraviolets A qu'aux ultraviolets B.

On connaît un poisson qui, irradié par des ultraviolets A, développe des mélanomes malins. En étudiant ce poisson, on a montré que les ultraviolets A sont seulement dix fois moins efficaces que les ultraviolets B pour déclencher un mélanome malin. Comme ils sont 100 fois plus abondants que les ultraviolets B, on conçoit qu'ils puis-



3. LES ULTRAVIOLETS A ET B n'ont pas le même comportement : les UVB sont responsables des coups de soleil, mais sont arrêtés par le verre. Au contraire, les UVA traversent le verre et pénètrent profondément dans la peau lésant les cellules de l'épiderme et aussi les cellules du derme, aboutissant à la formation de rides. Les ultraviolets A et B atteignent la couche de cellules germinatives qui, en se différenciant, donnent les cellules des différentes couches de l'épiderme. Plus la cellule endommagée est située en amont dans la chaîne de la différenciation cellulaire, plus les conséquences risquent d'être graves.

sent participer à la genèse des mélanomes malins chez l'homme. Toutefois, il reste à établir que ce poisson est un modèle prédictif des réactions physiologiques humaines.

Si le mélanome est un cancer, c'est que les carcinomes, il est beaucoup plus grave, puisqu'il tue une fois sur quatre. De surcroît, sa fréquence double tous les dix ans. C'est le cancer le plus fréquent pour les 25-30 ans. Si la situation continue à s'aggraver, une personne née en l'an 2000 aura 1 risque sur 75 de développer un mélanome malin au cours de son existence.

Face à ce risque, nous ne sommes pas égaux et les sujets à peau claire sont plus exposés. Leur peau contient des mélanines renfermant du soufre, les phéomèles, qui sont plus sensibles de la couleur rousse, mais protègent mal du soleil : ces mélanines déclenchent des mutations.

Les libres qui potentialisent les effets du soleil. Ce résultat biologique corrobore une observation clinique : les sujets dont la peau est claire, quoi qu'ils fassent, ne «bronzent» pas ; la faible pigmentation qu'ils obtiennent ne les

protège jamais efficacement. Les dommages chroniques dus au soleil. La mélanine des personnes rousses serait de mauvaise qualité et n'assurerait pas la fonction protectrice de la peau. Elle absorbe les ultraviolets sans causer de dommages.

Ainsi, les ultraviolets A, directs des ultraviolets B, et indirects seulement des ultraviolets A, s'ajoutent. Ces mutations sont en grande partie réparées : diverses protéines reconnaissent les mutations sur l'ADN, l'ADN est réparé, les zones mutées, d'autres encore reconstruisent un ADN de bonne qualité.

L'élimination des fragments d'ADN comme l'a montré Barbara Gilchrist à Boston : le bronzage est une cicatrice, conséquence des lésions causées aux cellules par le soleil.

Lorsque l'exposition au soleil est trop intense, les mécanismes de réparation sont débordés, et les mutations s'expriment. Ces mutations sont le premier stade de la cancérogenèse. Un can-

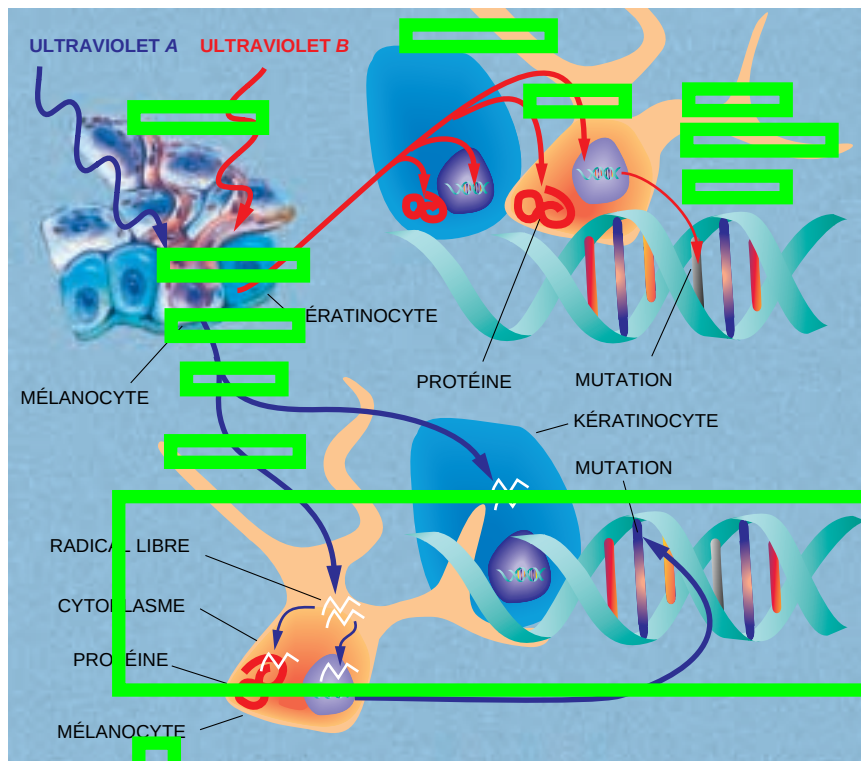
cer ne peut apparaître quand une cellule se multiplie sans contrôle. Cette situation peut se produire dans deux cas : une mutation active un oncogène, c'est-à-dire un gène qui favorise la multiplication cellulaire ; ou elle inactive un gène qui bloque cette multiplication, c'est-à-dire un gène suppresseur.

Diverses équipes ont montré que le gène *p53* participerait au développement des carcinomes cutanés. Normalement, le gène *p53* veille à l'intégrité du génome cellulaire : si survient une mutation, il empêche la cellule atteinte de se diviser tant que la lésion n'a pas été réparée. Quand la lésion est trop importante, il déclenche le suicide de la cellule (apoptose). Une mutation dans le gène *p53* facilite la survie de cellules anormales ; les cellules lésées, qui se multiplient sans frein, subissent de nouveaux remaniements qui favorisent la transformation tumorale.

Dans le cas du mélanome malin, on a mis en évidence des altérations sur le chromosome 9, qui perturbent le contrôle du cycle cellulaire, favorisant notamment la multiplication des cellules. Toute modification du génome due aux ultraviolets contribue au développement de cellules malignes qui sont d'autant moins facilement éliminées que le soleil abaisse la surveillance immunitaire cutanée.

Soleil et système immunitaire

Les réactions immunitaires de la peau sont déclenchées par les cellules de Langerhans ; ces cellules, qui naissent dans la moelle osseuse et migrent jusque sous la couche cornée, sont pourvues de longs prolongements nommés dendrites. Elles repèrent les substances étrangères et déclenchent l'alarme du système immunitaire. Les ultraviolets B et les ultraviolets A inhibent les fonctions des cellules de Langerhans. Ils peuvent agir directement, par exemple, le cytosquelette de ces cellules, ou indirectement, sous l'action des ultraviolets B, les kératinocytes de l'épiderme libèrent des substances qui inhibent les réactions du système immunitaire. Ces substances immunosuppressives sont l'acide urocanique et des cytokines. Sous l'action du soleil, l'acide uroca-



4. LES MÉCANISMES D'ACTION DES ULTRAVIOLETS A ET B diffèrent. Les ultraviolets B (en haut) créent directement des mutations sur l'ADN des mélanocytes, les cellules responsables de la pigmentation de la peau, et des kératinocytes. Au contraire, les ultraviolets A produisent des radicaux libres (en bas) dans le cytoplasme cellulaire. Ces radicaux libres, très oxydants, endommagent aussi les protéines cytoplasmiques et créent des mutations sur l'ADN. Lorsqu'un mélanocyte ou un kératinocyte contenant une mutation n'est pas éliminé par le système immunitaire, il risque de se multiplier et de déclencher un mélanome malin dans le premier cas et un carcinome dans le second.

nique donne un dérivé qui inhiberait la présentation des antigènes par les cellules de Langerhans. De plus, on a récemment montré que les ultraviolets B activent la synthèse de deux cytokines : la $TNF\alpha$ et l'interleukine 10 dans les kératinocytes, qui inhibent les cellules de Langerhans.

Enfin, les ultraviolets B favorisent la «tolérance immunitaire active». Outre les cellules de Langerhans qui sont responsables des réactions de rejet de greffe et des eczémas, il existe d'autres cellules dendritiques dans l'épiderme ; ces cellules augmentent la tolérance aux substances étrangères et résistent mieux aux ultraviolets que les cellules de Langerhans. Ainsi, l'irradiation de la peau par les ultraviolets a un effet immunosuppresseur qui calme les irritations, mais elle améliore aussi l'apprentissage de la tolérance aux substances étrangères, ce qui diminue les réactions allergiques ou de rejet.

Cette mise en veilleuse du système immunitaire de la peau n'est pas sans inconvénient, puisque l'élimination des cellules cancéreuses n'y est plus assurée. Chez l'animal, lorsque l'immunité cutanée est inhibée par les rayons ultraviolets, les tumeurs cutanées se développent beaucoup plus rapidement.

Ainsi, les ultraviolets ont deux effets : ils créent directement des lésions dans l'ADN des kératinocytes et ils inhibent les réactions immunitaires cutanées qui éliminent les cellules tumorales.

Soleil et vieillissement

Les ultraviolets B et surtout les ultraviolets A provoquent un vieillissement de la peau.

Le vieillissement est un mécanisme génétiquement programmé, mais certains facteurs d'environnement l'accélèrent. Aussi, la peau prend un aspect beaucoup plus âgé sur les zones exposées au soleil, telle que le visage, les mains ou les avant-bras. Les zones protégées, les fesses par exemple. L'agression chronique de la peau par le soleil entraîne une augmentation des divisions cellulaires et un épaississement de l'épiderme et de la couche cornée. Au fil des années, l'épiderme s'atrophie : les cellules s'y différencient de façon de plus en plus désordonnée ; des troubles de la

Les différents types de peau

PEAU DE TYPE I Les personnes possédant ce type de peau ont un phénotype roux et une peau très claire ; elles ne bronzent pas, mais des taches de rousseur apparaissent au soleil, elles ont des coups de soleil à la moindre exposition. PEAU DE TYPE II Ces personnes ont également la peau très claire et, à la moindre imprudence, elles ont des coups de soleil ; elles bronzent légèrement, mais ce hâle léger qui évite les coups de soleil ne protège pas contre le risque de vieillissement cutané ni contre les cancers de la peau.	PEAU DE TYPE III Ces personnes ont peu de coups de soleil et bronzent facilement. PEAU DE TYPE IV Ces personnes n'ont jamais de coups de soleil et bronzent très facilement. On trouve ce type de peau, par exemple, autour de la Méditerranée. PEAU DE TYPE V La peau est naturellement pigmentée et claire, comme celle des Asiatiques. PEAU DE TYPE VI La peau est noire, très résistante aux dommages provoqués par le soleil.
--	--

différenciation apparaissent avec formation de croûtes plus ou moins pigmentées et, parfois, apparition de carcinomes.

Dans le derme, les cibles les plus sensibles à l'exposition du soleil, et notamment les fibres élastiques. Elles contiennent une protéine nommée élastine en raison de ses propriétés élastiques ; sécrétée par les fibroblastes du derme, l'élastine s'attache au collagène. Leur association assure la solidité du derme (élasticité) et lui confère sa souplesse.

Les ultraviolets, notamment les ultraviolets A, modifient la production de collagène : ils en diminuent la synthèse et en augmentent la dégradation. Ils altèrent également la synthèse et les propriétés de l'élastine : les molécules anormales d'élastine, produites en grande quantité, sont incapables de s'attacher au collagène et s'agglutinent en mottes, se pelotonnant en petites boules blanches visibles sous la peau ; elles donnent aux faces latérales du cou un aspect en chair de poule.

Entre les petites mottes blanches, le réseau vasculaire apparaît : la peau a un aspect rouge ponctué de blanc, d'horreur sur les faces latérales du cou, telles que le bout du nez, les pommettes ou le menton. Les rides résultent de l'exposition au soleil et, notamment, aux ultraviolets A. Ce vieillissement accéléré de la peau est très marqué chez les fumeurs : comme les ultraviolets A, le tabac détruit les fibres élastiques (il produirait des radicaux libres).

L'évaluation du risque

L'étude des méfaits du soleil montre que l'intensité de l'irradiation joue un rôle essentiel, mais aussi que certaines personnes sont plus sensibles que d'autres. On a classé les types de peau en six catégories. On a constaté, et montré que, statistiquement, le risque de mélanome malin augmente quand la peau est plus claire : c'est surtout le cas dans le Nord de l'Europe et en Australie, où le phénotype roux est fréquent.

On sait évaluer les risques pour une population donnée, mais peut-on prévoir le risque individuel ? Parmi les individus ayant le même type de peau et subissant la même exposition, certains sont atteints de cancer, d'autres non. Le phototype de peau n'est pas le seul facteur définissant le risque de cancer cutané : les mécanismes de réparation des dommages provoqués par le soleil diffèrent d'une personne à l'autre dans un même groupe. Ces mécanismes de réparation sont déterminés par le patrimoine génétique.

Certaines personnes ont, en effet, une maladie génétique grave, le xeroderma pigmentosum : leur peau est extrêmement sensible au soleil et les dommages provoqués par le soleil à l'ADN ne sont pas réparés. Ces enfants ont

malins dès l'âge de quatre ou cinq ans, et ils meurent souvent très jeunes d'une multitude de cancers cutanés.

Un nouveau test de dépistage, le test des comètes, devrait permettre une identification des sujets à risques, de naissance ou parce qu'ils ont abusé du soleil. Lorsque l'on irradie un lymphocyte du sang ou un kératinocyte de

la peau a subi des lésions. Quand on soumet une cellule irradiée par des ultraviolets à un champ électrique intense, les fragments d'ADN chargés migrent (les plus courts migrent le plus loin). Ces fragments créent une traînée visualisée grâce à un colorant fluorescent, qui est d'autant plus longue que les fragments sont nombreux.

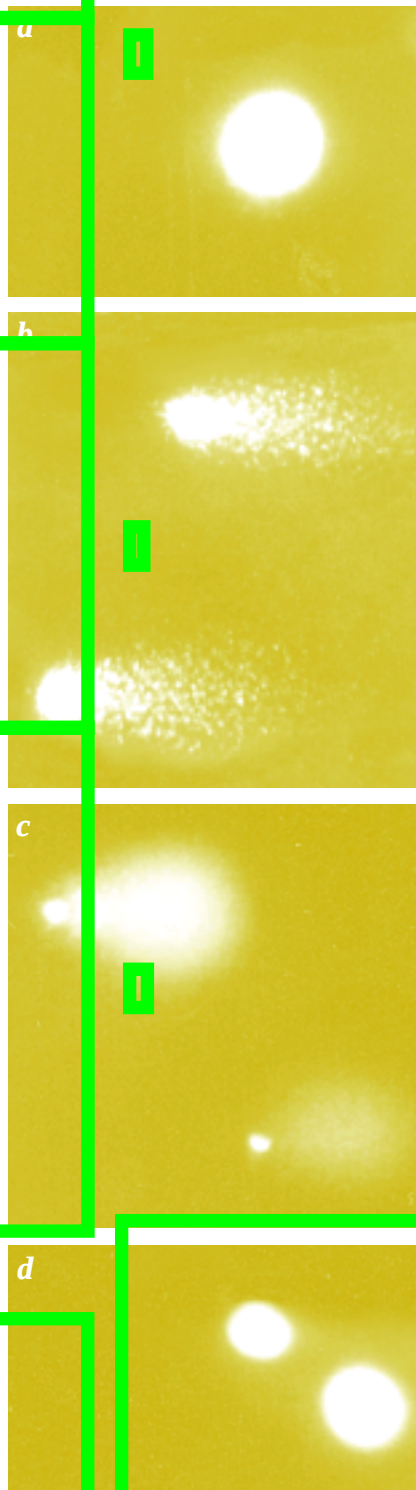
Normalement, quelques heures après l'irradiation, les cellules se sont réparées. La traînée des fragments d'ADN qui sortent de la cellule ressemble à celle d'une comète, ce qui a valu son nom au test. Après une irradiation normalisée et un temps de réparation défini, l'aspect de la queue de la comète renseigne sur les capacités cellulaires de réparation des dommages dus aux ultraviolets.

La méthode, mise au point il y a quelques années, était jusqu'à présent utilisée pour l'évaluation des dommages subis par les cellules exposées à divers agents agressifs de l'environnement. L'équipe d'Ethel Moustacchi, de l'Unité CNRS UMR 218, à l'Institut Curie, a appliqué cette méthode à la détection des dommages provoqués sur l'ADN par les ultraviolets dans des maladies génétiques graves, où la sensibilité aux ultraviolets est extrême.

Aujourd'hui, l'équipe étudie des personnes qui ne semblent pas prédisposées. Elle compare actuellement un groupe de patients de 50 ans ayant eu un cancer de la peau et un groupe de patients de 50 ans qui ont été épargnés. Les tests des comètes réalisés sur ces deux groupes de patients ne doivent être différents, puisque ils reflètent les capacités de réparation des cellules de l'épiderme. Si tel est le cas, on dispose d'un test de routine permettant de savoir si un nouveau-né présente des risques vis-à-vis du soleil, et comment évolue, chez l'adulte, sa capacité à réparer les lésions de l'ADN causées par le soleil.

La prévention

Avec l'amélioration des connaissances, les conseils de prévention sont de plus en plus efficaces. Éducation et information sont les clés d'une meilleure protection. Les conseils de détection sont efficaces, puisque l'on a noté qu'après des campagnes d'information faites en Suisse ou dans le midi de la France, le nombre de méla-



5. LE TEST DES COMÈTES met en évidence la capacité de réparation de l'ADN soumis aux ultraviolets. Un noyau indemne apparaît circulaire après avoir été marqué avec un colorant fluorescent (a). Après irradiation par les ultraviolets, l'ADN est fragmenté ; sous l'action d'un champ électrique, les fragments migrent et forment une traînée, qui ressemble à la queue d'une comète (b). L'évolution de l'aspect de la traînée renseigne sur les capacités de la cellule à réparer les dommages subis par l'ADN. Quand l'ADN est reconstruit, la traînée ne se forme plus (c) et, au bout de quelques heures, le noyau reprend sa forme circulaire initiale (d).

nomes malins diagnostiqués a doublé au cours des six mois qui ont suivi la campagne d'information. Un grand nombre de mélanomes malins débutants, faciles à soigner par la chirurgie, ont été détectés grâce à cette information.

Outre ces mesures d'information, la photoprotection vestimentaire est essentielle : quand on a la peau très claire, on doit se baigner avec une chemise et s'habiller sur la plage.

Les produits solaires sont une autre arme de la photoprotection. Toutefois, les premiers, conçus pour lutter seulement contre les ultraviolets B, ont eu des conséquences paradoxales : en filtrant les ultraviolets B, ils évitaient les coups de soleil, favorisaient les expositions prolongées, et potentialisaient les effets chroniques du soleil, c'est-à-dire une accélération du vieillissement cutané et une augmentation des dommages à la peau.

Aujourd'hui, on a pris conscience que l'on doit utiliser des écrans solaires qui protègent non seulement contre les ultraviolets B, mais aussi contre les ultraviolets A. Toutefois, on filtre difficilement les ultraviolets A, et une grande quantité pénètre dans la peau.

Les produits solaires doivent être utilisés pour éviter les coups de soleil, mais non pour prolonger l'exposition. Nous devons informer les adultes des risques du soleil et éduquer les enfants pour qu'ils apprennent à se protéger à la naissance, les cellules de la peau ont une certaine capacité à réparer les dommages subis, mais ces réparations sont toujours incomplètes. À chaque irradiation, des lésions persistent, s'accumulent, et les capacités d'adaptation au soleil diminuent ; après chaque exposition, le nombre des lésions réparables diminue. On doit apprendre aux enfants et aux adolescents à préserver leur « capital soleil ».

Louis DUBERTRET dirige un service de dermatologie à l'Hôpital Saint-Louis et l'Unité INSERM U 312.

L. DUBERTRET, M. JEANMOUGIN, *La peau et le soleil*, Collection Ouverture médicale, éditions Hermann, 1993.

L. DUBERTRET, R. SANTUS et P. MORLIÈRE, *Ozone, Sun, Cancer*, éditions INSERM, 1995.

Les propriétés des quasicristaux

JEAN-PIERRE DUBOIST

Les exceptionnelles propriétés électriques, mécaniques et tribologiques des quasicristaux sont d'heureuses surprises qui promettent d'intéressantes applications technologiques.

Les quasicristaux vont-ils, 12 ans après leur découverte par Dany Shechtman et ses collaborateurs Ilan Bech, John Cahn et Denis Gratias, devenir des matériaux comme les autres? Qu'en attendent les industriels privilégiés de composés modèles et académiques pour contribuer à notre bien-être quotidien? Ces questions sont souvent posées, surtout par des industriels soucieux d'innovation ou enclins à protéger les acquis de leur technologie. Nous faisons le point, dans cet article, sur les propriétés de ces matériaux et leurs applications potentielles.

Des arrangements étranges, mais stables

Lors de leur découverte, les physiciens perçurent les quasicristaux comme des composés exotiques dotés d'une structure bizarre, impossible à comprendre vite. Pour l'essentiel, cette structure est aujourd'hui bien comprise. Il a fallu, pour la comprendre, généraliser la cristallographie et y inclure la description des structures à symétrie quinaire qui avaient longtemps été considérées comme interdites. Cette structure cristallographique était celle des quasicristaux.

À l'opposé de la découverte, la compréhension de la structure, le comportement thermodynamique des quasicristaux s'est révélé classique. Les premiers quasicristaux Al-Mn étaient produits par solidification ultrarapide à des vitesses de refroidissement dépassant 1 000 000 °C par seconde. Comme tous les alliages de métaux qui subissent un tel traitement,

les structures obtenues par refroidissement ultrarapide sont dans un état métastable et évoluent vers un état plus stable quand ils sont chauffés. Les alliages se transforment alors en un mélange de phases cristallines.

Pendant les quelques années qui ont suivi la découverte, les chercheurs ont cru que tous les quasicristaux présentaient cette caractéristique. Ils les ont alors rattachés à un état intermédiaire entre l'état cristallin parfaitement ordonné et l'état vitreux caractéristique du désordre partiel qui prévaut dans un liquide. La position était comode parce que suffisamment imprécise. Cette interprétation a changé radicalement en 1987 lorsque A.P. Tsai, qui terminait sa thèse à Sendai, au Japon, a publié une série d'articles démontrant l'existence de quasicristaux stables, associés à des diagrammes de phases bien définis. Ces cristaux étaient des alliages intermétalliques tels que Al-Cu-Fe, Al-Cu-Co, Al-Co-Ni et Al-Pd-Mn. En fait, le pas décisif avait été franchi l'année précédente lorsque B. Dubost et ses collaborateurs du Centre de Recherches de Pechiney, à Voreppe, avaient préparé des monocristaux icosaédriques par solidification lente, à partir de l'état liquide, d'un Al₇₀Pd₂₀Re₁₀. Ces cristaux, de forme

trigonaux, diffractaient le rayonnement comme les quasicristaux et, de plus, leurs facettes définissaient sans ambiguïté la forme d'un polyèdre du groupe de l'icosaèdre. Figure de diffraction et morphologie cristalline montraient qu'il s'agissait bien d'un quasicristal.

Aujourd'hui les revêtements quasi cristallins sont identifiables par leurs

caractéristiques cristallographiques ; aussi est-il simple de les détecter dans un dispositif, ce qui facilite la défense des brevets. Ils sont relativement aisés à produire et d'un prix de revient suffisamment faible pour s'adapter aux contraintes de nombreux marchés.

Un obstacle de taille a pourtant freiné quelque temps notre enthousiasme : la fragilité mécanique de ces matériaux. Comme de nombreux autres intermétalliques, ils sont très durs à température ambiante, et leur ductilité très faible ne permet pas une mise en forme aisée. Cet inconvénient majeur interdit encore aujourd'hui l'utilisation des quasicristaux à l'état massif dans des applications mécaniques. En revanche, il est tout à fait possible de les utiliser sous forme de revêtement.

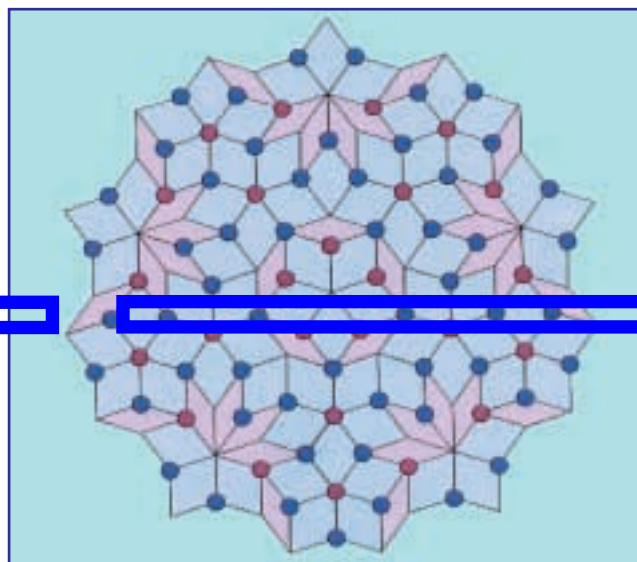
Sur une surface, le substrat apporte la résistance mécanique, tandis que le revêtement résiste aux agressions superficielles. C'est pourquoi ils sont largement adoptés pour la protection contre la corrosion, la résistance à la rayure, la réduction du frottement, la coloration superficielle, les revêtements anti-adhésifs, etc.

Déconcertantes propriétés des quasicristaux

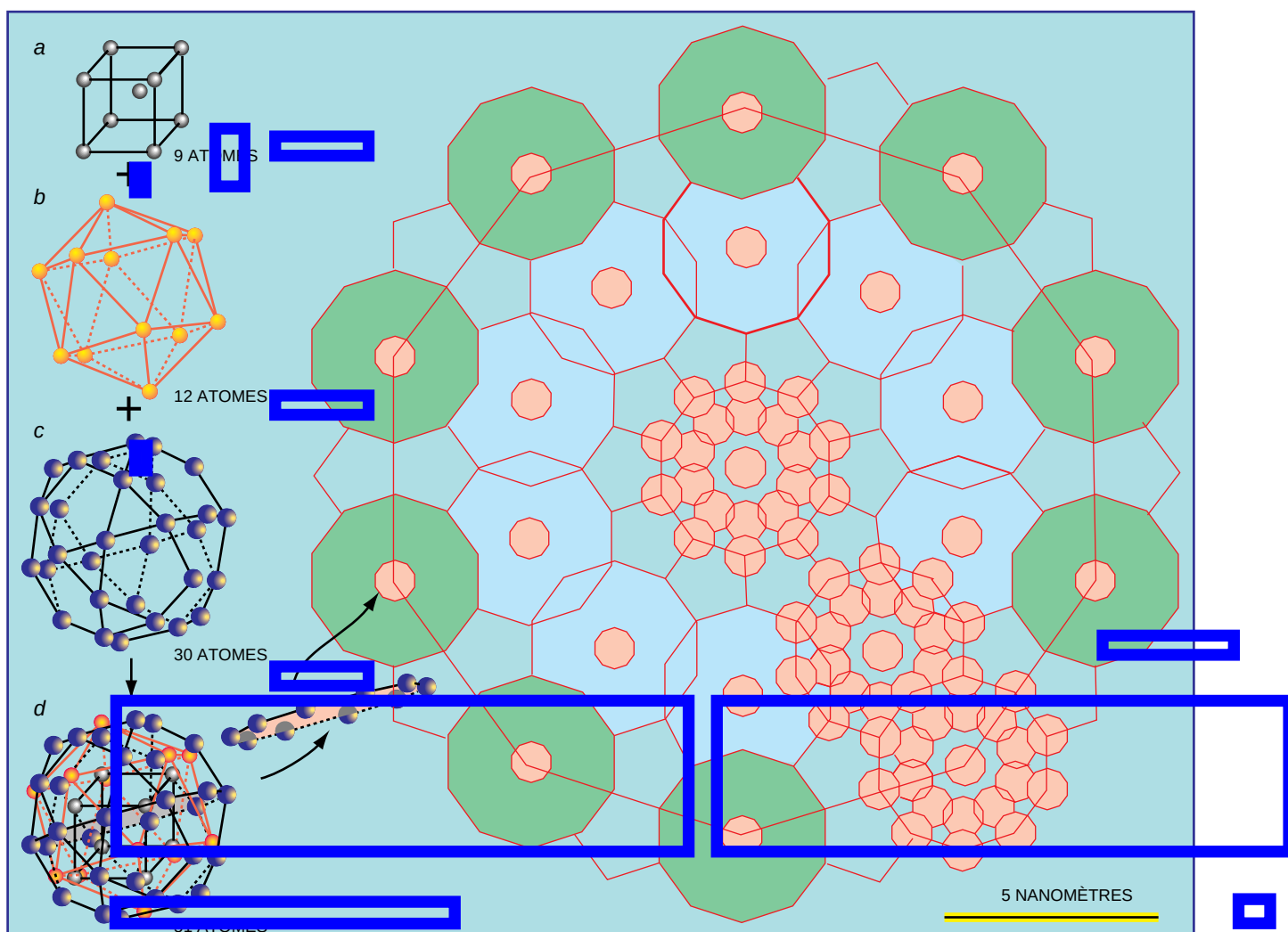
À la surprise générale, les quasicristaux icosaédriques se sont révélés de piètres conducteurs de l'électricité et de la chaleur, contrairement à leurs constituants métalliques. Leur conductivité est d'autant plus réduite que la perfection du réseau cristallin est grande ; certains alliages, comme Al₇₀Pd₂₀Re₁₀, icosaédrique seraient



1. QUASICRISTAL icosaédrique Al-Pd-Mn à faces pentagonales.



2. PAVAGE DE PENROSE obtenu à partir de deux losanges.



3. STRUCTURE DE 51 ATOMES (à gauche) constituant l'agrégat élémentaire du quasicristal Al-Pd-Mn. Cet agrégat, ayant les symétries de l'icosaèdre, est constitué de trois éléments emboîtés *a*, *b*, *c*. L'élément *a* central a neuf atomes d'aluminium. Les deux autres éléments existent sous deux «colorations» chimiques distinctes (non représentées) : d'une part, 6 Mn plus 6 Pd pour l'élément à 12 atomes, et 30 Al pour celui à 30 atomes ; d'autre part, 12 Al et 20 Pd plus

10 Al. À droite, on a représenté l'organisation hiérarchique du quasicristal : chaque niveau de la hiérarchie reproduit la structure icosaédrique de l'agrégat élémentaire, avec la structure du niveau précédent aux sommets de l'icosaèdre de ce niveau. Les agrégats sont représentés par leur plan équatorial et tous les plans équatoriaux des agrégats représentés sont dans un même plan. L'anneau de l'agrégat de base est figuré par un petit cercle orange.

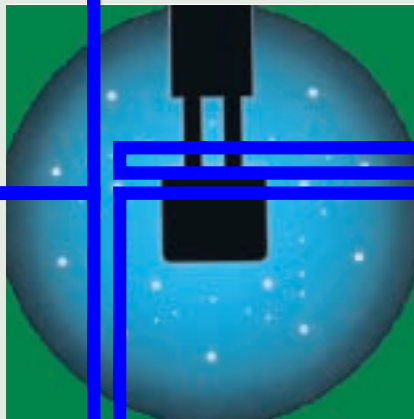
La structure des quasicristaux

Un diagramme de diffraction est une figure d'interférences créée par la superposition des ondes (rayons X, électrons ou neutrons) réfléchies dans une direction donnée par les atomes d'un cristal. La direction qui donne lieu à des interférences constructives, c'est-à-dire à une tache, correspond à des ondes diffractées décalées d'un nombre entier de longueur d'onde (figure a). Cette direction indique la distance qui sépare les plans atomiques, lesquels constituent autant de «miroirs» pour les ondes produites par la source éclairant l'échantillon. L'ensemble des taches de diffraction reflète l'arrangement des plans atomiques qui définissent le cristal.

Ce diagramme de diffraction (figure b) est semblable à celui du premier cristal découvert par D. Shechtman. Il présente deux groupes de taches intenses, décalés angulairement de 36° , qui marquent les sommets de deux étoiles à cinq branches. Ces figures sont invariantes par rotation d'un cinquième de tour autour du centre de la figure, ce qui implique que, dans l'échantillon, la disposition des plans atomiques possède cette symétrie de rotation.

L'invariance par rotation de $2\pi/5$ n'est pas compatible avec la symétrie de translation qui caractérise les cristaux habituels. Pour s'en convaincre, essayez d'imaginer un carrelage réalisé avec des pentagones. Un tel pavage ne peut pas couvrir toute la surface parce que l'angle au sommet du pentagone (108°) n'est pas égal à une division entière d'un tour ($2\pi/n$ avec n entier). Il n'est pas possible de disposer un nombre entier de pentagones autour d'un sommet, alors que cette construction est réalisable avec des hexagones, des carrés ou des triangles équilatéraux.

En 1974, R. Penrose a résolu le problème du pavage du plan, sans trou ni recouvrement, de telle sorte que la symétrie globale du pavage soit quinaire. Le diagramme de



b. Figure de diffraction d'un quasicristal.

diffraction de ce pavage est alors strictement invariant par rotation d'un cinquième de tour autour de son origine. Pour obtenir cette symétrie d'ordre cinq, Penrose a abandonné la notion de maille unitaire unique des cristaux traditionnels et utilisé deux éléments de construction distincts : des losanges d'angles au sommet $4\pi/5$ et $\pi/5$ d'une part et $3\pi/5$ et $2\pi/5$ d'autre part), associés l'un à l'autre par des règles d'assemblage strictes (voir la figure 2). Le pavage résultant n'est plus périodique, en ce sens qu'il est impossible de trouver une distance de déplacement finie telle que le pavage se superpose exactement à lui-même. En revanche, presque tous les points du pavage se superposent à un point du pavage original si on glisse, par exemple, à l'opposé selon le côté d'un losange : le pavage est presque périodique, quasi périodique ou quasicristallin.

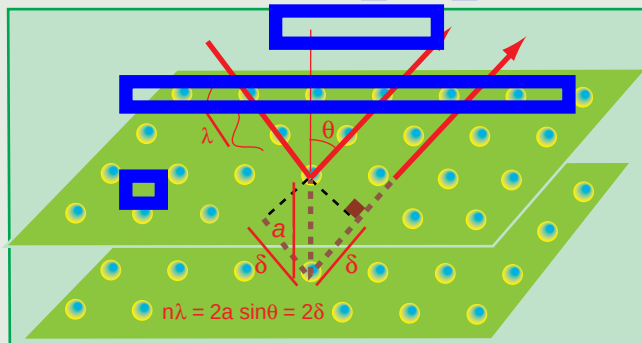
La mathématique des fonctions quasi périodiques était connue avant la découverte des quasicristaux. Elle a apporté le cadre au problème central de la localisation des atomes dans les quasicristaux. En effet, une fonction quasi périodique dans un espace de dimensions n (ici n égal à 3) peut toujours être considérée comme une opération de coupe par l'espace en question d'une fonction périodique

dans un espace de dimension plus grande. Pour illustrer cette cristallographie à haute dimension, considérons l'exemple représenté sur la figure c. Nous voulons construire une fonction quasi périodique, la densité atomique, le long d'une droite E , c'est-à-dire une fonction qui prenne, soit la valeur 0 (il n'y a pas d'atome), soit la valeur 1 (l'atome est présent au point considéré) dans un espace à une dimension.

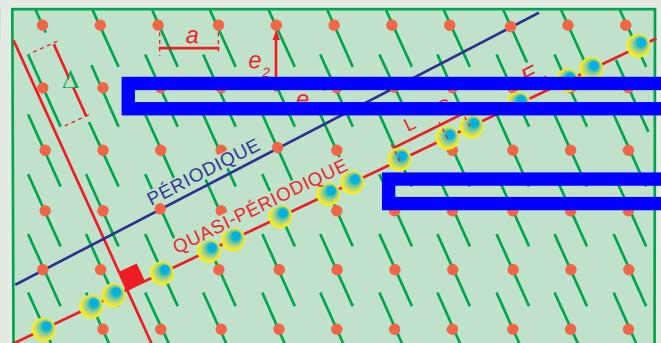
Pour cela, nous construisons d'abord un réseau périodique, carré pour simplifier et de paramètre a , engendré dans un espace D à deux dimensions par translations selon les vecteurs de base (e_1, e_2) . Tout vecteur de ce réseau a des composantes à coefficients entiers sur (e_1, e_2) , mais peut être rapporté aussi de façon univoque, à une base portée par L ; l'espace complémentaire D' , orthogonal à D est de dimension unité.

Nous choisissons ensuite le réseau carré d'une densité atomique choisie pour que l'intersection entre D et E se réduise à des points, les atomes de E . L'option la plus simple consiste à placer des segments de longueur Δ sur les nœuds du réseau (e_1, e_2) , perpendiculaires à E , et appartenant à l'espace D' . La longueur Δ est telle que l'on obtienne la densité atomique voulue sur E .

Chaque intersection entre l'espace E et les segments de droite Δ détermine la position d'un atome, car, par construction, cette intersection se réduit à un point. Les atomes sont ainsi séparés par des distances consécutives ou longues L . La séquence des segments L et C sera nécessairement périodique si la pente de E rapportée au référentiel (e_1, e_2) est un nombre rationnel, car alors E passe périodiquement par des nœuds du réseau. La densité atomique, comme la succession des distances L et C construites entre les nœuds, se reproduit donc périodiquement, quoiqu'à elle-même entre chaque couple de nœuds du réseau carré que



a. Interférences constructives dans un cristal.



c. Interprétation géométrique de la structure d'un quasicristal.

rencontre E . En revanche, si la pente de E est un nombre irrationnel, E passe par un seul nœud du réseau carré, et la séquence des distances L et C est apériodique. Cette configuration correspond au quasicristal.

La position de E est bien entendu arbitraire. Toute autre droite parallèle à E représente également un quasicristal, globalement identique au premier même si, localement, on peut observer une inversion de deux segments L et C en C et L . Ce mécanisme de saut localisé ne change pas la densité atomique globale, mais change l'environnement proche d'un atome. Il semble jouer un rôle crucial pour la mobilité atomique dans les quasicristaux, car il met en jeu des barrières énergétiques minimales entre sites équivalents, tout en autorisant le transport de matière à longue distance dans les quasicristaux réels de dimension plus grande que l'unité. Enfin, la figure *c* montre bien que de nombreux cristaux peuvent exister avec des arrangements atomiques très voisins de ceux du quasicristal, dès lors que la pente de E est rationnelle, mais peut différer de la pente irrationnelle. Ces cristaux sont appelés approximants et existent effectivement dans les systèmes d'alliages qui contiennent des quasicristaux au sens strict.

La construction de la figure 3 présente donc une généralisation de la notion de cristal. Elle rend compte soit du cristal classique si la pente de E est rationnelle, soit du quasicristal si ce nombre est irrationnel.

De même, un réseau périodique à quatre dimensions, décoré par des polygones et coupé par un plan, rend compte des pavages apériodiques comme le pavage de Penrose. Cette situation correspond, dans les alliages réels, aux phases décagonales qui contiennent des empilements, périodiquement ordonnés selon une direction, de plans atomiques quasi-périodiques. Les quasicristaux icosahédriques sont apériodiques dans les trois directions de notre espace habituel. Ils peuvent être engendrés par la coupe d'un espace hypercubique de dimension 6 par notre espace de dimension 3. La densité atomique dans l'hypercube est représentée alors par des polyèdres du groupe de symétrie de l'icosaèdre, on dit des hypersurfaces ou des surfaces atomiques, contenus dans l'espace complémentaire de dimension 3 également.

Bien que cette méthode ne soit pas aussi intuitive que la cristallographie classique, elle a l'avantage d'en restituer les principaux avantages. En particulier, elle associe à l'espace périodique de grande dimension du cristal un espace réciproque, périodique également et de même dimension, qui porte l'intensité des diagrammes de diffraction. On a pu ainsi déterminer la majorité des positions atomiques dans les quasicristaux.

même classés dans les isolants. La conductivité thermique est comprise entre 10 ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1}$) $^{-1}$ environ à quelques centaines d'($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1}$) $^{-1}$ entre 1K et 1000K . Ce comportement est à rapprocher de celui des semiconducteurs qui, contrairement aux métaux, conduisent d'autant plus que la température s'élève. Pourtant, le mécanisme qui assure la conduction dans les quasicristaux est spécifique.

Dans un cristal semiconducteur, les états d'énergie des électrons sont répartis dans deux bandes séparées par un gap, la bande de valence et la bande de conduction. Pour que ce cristal conduise l'électricité, il faut que certains électrons franchissent le gap et se trouvent dans la bande de conduction. À température nulle, le cristal n'est pas conducteur. Sous l'effet de la température, des électrons de la bande de valence bondissent dans la bande de conduction, où ils conduisent l'électricité ; dans le même temps, un trou de charge positive se constitue dans la bande de valence, trou qui conduit aussi l'électricité.

Dans les quasicristaux, aucun gap ne sépare nettement le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction. En revanche, dans les phases icosahédriques, une dépression profonde de la densité d'états – appelée un pseudo-gap – sépare la région des états occupés de celle des états inoccupés. La dépression, qui nuit à la conduction, est d'autant plus marquée que la phase icosahédrique est moins conductrice : cette observation cadre bien avec la forte résistivité des cristaux icosahédriques. En fait, il semble que les électrons soient confinés par les agrégats atomiques dans des « puits quantiques » d'où ils s'échappent sous l'effet des excitations thermiques pour assurer un minimum de conduction.

Les autres propriétés liées au transport électrique des phases icosahédriques s'écartent tout aussi nettement du comportement métallique. Dans les phases icosahédriques, la conduction à basse température est assurée par les électrons, mais la contribution des trous augmente avec la température. La nature du porteur de charge est cependant très sensible au degré de pureté du quasicristal.

De plus, la nature du porteur change brutalement de signe lorsque la composition des alliages Al-Cu-Fe passe par la composition correspondant précisément à la concentration électronique

de $1,86$ électron par atome. La résistivité est alors élevée et la perfection structurale peut être obtenue conjointement dans cet alliage particulier.

De même, le comportement des quasicristaux vis-à-vis du rayonnement électromagnétique ne suit pas le modèle qui explique bien la conductivité électrique. La transparence est une fonction croissante de la fréquence du rayonnement électromagnétique : les métaux sont transparents pour les photons de très courte longueur d'onde, ultraviolets et en deçà, et réfléchissants aux grandes longueurs d'onde de l'infrarouge et du rayonnement micro-métrique.

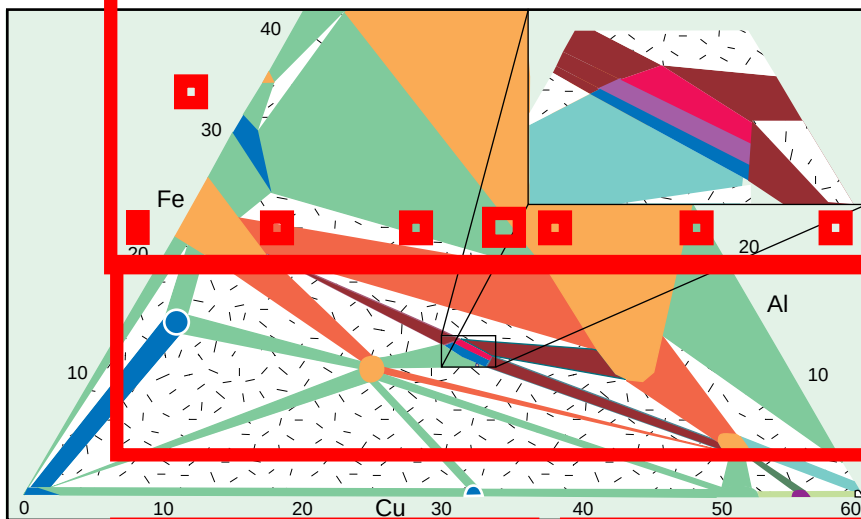
Les mesures effectuées sur des cristaux icosahédriques $\text{Al}_{70}\text{Pd}_{20}\text{Re}_{10}$ témoignent d'un comportement différent : la transparence est faible tant que la longueur d'onde est inférieure à 1000 cm^{-1} , passe par un maximum au voisinage de $10\,000 \text{ cm}^{-1}$ puis diminue.

Il en va de même de la conduction thermique. La phase icosahédrique $\text{Al}_{71}\text{Pd}_{19}\text{Mn}_8$, par exemple, ne conduit pratiquement pas la chaleur à basse température : sa conductivité thermique varie de 10^{-4} à 10^{-3} W/mK entre 1 et 10K . Cette valeur est comparable à celle des meilleurs isolants thermiques, comme la laine de verre ou la plume d'oie des vestes de duvet que chérissaient les alpinistes avant l'invention des textiles modernes. La conductivité thermique augmente ensuite rapidement avec la température, puis stagne entre 100K et 300K avant de croître à nouveau.

La conductivité thermique croît approximativement exponentiellement avec la température. Les valeurs atteintes dans la région des hautes températures, au-delà de la température ambiante, restent cependant faibles par rapport à des matériaux classiques : la conduction thermique est analogue à celle du zircon, prototype des isolants utilisés dans l'aéronautique.

Dureté et plasticité

Nous avons vu que les quasicristaux sont durs, mais fragiles. Les duretés caractéristiques, appréciables pour un alliage léger, sont comparables aux duretés des intermétalliques comme Al-Fe ou des aciers martensitiques de haut de gamme. En revanche, les monocristaux icosahédriques sont d'une grande fragilité : ils ne résistent pas à la propagation d'une fissure.



4. COUPE à 700°C du diagramme de phases Al-Cu-Fe montrant en insert un agrandissement de la région de la phase icosaoédrique. Celle-ci se situe dans l'étroite région colorée en rouge qui correspond à une concentration de 1,86 at.%. Elle voisine avec des composés cristallins à grande maille (région marquée en bleu) qui possèdent des arrangements atomiques presque identiques. Ce diagramme de phases est la version moderne du diagramme de ce système publié en 1939. Les auteurs suggèrent alors l'existence dans cette région d'une phase nouvelle, impossible à identifier par diffraction des rayons X sur poudre. Les microscopes électroniques n'existaient pas à l'époque...

Les caractéristiques mécaniques sont plus intéressantes à température élevée. La résistance mécanique observée à la température ambiante persiste jusqu'au-delà de 600 °C, ce qui est intéressant en raison, les alliages aéronautiques de haute performance perdent leurs caractéristiques dès 300-350 °C. Lorsque la température dépasse 650 °C, le quasicristal n'est plus fragile et, au contraire, devient ductile. Des déformations sans rupture de plus de 100 pour cent ont été obtenues par compression de certains alliages quasi cristallins.

Cette transition n'est pas liée uniquement à la mobilité des joints de grains, puisqu'elle est aussi observée dans les monocristaux. L'apparition de la ductilité est liée à la formation d'une forte densité de dislocations, comme dans les alliages classiques lorsqu'ils dépassent leur limite élastique : il est possible que les sauts atomiques entre sites énergétiquement équivalents contribuent également à la déformation. Les dislocations participent à la création de dislocations dans le cristal.

Avec les techniques modernes de la microscopie à champ proche, on voit les atomes de la surface d'un cristal. Pour cela, on part d'un monocristal que l'on clive directement dans l'ultravide du microscope pour prévenir toute dégradation ultérieure à la fracture. Un

bon métal ou un matériau comme le silicium présente alors des facettes planes où il est facile de reconnaître les arrangements atomiques réguliers du cristal.

Les quasicristaux, de telles images sont très difficiles, voire impossibles, à observer. Il est préférable d'abandonner la résolution atomique pour regarder la surface d'un peu plus loin. On voit alors une surface rugueuse, faite de creux et de bosses. La hauteur moyenne (et le diamètre) de ces irrégularités est variable, mais elle ne descend pas au-dessous d'une dizaine d'ångströms. Il est tentant d'assimiler ces bosses à des amas constitués d'entités de base qui remplissent, selon une règle d'inflation hiérarchique, l'espace (voir la figure 3).

On admet alors que la rupture se propage entre les amas, dans la zone interstitielle, et non pas le long des plans denses d'atomes qui sont identifiés sans difficulté dans les modèles atomiques. Cette hypothèse n'est pas encore complètement vérifiée. Elle implique, en

conséquence, entre autres, que la mécanique de la rupture des quasicristaux serait semblable à celle des verres et que la transition fragile-ductile serait provoquée par une transition de nature semblable à la transition vitreuse caractéristique des matériaux amorphes (mais se produirait au chauffage, et non au refroidissement).

Sauf précautions exceptionnelles, les quasicristaux sont soumis à l'action de l'oxygène de l'air. Des études récentes ont montré qu'ils se couvrent d'une couche d'un oxyde d'aluminium. À la température ambiante, la vitesse à laquelle cet oxyde recouvre la surface est très importante. En moyenne, son épaisseur est très faible, de l'ordre de une ou deux couches atomiques, ce qui est comparable aux quasicristaux classiques qui se couvrent d'oxydes beaucoup plus épais. Cette couche d'oxyde est étanche (passivante) et elle empêche le passage ultérieur de l'oxygène. Même à des températures proches du point de fusion de l'alliage, la couche d'oxyde ne dépasse pas quelques nanomètres d'épaisseur.

Il est résulte que les quasicristaux sont particulièrement résistants à l'oxydation et à la corrosion. Ils peuvent être utilisés pour des applications prolongées à des températures de quelques centaines de degrés Celsius, ce qui est appréciable pour un composé de faible densité. De même, leur résistance à la corrosion est intéressante.

Adhérence et frottements

La faible réactivité chimique de la surface des quasicristaux, que soulignent les expériences d'oxydation et de corrosion industriellement prometteuse. C'est vers son étude que se tournent les chercheurs, tant fondamentaux qu'appliqués, puisqu'elle explique vraisemblablement la faible adhérence des quasicristaux avec des liquides ou d'autres solides. Cet effet est, lui aussi, surprenant, car les métaux et alliages usuels présentent des énergies de surface assez élevées qui correspondent habituellement à des forces de « collage » importantes.

Notons aussi en évidence cette caractéristique des quasicristaux de deux manières distinctes. Notre première approche, très empirique, se rapporte au problème quotidien et incontournable de la cuisson des aliments. Ainsi, les surfaces de cuisson

surfaces de cuisson revêtues de quasicristaux. Elles sont plus adhérentes que les revêtements de PTFE (polytétrafluoroéthylène), mais meilleures que les autres surfaces, en particulier métalliques. Comme la résistance des quasicristaux aux agressions mécaniques, leur stabilité thermique et leur durée de vie sont bien supérieures à celles

des PTFE, les revêtements de quasicristaux offrent un compromis attrayant qui a franchi la porte des laboratoires depuis quelques années déjà.

Pour mesurer les propriétés d'adhérence des quasicristaux, nous pouvons déposer sur la surface d'un échantillon une minuscule goutte d'un liquide dont les propriétés sont connues. Cette goutte est soumise à des forces de tension superficielle qui modèlent sa forme, car les molécules du liquide sont diversement attirées par le substrat solide et par le gaz. L'angle de ménisque de la goutte sur l'échantillon mesure ces tensions superficielles à l'équilibre. Avec cette technique, nous avons comparé les énergies d'adhésion de divers substrats, dont un monocristal de phase icosaédrique Al-Pd-Mn.

L'énergie de surface du monograin de phase icosaédrique Al-Pd-Mn n'est pas beaucoup plus élevée que celle d'un échantillon d'acier. Elle est faible que celle d'un alliage métallique habituel (tous les autres paramètres de préparation des surfaces étant égaux) et l'on ne détecte pas l'effet de la couche d'oxyde superficielle.

Un autre moyen d'apprécier les qualités d'adhésion de la surface d'un solide met en œuvre une expérience de tribologie : on applique un frot-

teur, l'indenteur, avec une force constante et on le déplace à vitesse constante sur la surface à étudier. On enregistre pendant le déplacement la force qui s'oppose au déplacement. On étudie après le passage de l'indenteur les dommages induits. Le frottement résulte de la combinaison des effets de la déformation élastique des deux matériaux, des rugosités des surfaces en contact, des forces d'adhérence, etc. Très souvent intervient aussi un troisième corps dû à la présence d'un lubrifiant, de débris d'usure, etc.

Pour simplifier, nous considérons ici un indenteur en diamant, indéformable et parfaitement lisse. Pour minimiser les effets de rugosité, nous préparons la surface du quasicristal par un polissage soigné. La rugosité macroscopique devient négligeable. Les causes du frottement se réduisent alors, pour l'essentiel, à la déformation élastique du quasicristal (l'indenteur repousse de la matière sur son passage).

On effectue plusieurs passages dans la même trace après avoir éliminé, à chaque fois, les débris d'usure.

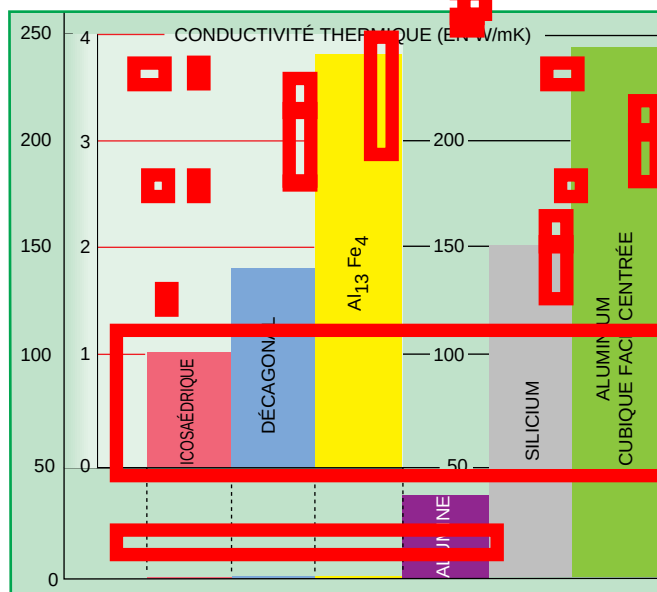
Le coefficient de frottement est très faible, y compris lorsque la pression exercée sur la surface de contact dépasse notablement la limite de rupture du quasicristal. Cette valeur est préservée (elle a même tendance à

diminuer) lors de passages successifs de l'indenteur qui «lisse» la surface. À titre de comparaison, le frottement d'un diamant sur un film de diamant obtenu par pulvérisation cathodique donne un coefficient de frottement identique. Les propriétés mécaniques du quasicristal, on sait évoluer, par la théorie, la contribution au frottement de la déformation du matériau sous l'effet de la charge de l'indenteur. Cette contribution est très proche de la valeur mesurée : autrement dit, les forces d'adhérence ne contribuent pas, ou très peu, au frottement avec le diamant.

La raison pour laquelle les forces d'adhérence à la surface du quasicristal sont si peu élevées reste mystérieuse. Une contribution importante devrait venir de la réduction de la densité d'états au niveau de Fermi et de l'aplatissement de la bande de conduction, car ces paramètres déterminent les échanges électroniques disponibles entre le quasicristal et le matériau

en contact d'autres matériaux. Ce point est établi pour le cœur du matériau, mais pas encore pour sa surface. Or c'est l'extrême surface qui importe dans les phénomènes d'adhérence, et nous savons qu'elle est toujours constituée d'un oxyde. Le sujet reste donc ouvert.

D'autres matériaux d'indenteurs ne produisent pas un frottement sui-



5. CONDUCTIVITÉS THERMIQUES à la température ambiante comparées entre un métal : l'aluminium, un semiconducteur : le silicium, un oxyde : Al_2O_3 , un composé approximant de la phase décagonale : $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, une phase décagonale et une phase icosaédrique polycristallines. La conductivité thermique du quasicristal icosaédrique est 250 fois plus faible que celle de l'aluminium.



6. MICRO-INDENTATION pratiquée au centre d'une rayure d'un quasicristal icosaédrique par un indenteur en carbure de tungstène fritté. La forme de l'indentation indique que le matériau rayé est ductile, alors qu'il était initialement fragile. En haut, variation du coefficient de frottement lors de passages successifs d'un indenteur diamant.

La conduction électrique des métaux

Certains atomes, tels l'aluminium et le cuivre, partagent les électrons les plus externes de leur cortège électronique pour former un gaz d'électrons libres confinés à l'intérieur du cristal. Ce cristal est alors un métal ou un alliage métallique. Le terme « gaz » signifie qu'en première approximation on peut négliger les interactions entre électrons et ne prendre en compte que l'interaction du nuage d'électrons avec le potentiel des ions positifs constitué par les atomes épluchés de leurs électrons externes. Les électrons apportés par chaque atome du métal remplissent des états d'énergie croissante.

Cette loi de croissance des énergies est parabolique : le nombre d'états $n(E)$ ayant l'énergie E est proportionnel à la racine carrée de E . Les états sont occupés en commençant par les niveaux inférieurs. La séparation entre niveaux est si faible que le remplissage paraît continu, bien qu'il s'effectue par états discrets. On parle alors de bande d'énergies. Le remplissage se poursuit jusqu'à une énergie maximale qui correspond à l'affectation de l'ultime électron disponible. Si les atomes apportent n électrons au gaz d'électrons libres, cette énergie E_F , appelée énergie de Fermi, est proportionnelle à $(n_0)^{2/3}$, où n_0 est la densité d'électrons libres, ou concentration électronique du métal ($n_0 = N/V$, N étant le volume offert au gaz d'élec-

trons par le cristal). À la température T , seuls les états situés juste au-dessous du niveau de Fermi sont excités vers des états situés juste au-dessus. Le nombre de ces états est environ égal à kT/kT_F , où k est la constante de Boltzmann et kT_F est égal à l'énergie de Fermi E_F .

Le nombre d'électrons qui contribuent à la conduction est approximativement égal au nombre d'états disponibles de part et d'autre du niveau de Fermi dans un domaine d'énergie de largeur kT . Sous l'effet d'une excitation thermique d'amplitude kT , la variation d'énergie du gaz électronique est proportionnelle à $n(E_F)k^2T^2$.

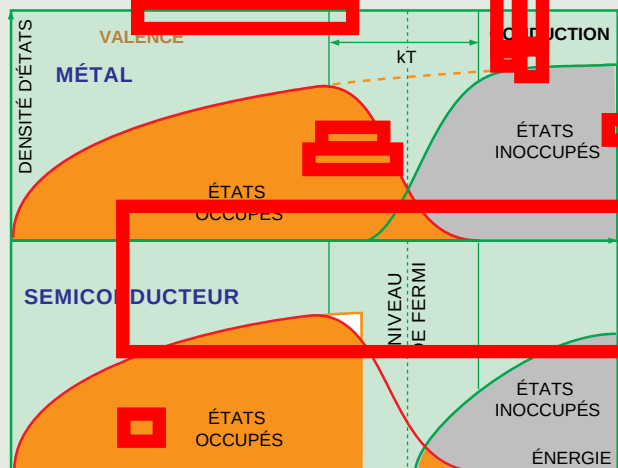
Soumis à un champ électrique, ces électrons du niveau de Fermi assurent la conduction du courant. Dans l'hypothèse du gaz de particules chargées sans interaction, chaque électron parcourt librement une distance moyenne λ à la vitesse v_F (E_F égal à $1/2 mv_F^2$) avant de rencontrer un obstacle où il est diffusé de façon élastique après un temps de vol $\tau = \lambda/v_F$. La conductivité électrique σ est ainsi proportionnelle au nombre de particules qui se déplacent, c'est-à-dire $n(E_F)$, multiplié par le temps moyen τ entre deux collisions. Ainsi la résistivité est faible, car λ est grande dans les métaux purs et bien cristallins. Elle croît avec la température, ainsi qu'avec la densité de défauts dans le cristal, car tous deux diminuent λ .

On admet aussi que les électrons sont les agents des porteurs. La conductivité thermique est ainsi proportionnelle au produit de la chaleur spécifique du gaz électronique, de la vitesse de migration des particules et de leur libre parcours moyen. Il vient ainsi une expression de κ proportionnelle au nombre de porteurs de charge à la température et au temps τ . Le rapport κ/σ est donc simplement proportionnel à la température : $\kappa/\sigma = LT$.

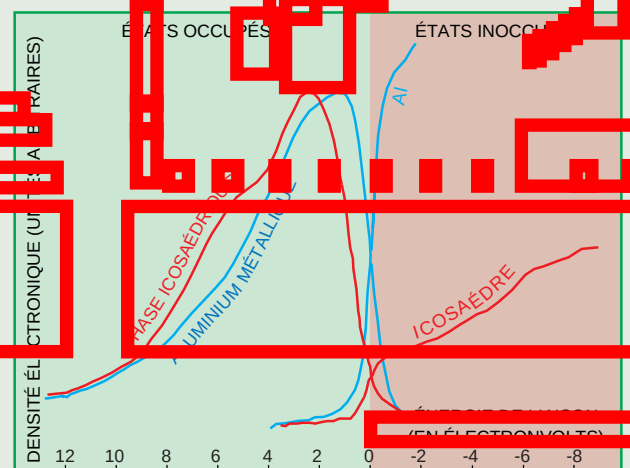
Cette loi, dite de Wiedemann-Franz, est l'un des meilleurs soutiens à la théorie des métaux. En effet, la constante de Lorenz $L = (\pi^2/3)(k/e)^2 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2}$ (où e est la charge de l'électron) est mesurée avec un bon accord par rapport à sa valeur théorique dans tous les métaux, y compris les plus mauvais conducteurs.

Aucune de ces lois n'est observée dans les quasi-cristaux : la conductivité σ , de même que κ sont faibles et augmentent avec la température T et avec la densité des défauts structuraux. La contribution des porteurs de charge à la conductivité thermique est négligeable à basse température (inférieure à 300 K) et comparable à celle des phonons au-dessus de la température ambiante.

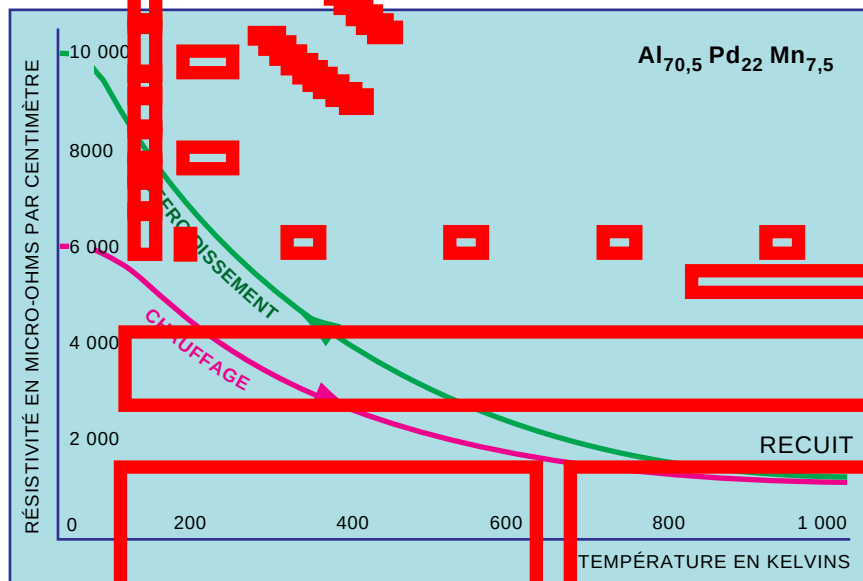
On constate alors que la loi de Wiedemann-Franz prend une forme différente dans les quasicristaux : $\kappa/\sigma = LT$ plus une constante qui augmente avec la perfection structurale du matériau.



a. Dans un métal, les états occupés et inoccupés se recouvrent et la conduction par les électrons est facile puisque aucune barrière ne s'oppose à une augmentation de l'énergie des électrons. Dans un semiconducteur, bandes de valence et de conduction sont séparées par un gap, et la conduction n'est obtenue que si kT est supérieur à la largeur du gap (les électrons conduisent alors).



b. Densité des états électroniques de niveau p dans l'aluminium. On a environ quatre fois moins d'électrons au niveau de Fermi dans le composé AlCuFe icosaoédrique que dans l'aluminium. Dans les états inoccupés, la faible densité d'états de conduction de la phase icosaoédrique est visible et la bande de conduction est aplatie.



7. LA RÉSISTIVITÉ de la phase icosaoédrique Al-Pd-Mn est grande à basse température et elle diminue lors du chauffage. Quand on pratique un recuit à haute température pour éliminer les défauts cristallins, la résistivité augmente plus vite lors du refroidissement.

un quasicristal aussi faible que le diamant. L'augmentation du frottement par rapport au diamant est liée à l'importante ductilité de ces indenteurs, mais elle reste bien inférieure aux frottements dans des systèmes traditionnels comme des aciers ou des céramiques.

Par ailleurs, la rayure d'un échantillon de phase icosaoédrique par un indenteur en carbure de tungstène a une caractéristique technique intéressante. En effet, le quasicristal, initialement fragile, est devenu ductile dans la région sollicitée lors du passage de l'indenteur.

Les quasicristaux, possèdent donc une faculté de restauration qui réduit sous fortes sollicitations les défauts tels que les fissures produites lors du premier contact. À l'inverse, les composés intermétalliques classiques et les céramiques techniques sont beaucoup plus sensibles à la création, puis à la propagation des fissures.

Des quasicristaux utiles

On conçoit l'intérêt des quasicristaux dans les industries mécaniques, l'automobile, l'électroménager et le spatial, où la réduction du frottement et de l'usure fait l'objet de recherches nombreuses, afin d'économiser l'énergie et/ou d'accroître les performances.

D'autres secteurs, qui visent également des économies d'énergie, peuvent bénéficier des propriétés thermiques des quasicristaux. On envisage des barrières isolantes tirant simultanément avantage de la faible conductivité thermique et de la plasticité.

Ces matériaux limitent les flux de chaleur et accommodent aisément les déformations qui naissent lors des cycles thermiques. On obtient ainsi, soit une prolongation de la durée de vie des pièces protégées, soit une augmentation de la température de fonctionnement du moteur, c'est-à-dire un rendement plus élevé.

Les applications technologiques des quasicristaux sont aujourd'hui considérées dans plusieurs pays industriels. Les chercheurs de l'Institut des matériaux de Sendai, au Japon, ont développé un alliage d'aluminium de faible densité (2,9 g/cm³), où se forment des précipités nanométriques de phase icosaoédrique. Ces précipités décuplent les caractéristiques mécaniques de l'alliage.

À terme, cet alliage pourrait rivaliser avec les bons alliages aéronautiques.

Les chercheurs de l'Université Washington, à Saint Louis, ont découvert une nouvelle série d'alliages icosaoédriques à base de titane qui stockent l'hydrogène. Le nombre d'atomes d'hydrogène que ces alliages peuvent

fixer est de 1,6 par atome de métal, c'est-à-dire une performance d'assez peu inférieure aux meilleurs hydrures connus. Il est encore trop tôt pour savoir si ces nouveaux quasicristaux ont un avenir commercial, mais on sait déjà que leur coût de fabrication doit être modeste, compte tenu de leur composition chimique. Citons aussi l'utilisation des propriétés d'absorption lumineuse des quasicristaux diélectriques comme le proposent par exemple les chercheurs de l'Université de Munich, en Allemagne. Ils s'agit là de construire un capteur solaire très efficace grâce à un film mince de quasicristal Al-Cu-Fe placé en sandwich entre deux diélectriques, absorbant dans le visible et peu émissif dans l'infrarouge.

Comme toute innovation, les quasicristaux devront vaincre sur les marchés la concurrence avec d'autres solutions technologiques et franchir les obstacles, nombreux, qui parsèment les stratégies de développement industriel. Quel que soit leur avenir technologique, doré ou misérable, je ne voudrais pas clore cet article sans rappeler que les quasicristaux ont déjà démontré leur utilité scientifique. Ils ont ébranlé les bases de la cristallographie, fondée il y a deux siècles par l'abbé Haüy. Ils ont forcé sa généralisation et prouvé que des phénomènes physiques entièrement nouveaux apparaissent dans des domaines apparemment connus et explorés de longue date. Ce processus de découverte est en gestation et elle se doit d'emprunter à des disciplines très éloignées de celles qui paraissent *a priori* adaptées au problème posé. Les quasicristaux ont déjà ébranlé la science des matériaux et la physique du solide. Peut-être marquent-ils aussi, dans une certaine mesure, « la fin des sciences » ?

Jean-Marie DUBOIS, directeur de Recherches au CNRS (URA 159), effectue ses recherches à l'École des Mines de Nancy.

J.-M. DUBOIS, *Structure et propriétés des quasicristaux et leurs applications technologiques potentielles*, Annales de chimie, numéro spécial *Quasicristaux*, n° 18, p. 423, 1993.

Lectures on Quasicrystals, sous la direction de F. Hippert et D. Gratias, Les Éditions de physique, Les Ulis, 1994.

C. JANOT, *Quasicrystals, a Primer*, Oxford University Press, Oxford 1992 et 1994.

Les papyrus médicaux de l'Égypte ancienne

THIERRY BARDINET

L'étude des papyrus médicaux montre que, pour les Égyptiens, la santé ou la maladie dépendaient essentiellement de souffles d'origine extérieure. Les traitements visaient principalement à débarrasser le corps de ces souffles et des éléments pathogènes qui les animaient.

Avant qu'en 1822 Jean-François Champollion ne trouve la clé des hiéroglyphes et ne permette ainsi l'accès aux textes de l'Égypte ancienne, notre connaissance de la médecine égyptienne se résumait à quelques témoignages de l'Antiquité classique, tels ceux d'Hérodote : «La médecine chez eux est divisée en spécialités : chaque médecin soigne une maladie et une seule. Aussi le pays est-il plein de médecins, spécialistes de la tête, du ventre, ou encore des maladies d'origine incertaine. [...] Voici leur genre de vie : ils se purgent pendant trois jours consécutifs chaque mois et cherchent à se maintenir en bonne santé par des vomitifs et des lavements, dans l'idée que toutes nos maladies proviennent de la nourriture absorbée.»

Grâce à ces témoignages, les papyrus médicaux égyptiens que le hasard des fouilles a fait connaître depuis le XIX^e siècle nous savons aujourd'hui que l'organisation de la médecine égyptienne était différente de celle que rapportait Hérodote, bien que les «spécialités» dont il évoque l'existence correspondent à des titres de médecin retrouvés dans les inscriptions.

Après les premières découvertes des papyrus, nous verrons que les nombreuses études qu'ils ont suscitées sont loin de répondre à toutes les questions. Ceux qui ont voulu identifier les maladies évoquées par les papyrus se sont souvent fourvoyés parce qu'ils attribuaient aux médecins égyptiens une connaissance moderne des maladies.

En outre, ces études n'avaient pas fourni une explication générale des conceptions médicales égyptiennes.

Grâce à une nouvelle traduction de tous les papyrus médicaux publiés, on montre aujourd'hui que, pour l'Égyptien, la maladie est quelque chose qui vient du dehors, un souffle morbide. Ce souffle, qui est parfois apporté par une substance ou un être maléfique, pénètre et se répand dans le corps, parcourant le corps. En conséquence, les thérapies visaient principalement à chasser ce souffle pathogène. Cette conception de la médecine égyptienne trouve ses origines dans la mythologie et dans la conception de l'organisation du monde de l'époque : des souffles omniprésents déterminaient la santé et aussi la croissance ou la mort.

Des sources suffisantes

Les sources issues de fouilles sont nombreuses. Le premier papyrus médical trouvé aujourd'hui conservé au musée de Berlin, tout mis au jour dans la nécropole de Saqqarah et publié en 1863, donc bien après la mort de Champollion (1832). Ce papyrus de Berlin date du règne de Ramsès II (1279-1213 av. notre ère). Des documents souvent plus anciens apparurent par la suite, au cours de fouilles clandestines ou officielles : parmi ceux-ci, les deux plus importants sont les papyrus Ebers et Smith. Ces deux papyrus, qui datent de -1550, auraient fait partie d'une seule trouvaille (clandestine, vers 1860, dans la nécropole de Ramsès II, à

Thèbes) qui comprenait aussi le papyrus mathématique Rhind, lequel témoigne de la plus ancienne utilisation connue du calcul décimal. Les deux papyrus furent publiés en 1858 par l'Américain Edwin Smith, grand amateur d'antiquités qui vivait alors à Louxor. Smith garda pour lui le papyrus qui porte maintenant son nom, un traité chirurgical que James Henry Breasted publia bien plus tard, en 1930. Smith vendit à l'égyptologue allemand Georg Ebers le plus long des deux papyrus médicaux.

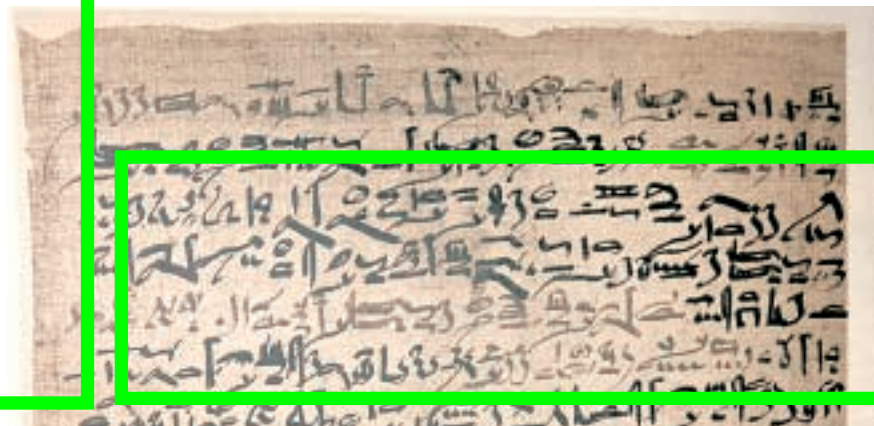
Le papyrus Ebers est un manuel qui donne la liste des signes pathologiques rencontrés par le médecin lors de son exercice quotidien. C'est le document majeur pour l'étude de la pensée médicale de l'Égypte ancienne. Le plus grand du papyrus Smith est d'un abord plus direct, car il traite de lésions et de traumatismes, ce qu'un médecin d'aujourd'hui peut reconnaître, mais il ne donne pas une vision claire des connaissances médicales égyptiennes.

Un autre document qui provient de fouilles officielles, le papyrus trouvé à Kahle, écrit pendant le Moyen

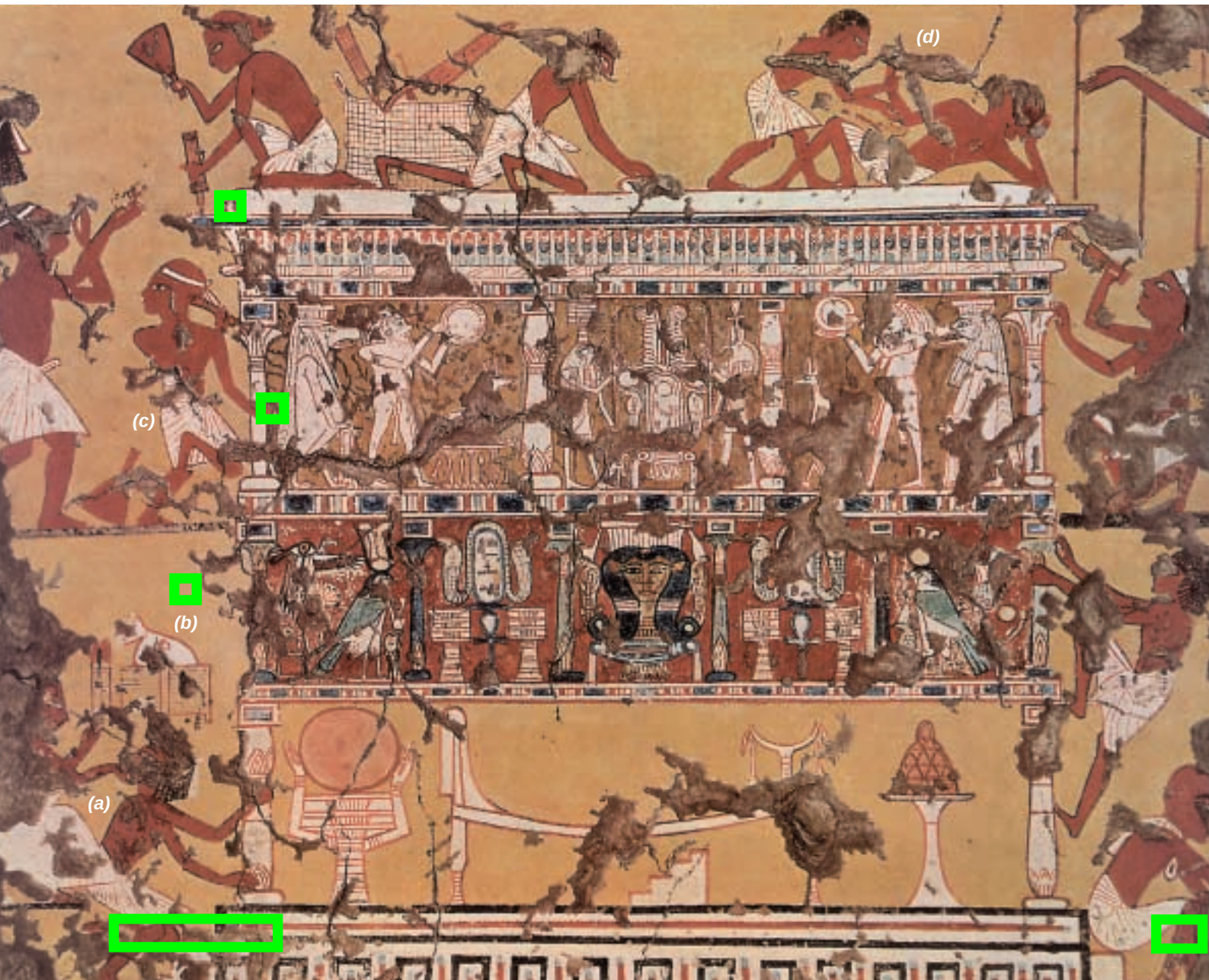
Empire, découverte sur les parois de la tombe d'Ipouy (un chef des sculpteurs de la XX^e dynastie, 1198-1170 av. J.-C.), montre des ouvriers qui construisent une estrade funéraire. Elle illustre quelques accidents de travail. En bas, à gauche, un ouvrier ayant reçu un éclat de pierre dans l'œil se fait soigner par un oculiste (a) ; la trousse de l'oculiste est au-dessus de sa tête (b). Au milieu, à gauche, un ouvrier reçoit un maillet sur le pied (c). En haut, à droite, un médecin remet une épaule démise (d).

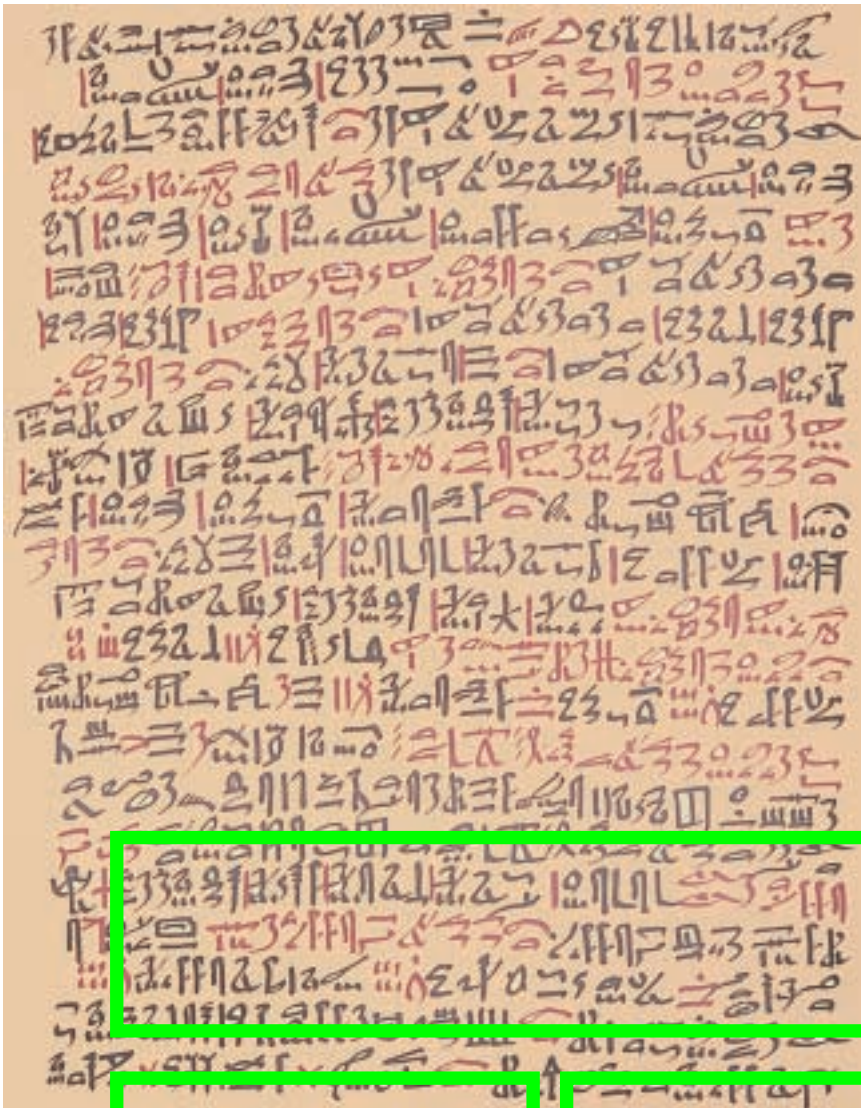
Empire égyptien (vers -1850), est le plus ancien traité de gynécologie connu. Le papyrus Ebers et le papyrus de Berlin détaillent aussi des remèdes pour les maladies des femmes, des pronostics pour le déroulement de la grossesse, mais aucun ne traite ces sujets aussi systématiquement que le papyrus de Kaun.

Enfin, en 1989 fut publié le papyrus de Brooklyn, dont on ignore la provenance. Édité par Serge Sauneron dans les collections de l'Institut français d'archéologie, il date de la fin de la XVIII^e dynastie ou bien du début de l'époque ptolémaïque (-300). Sa publication révèle les grandes facultés d'observation des anciens Égyptiens. Le papyrus comprend deux parties. La première classe près de 40 serpents selon des critères d'identification précis, qui montrent une connaissance approfondie des différents reptiles, de leurs mœurs, du



2. LE PAPYRUS SMITH, découvert en 1860 à Thèbes, est un manuel chirurgical d'une vingtaine de pages qui permet au médecin d'agir face à des blessures caractéristiques. Ce passage du papyrus se rapporte au traitement d'une luxation de la mâchoire inférieure : «Si tu procèdes à l'examen d'un homme atteint d'un déboîtement de la mandibule, et que tu constates que sa bouche est ouverte, sa bouche étant incapable de se fermer, tu devras placer tes pouces aux extrémités des deux griffes de la mandibule, à l'intérieur de sa bouche, et tes autres doigts sous son menton. Tu feras aller les griffes vers le bas de sorte qu'elles soient remises en place. Tu diras à ce sujet : "Un homme atteint d'un déboîtement de la mandibule, un mal que je peux traiter." Tu devras le panser avec de l'irmou, du miel, chaque jour, jusqu'à ce qu'il aille bien.





3. LE PAPIRUS EBERS, le plus long papyrus médical égyptien (108 pages), date de 1550 ans avant notre ère. Il a permis de mieux comprendre les connaissances médicales de l'époque pharaonique. Ce papyrus, ainsi que les autres papyrus médicaux, étaient des manuels pratiques plutôt que des ouvrages théoriques. Il indique des traitements contre de nombreux maux. Cette page traite des affections des dents et des maladies pestilentielles : «Remède pour maintenir en état une dent : farine d'épeautre-mim : 1 ; ocre : 1 ; miel : 1. Ce sera préparé en une masse homogène. Bourrer la dent avec cela. Autre remède : poudre de pierre à meule : 1 ; ocre : 1 ; miel : 1. En bourrer la dent ...»

danger de leur venin et des spécificités de leurs blessures. La seconde partie est un recueil d'antidotes, proposant tout d'abord plusieurs remèdes contre les morsures venimeuses en général, puis d'autres contre les morsures de serpents particuliers. Ce papyrus, unique témoignage de la science égyptienne des serpents, résume pratiquement des millénaires de connaissances humaines sur le sujet.

D'autres papyrus médicaux moins complets existent, tel le papyrus Hearst, qui reprend en partie le papyrus Ebers. Les plus anciens sont ceux qui ont été trouvés dans un cimetière des XI^e et XII^e dynasties (-2000)

recouverts par les dépendances du temple funéraire de Houtchepout (papyrus du Ramesséum). Il existe encore quelques fragments de textes conservés à Berlin et à Paris, et des papyrus écrits en démotique (langue et cursive des derniers siècles de l'époque pharaonique). Enfin, il y a des textes inédits plus ou moins fragmentaires (Berlin, Brooklyn, Londres, Zagreb) attendant d'être édités.

Avec tant de papyrus médicaux, la médecine égyptienne devrait être bien connue. Toutefois, ces textes sont essentiellement des manuels pratiques : ils ont été rédigés pour permettre à un médecin de diagnostiquer les patho-

logies dans son exercice quotidien et de proposer un traitement adapté. Ce ne sont pas des traités théoriques au sens moderne du terme (qui expliquent les maladies) et, pour cette raison, leur abord par un médecin du XX^e siècle est difficile. Leurs premiers éditeurs se sont tout d'abord souciés d'en faire une édition précise et irréprochable. Ces manuscrits sont écrits en hiéroglyphes, une écriture cursive, dérivée des hiéroglyphes, difficile à lire directement. Aussi les textes ont été tout d'abord transcrits en hiéroglyphes, puis les passages similaires entre les différents papyrus ont été regroupés et le corpus ainsi établi a été muni d'un indispensable index.

C'est en Allemagne que fut entrepris ce travail entre 1954 et 1963, bien longtemps après la découverte des sources elles-mêmes. La grande publication qui s'ensuivit (*Grundriss der Medizin der Alten Ägypter*, soit «Manuel de médecine de l'ancienne Égypte») restera longtemps encore l'instrument de travail indispensable à toute étude sur la médecine et les textes médicaux égyptiens. Cependant, ce travail est essentiellement une étude critique des textes par comparaison systématique des manuscrits. La présentation des textes médicaux n'est généralement pas faite, papyrus par papyrus, mais regroupée par thèmes, par ordre par exemple, en fonction des différents parties du corps et par référence à des listes anatomiques que l'on trouve dans les textes égyptiens. Cette approche surtout philologique, tout en étant nécessaire, ne répond pas toujours aux questions que se pose l'historien de la médecine sur les conceptions médicales elles-mêmes.

L'apparente modernité de la médecine égyptienne

Quelques spécialistes ont aussi essayé d'identifier les pathologies décrites dans les papyrus. Ces essais d'identification terme à terme avec la nomenclature moderne sont fondés sur des analogies et des similitudes, mais ils ne peuvent que donner une idée de la réalité. Par exemple, plusieurs auteurs ont traduit sciemment par «rhumatismes», alors qu'il s'agit d'éléments pathogènes vivants qui créent des douleurs par leur passage dans les conduits corporels. Certes, il existe un réel pathologique (le nôtre !) et le médecin égyptien avait bien en face de lui des maladies réelles. On peut dans certains

cas, lorsque la maladie a une manifestation externe évidente et que cette dernière est bien décrite dans le texte médical (le meilleur exemple étant celui des maladies de peau). L'identification probable avec le terme antique. En fait, il s'agit d'une

l'on identifie ainsi la maladie réelle dont souffrait le malade examiné, et non l'idée que les médecins égyptiens s'en faisaient. Le danger constant est d'attribuer au médecin antique certaines connaissances que nous possédons aujourd'hui.

En 1930, la publication du papyrus Smith eut un grand retentissement sur

l'appréciation que l'on portait sur les connaissances médicales des Égyptiens. S'opposant à première vue au reste de la littérature médicale, le papyrus semblait quasi scientifique : il décrit successivement les blessures

et ne fait presque pas appel aux causes occultes. Cette originalité apparente ne repose que sur une erreur d'appréciation. Les signes objectifs des atteintes décrites sont si scrupuleusement notés dans ce papyrus que l'on a parfois considéré que le rédacteur ancien percevait le lien de causalité qui, pour nous, relie les observations rassem-

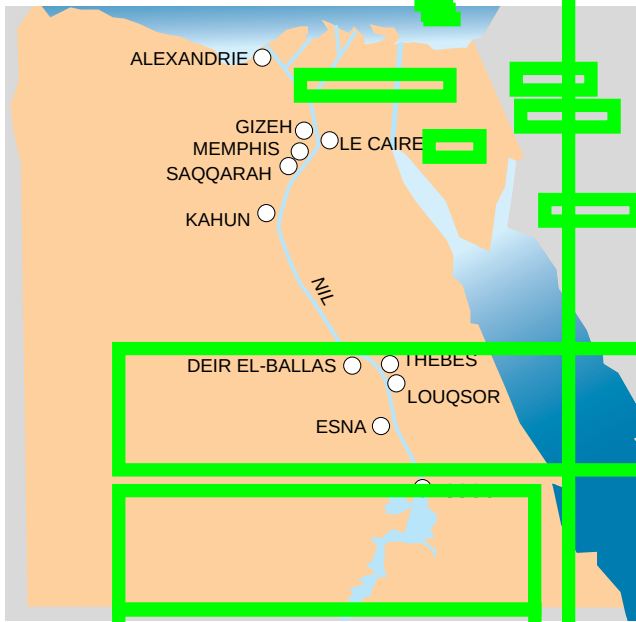
blées. Il n'en est rien : le papyrus Smith, en collectant soigneusement les observations médicales de différentes blessures, veut permettre au médecin de faire correspondre le cas particulier du blessé qu'il examine avec une des-

sure, sa gravité, et les signes cliniques rencontrés habituellement. En outre, les théories médicales décrites ne s'éloignent pas des théories en faveur à l'époque. Certains passages du papyrus Smith renvoient ainsi à ces théories selon lesquelles tout désordre entraîné par une lésion s'explique par la perturbation des souffles de



4. DU TEMPLE FUNÉRAIRE de Ramsès II (Ramesséum, XIX^e dynastie, 1200 ans avant notre ère), à Thèbes, proviendraient les papyrus médicaux les plus importants : le papyrus Ebers et le papyrus Smith. Les

magasins de ce temple recouvraient en outre un ancien cimetière de la XII^e dynastie (2000 ans avant notre ère), où furent retrouvés les plus anciens papyrus médicaux connus à ce jour (papyrus du Ramesséum).



5. LES LIEUX DE DÉCOUVERTE des plus importants papyrus médicaux sont Thèbes (papyrus Ebers et Smith), Memphis (papyrus de Berlin), Deir el-Ballas (papyrus Hearst). On ignore le plus souvent la provenance des autres papyrus médicaux, qui sont issus de fouilles clandestines.

vie parcourant l'intérieur du corps et par l'action d'éléments dangereux qui profitent de l'état du blessé pour l'envahir.

En 1989, j'ai donné une nouvelle traduction de la totalité des textes médicaux égyptiens édités. Les interprétations qui s'étaient imposées dans le souci actuel des chercheurs en histoire des sciences, qui, plutôt que juger, tâchent de comprendre « de l'intérieur » la pensée des Anciens pour en retrouver la logique interne.

Les souffles, cause de maladie

Dans ces textes, on ne trouve pas de noms de maladies au sens moderne du terme, c'est-à-dire des mots ou des expressions dénommant un état pathologique par ses symptômes. De nombreux passages indiquent des listes de symptômes qui étaient associés chez les personnes souffrant de certaines maladies, mais nous l'avons dit, les maladies elles-mêmes n'étaient pas nommées.

Les Égyptiens n'identifiaient pas les maladies ; ils cherchaient les causes des symptômes individuels.

On pensait que les troubles résultaient le plus souvent de l'action d'agents extérieurs (substances animées par un souffle pathogène) contre lesquels étaient alors prescrites des médications destinées à les détruire ou à les

venir. Les éléments qui constituaient le monde organisé et hiérarchisé qu'ils avaient sous les yeux, se trouvaient à l'origine dispersés dans une sorte de boue liquide, le *Noun*, le créateur était dissous. L'émergence de ce dieu créateur par une sorte de sédimentation naturelle expliquait l'organisation des éléments dispersés. Dès lors, l'intervention directe du dieu dans l'équilibre du monde ne cessait jamais. Le *Noun*, réservoir de germes de vie, persistait à la périphérie du monde déjà bâti.

À chaque crue, le Nil, dont la source était cet inépuisable réservoir, apportait de quoi créer de nouveaux organismes. Selon cette conception, le développement d'un simple épi de blé ne se réduisait pas à la croissance d'un grain placé dans le limon. La crue apportait en solution dans son flot les éléments constitutifs de cet épi. Le processus de développement ne pouvait que le rôle d'une matrice où ces éléments constitutifs se liaient par un processus divin. L'intervention divine se faisait donc à l'extérieur de l'homme et dans l'homme. Toute recherche des causalités s'y ramenait, et toute spéculation médicale se déroulait dans le cadre étroit des causalités divines.

Cette vision du monde ne s'opposait pas à une véritable réflexion médicale. Au contraire, dans un monde où les dieux agissaient de toutes parts, on

chasser. Le corps n'était pas malade en lui-même, il était agressé. La médecine égyptienne cherchait les causes pathogènes reconnues.

Cette recherche étiologique (la recherche des causes) résulte des conceptions égyptiennes sur l'origine du monde organisé. Pour les Égyptiens, le monde avant son organisation par les dieux se résumait à un univers liquide, le *Noun*, où se trouvaient en solution tous les éléments constitutifs du monde à

devoir observer scrupuleusement les phénomènes pour comprendre les agissements divins. Cette observation permettait aux Égyptiens de concevoir comment s'exprimaient les modalités de la vie à l'intérieur d'un corps humain, c'est-à-dire, en termes modernes, comment le corps « fonctionnait ».

L'analyse des textes montre comment la question de l'origine des maladies est tributaire de cette conception générale sur l'origine des choses : l'idée première est toujours celle de l'intervention divine, les éléments constitutifs du corps humain n'ont pas de propriétés fixées ; ils sont le jouet de forces supérieures normalement bénéfiques. L'observation de l'état de santé, mais parfois néfastes (observation des signes de la maladie). Pour les Égyptiens, ces forces ont une réalité matérielle : ce sont des souffles actifs ou des substances pathogènes, animées par ces souffles, qui circulent dans les conduits du corps. Lorsque ces souffles s'introduisent dans le corps, certains constituants normaux du corps ont un rôle néfaste à cause du souffle pathogène qui les anime. Ces souffles peuvent encore entraîner des fausses routes pour les sécrétions corporelles naturelles, qui envahissent alors le corps.

De nombreux textes décrivent comment les germes sont animés par un souffle morbide qui dirige leur action et leur permet de s'insinuer dans le corps, de se déplacer, de franchir les obstacles. Trois d'entre elles, le sang, le *ââ* et les *oukhoudou*, très souvent citées dans les textes, illustrent la démarche intellectuelle propre aux praticiens de l'Égypte ancienne.

Le sang, bénéfique et dangereux

Le dieu Khnoum est le maître du souffle, la vie et la mort obéissent à ses décisions. Celui qui est vide de lui [du dieu, donc du souffle], le sang

hymnes au dieu Khnoum du temple d'Esna (en Haute-Égypte) correspond à l'idée égyptienne constamment animée sur le sang : un liquide bénéfique animé par le souffle de vie, support même de la vie. D'autres textes exposant des théories égyptiennes sur la création des formes de vie indiquent que le rôle habituellement dévolu au

sang est celui de «lier», rôle bâtisseur qui explique la formation et le développement de l'embryon, puis la croissance de l'être humain (le sang «die» alors l'alimentation en chairs).

Toutefois, certains passages des textes médicaux consacrés aux «substances qui nuisent au corps» (le sang peut avoir un rôle pathogène. Le sang, animé alors par un souffle pathogène, se met à «manger», lit-on dans les textes. Il y aurait alors inversion pathologique du rôle du sang, ce qui en ferait un facteur particulièrement dangereux de l'organisme. Dans tout le corps. D'autres textes indiquent que, lorsque le sang ne lie pas

les éléments du corps, les aliments qui y pénètrent, il bloque le passage des souffles de vie. L'interprétation égyptienne des processus morbides tient compte des conceptions physiologiques de l'époque.

Le ââ, source de vie et source de troubles

Le ââ est une substance qui peut parfois avoir un rôle pathogène. Un passage du traité de physiologie du papyrus Ebers indique qu'il provient du corps : «Quand les conduits se divisent au niveau de la tête, le sang se déverse dans la nuque, puis en suite, forment un réservoir. Une

source de troubles de ââ, c'est ce qu'ils forment extérieurement à la tête.»

Il existe toute une famille de mots appartenant à la même racine linguistique ââ trouvés dans des contextes variés. Il y a tout d'abord un rapport avec l'eau fertilisante, celle du Nil, nommée «l'eau ââ». Dans les textes médicaux, de la famille ââ, on retrouve constamment l'idée de «sécréter».

Si le ââ n'est pas uniquement le sperme, il garde toujours, dans les textes médicaux et non médicaux, le sens vague de fertilisant d'origine corporelle. On retiendra le sens de «sécrétion corporelle», de fluide parfois émis par les corps des dieux et

Les médecins, techniciens de la maladie

Le nombre de papyrus égyptiens est suffisant pour nous renseigner sur les pratiques médicales de cette époque, mais qui sont leurs rédacteurs ? Quelle était la place des médecins dans la société égyptienne ?

Ce qui frappe dans toute la littérature médicale égyptienne, c'est l'absence d'auteurs. Aucun traité médical de l'Égypte ancienne ne peut être attribué à un auteur particulier. On a recensé beaucoup de noms de médecins égyptiens, mais la documentation est essentiellement extra-médicale : inscriptions dans des tombes, sur des stèles, documentation administrative. Nulle part il n'est affirmé qu'une doctrine ou un remède ont été élaborés par un médecin particulier.

Cette absence d'auteurs reconnus s'explique par l'importance toute particulière de la médecine du palais royal. Autour du roi d'Égypte était rassemblé un cortège de grands médecins dont le rôle était de répandre à travers le pays les bienfaits attendus de l'art médical. Ils agissaient au nom du roi, délégués des dieux sur terre et seul garant, selon le dogme, de la santé de ses sujets. Une telle conception ne permettait à aucun praticien de la cour de se présenter comme un véritable auteur. Toutefois, autour du personnage du roi, se trouvait un médecin qui portait le titre de «Grand des médecins du palais» et qui était le médecin personnel du roi et le chef de tous les autres médecins d'Égypte.

Le plus ancien de ces «Grand des médecins» qui nous soit connu, Hésy-Rê, portait le titre de «Grand des dentistes et des médecins». Il est probable qu'à la longue, de tels titres n'étaient qu'un indice de rang hiérarchique pour la corporation des médecins du palais.

L'activité principale de tous les praticiens de la cour était la rédaction de manuels médicaux destinés au praticien de base, simple exécutant. Ils enferment ainsi l'activité quotidienne de ce dernier dans un cadre étroit : le médecin de tous les jours ne doit pas s'écarter des préceptes édictés par ses supérieurs hiérarchiques, sous peine de sanctions.



UN DES PANNEAUX DE BOIS trouvés dans la tombe de Hésy-Rê représente ce «Grand des médecins» de la III^e dynastie (-2700).

Pour comprendre cette organisation de la médecine du palais, on se fonde sur les mythes égyptiens, telle l'histoire de la querelle entre le dieu Horus, héritier présomptif du trône d'Égypte, et le dieu Seth, qui convoite cet héritage : Seth essaye d'abuser du jeune Horus qui, en se protégeant comme il peut, a les mains souillées par la semence de son rival. Isis coupe les mains de son fils. Lui en fabrique de nouvelles, puis parvient à contaminer à son tour Seth en lui faisant ingurgiter la semence de son fils répandue sur des laitues dont il était friand. Alors, dit le mythe, du front de Seth sortit un disque d'or que le dieu Horus mit sur son front. La signification du mythe paraît être la suivante : la ruse (les pouvoirs magiques d'Isis) permet au monde civilisé et raisonnable (symbolisé par Horus) de faire un enfant au désordre (le monde désordonné de Seth) et d'engendrer un dieu (Thot) qui représente au mieux ce que sont, pour les Égyptiens, nos sciences appliquées (écriture, magie, médecine).

On a retrouvé dernièrement, dans un papyrus, une liste de titres de dignitaires de l'ancienne Égypte, liste qui place en face de chaque titre un nom de divinité qui symbolise la fonction qu'il incarne. Le «Chef des médecins et des dentistes», dont le rôle devait être analogue à celui de Hésy-Rê, est assimilé à «Thot né aux deux seigneurs», c'est-à-dire d'Horus et de Seth. Le recours au mythe peut expliquer ainsi l'organisation de la médecine égyptienne : sous la direction d'Horus-pharaon (celui qui doit rétablir l'ordre toujours en sursis), Thot-Grand-des-médecins (le technicien) est chargé de définir les moyens pratiques de la lutte contre Seth (représentant le désordre, la force destructrice, la maladie) et de les faire connaître dans tout le pays.

Entretiens avec Émile Noël



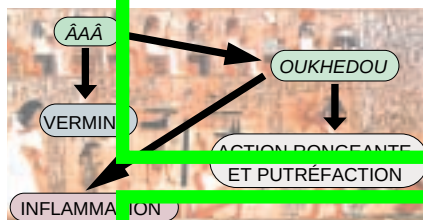
12 CLÉS POUR LE MÉDICAMENT

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

Code : 2020 215 pages – 75 F



Bon de commande en p. 98



6. DES FACTEURS PATHOGÈNES CIRCULANTS semblaient être la cause de nombreux processus morbides. Le *âââ*, émanation corporelle d'essence divine, pouvait se transformer en vermine intestinale. Il se transformait aussi en *oukhedou* dont l'action décomposante provoquait les inflammations et la putréfaction des chairs.

des démons, de liquides capables de se transformer dans l'organisme en éléments parasites variés.

En raison de ses transformations, ce *âââ* était tenu pour particulièrement dangereux. Les Égyptiens le croyaient notamment à l'origine de la vermine intestinale. Dans le passage du papyrus Ebers cité précédemment, le *âââ* est le sébum (une sécrétion grasse produite par des glandes sur la peau et sur le cuir chevelu), considéré comme une véritable peste. On lui attribue une pose qui existait une théorie faisant jouer à ce *âââ*-sébum un rôle essentiel dans la multiplication de la vermine, notamment de ceux des hommes (les poux notamment). L'une des principales actions nocives du *âââ* est, nous allons le voir, d'être à l'origine de facteurs pathogènes très importants, les *oukhedou*.

Les *oukhedou*, éléments rongeants maléfiques

Nous avons vu comment le sang (sauf quand il est considéré comme le principal facteur vital du corps, celui qui «lie» les chairs et bâtit le corps. Les textes médicaux font jouer aux *oukhedou* et au sang des rôles opposés. Les *oukhedou* sont liés aux matières en décomposition. Le sang agit dans un milieu vivant, alors que la présence d'*oukhedou* est synonyme de vieillesse et de mort.

Selon les textes médicaux, pour extraire des textes, les *oukhedou* seraient des substances animées par un souffle pathogène qu'on incorporait sans cesse en s'alimentant. Leur présence semblait expliquer la dissolution, sinon la putréfaction, de la nourriture dans le ventre de l'homme. Ils jouaient un rôle nocif en délitant la substance corporelle, ils s'opposaient aux processus de

cicatrisation (formation de pus par dissolution des chairs, action opposée à l'action liante du sang).

Les *oukhedou* provoquent la douleur par leur action rongeante. Cette idée est exprimée directement par le papyrus Ebers : «Si tu procèdes à l'examen d'un homme qui est atteint de cela épisodiquement, cela étant comparable à la morsure des *oukhedou*». Les Égyptiens considéraient que les *oukhedou* étaient le résultat d'un grignotage des chairs.

Certains textes indiquent que le *âââ* peut engendrer les *oukhedou*, mais la nature de ces derniers est différente : l'action pathogène des *oukhedou* agit sur le corps lui-même, tandis que le liquide fertilisant *âââ* est pathogène par les substances qu'il engendre (voir la figure 6).

Ces constructions théoriques, retrouvées par l'analyse des textes médicaux égyptiens, montrent que l'Égypte ancienne utilise une pensée médicale élaborée.

L'art médical égyptien reposait sur des traditions et des façons de faire millénaires, certainement en partie antérieures à la période historique. Au cours des siècles, une science des signes pathologiques, fondement de toute médecine, s'élabora afin de détecter l'état de maladie et de reconnaître les agents pathogènes nombreux, animés par des forces mystérieuses. La médecine égyptienne était remarquable aux moins deux titres : le choix des médicaments qui, en dehors d'un simple usage traditionnel pouvant remonter à la préhistoire, obéissait parfois à des critères complexes ; le savoir théorique et les connaissances pratiques qui étaient demandés au médecin de l'époque.

Thierry BARDINET est chirurgien-dentiste et docteur en sciences historiques et philologiques de l'École pratique des hautes études.

T. BARDINET, *Les papyrus médicaux de l'Égypte pharaonique*, Fayard, 1995.

P. GHALIOUNGUI, *La médecine des pharaons*, Robert Laffont, 1983.

M. D. GRMELIN, *Les maladies à l'heure de la civilisation occidentale*, Payot, 1983.

G. LEFEBVRE, *Essai sur la médecine égyptienne de l'époque pharaonique*, PUF, 1956.

H. GRAPOW, W. WESTENDORF, H. VON DEINES, *Grundriss des Medizin der Alten Ägypter*, Berlin, 1954-1963.

Le long sommeil des insectes

FRÉDÉRIC MENU • DOMITIEN DE LOUZIE

Dans certaines populations d'insectes, les individus s'endorment dans le sol pendant des durées variables. L'espèce est ainsi garantie contre les changements imprévisibles de l'environnement

Les insectes ont colonisé la plupart des régions du Globe, parce qu'ils se sont adaptés à tous les milieux. Dans les forêts équatoriales, la température, l'humidité et les ressources alimentaires sont abondantes et leur développement pendant toute l'année. En revanche, les espèces qui vivent dans les régions tropicales, tempérées ou arctiques endurent de longues périodes de sécheresse ou d'inondation, de froid ou de jeûne. La plupart des insectes se sont adaptés à ces conditions extrêmes grâce à des phases de vie ralentie, nommées dormances.

Ainsi, le cycle de vie du balanin de la châtaigne (*Curculio elephas*), un charançon qui attaque les châtaignes et les glands, comprend des phases de dormance de deux types : la diapause et la quiescence. Après la copulation, la femelle pond dans les châtaignes, dont elle a préalablement perforé la bogue épineuse et l'enveloppe à l'aide d'un rostre. Elle produit au maximum 50 à 60 œufs pendant sa vie (qui dure en moyenne 15 jours dans la nature) ; en général, elle dépose un à deux œufs par châtaigne. Le fruit, nichée son développement qu'une vingtaine de jours après la chute de ce dernier. Lorsqu'elle a atteint son quatrième stade, elle sort du fruit et s'enfouit dans le sol, entre 1 et 60 centimètres de profondeur selon les individus et le type de sol. Elle se confectionne ensuite une loge de terre et entre dans une période de

les réserves qu'il a constituées pendant qu'il était dans la châtaigne.

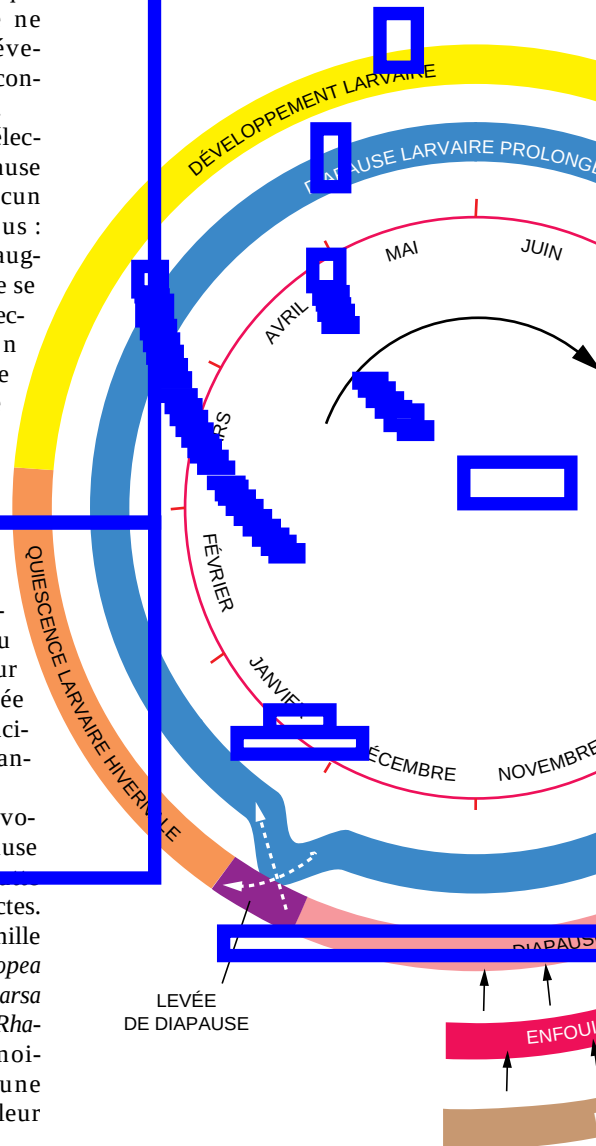
Pour une population donnée, l'année, 9, 7 et 4 pour cent en moyenne des adultes sortent du sol après respectivement un, deux et trois ans ; quelques individus y séjournent quatre ans. La proportion d'individus qui entrent en diapause prolongée ne dépend pas des conditions de développement et de reproduction rencontrées par l'insecte l'année suivante.

Pourquoi l'évolution a-t-elle sélectionné ce comportement ? La diapause prolongée du balanin ne procure aucun avantage reproductif aux individus : un insecte qui prolonge sa diapause augmente le risque de mourir avant de se reproduire. Nous verrons que la sélection naturelle semble favoriser un ensemble de gènes (génotype) capable de produire une diapause de durée variable. Cette variabilité garantit la population contre plusieurs facteurs imprévisibles : sécheresses estivales d'intensité variable, absence de régularité de l'abondance des fruits et des ravages des châtaignes au printemps par l'homme ou de leur consommation par les sangliers, les porcs ou les mouffettes. La destruction de 95 pour cent des larves présentes une année dans les fruits n'a qu'une faible incidence sur le nombre d'insectes de l'année suivante.

Outre son intérêt en biologie évolutive, la compréhension de la diapause peut être utile pour développer une méthode efficace et écologique contre les insectes. De nombreux ravageurs, tels la chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampae*, le doryphore *Leptinotarsa decemlineata*, la mouche de la cerise *Rhagoletis cerasi* ou le balanin de la noisette *Curculio nucum* présentent une diapause prolongée qui complique leur contrôle par l'homme.

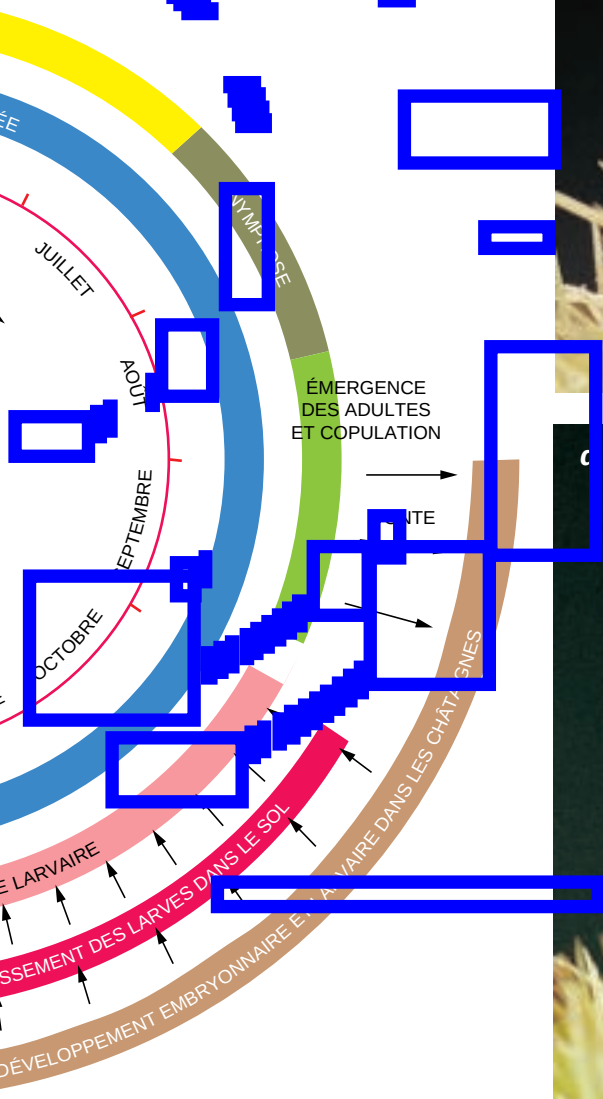
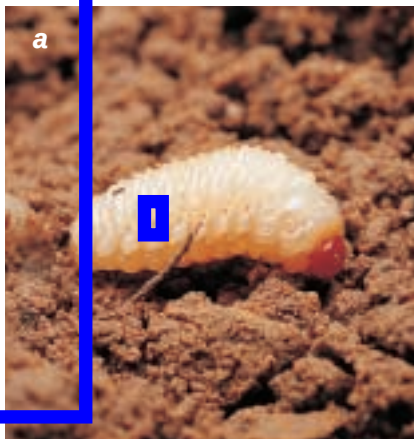
Dormir quelques mois

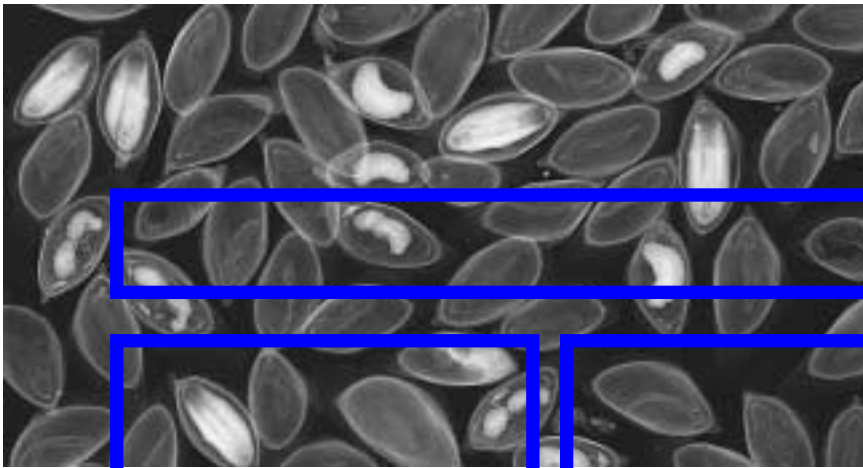
Afin de comprendre la diapause prolongée du balanin de la châtaigne, comparons-la à celle d'autres insectes. Quels états physiologiques correspond-elle ? Dans quelles conditions intervient-elle ?



Une partie seulement des larves sortent de diapause au début du premier hiver, vivent une période de quiescence, et reprennent leur développement au printemps ; les autres restent en diapause prolongée, pendant un, deux ou trois ans. Entre son enfouissement et sa sortie du sol, l'insecte ne s'alimente pas : il vit sur

1. LE CYCLE ANNUEL du balanin de la châtaigne comprend une période de dormance, nommée diapause : à l'automne, les larves de quatrième stade (a) s'enfouissent dans le sol (en rouge) et entrent en diapause (en rose). Une partie d'entre elles en ressortent au début de l'hiver (en violet) et restent en quiescence hivernale (en orange) tant que les températures sont basses. Pour une autre partie de la population, la diapause se prolonge pendant un deux ou trois ans (en bleu). Cet étalement est une garantie contre l'extinction de la population dans un milieu variable et imprévisible. Les larves qui sortent de quiescence au printemps continuent à se développer (en jaune), forment des nymphes (b et vert foncé) qui se métamorphosent en juillet et en août. Les adultes sortent alors du sol puis copulent (en vert clair) sur les châtaignes (c). Les femelles pondent dans les châtaignes, dont elles percent la bogue et l'enveloppe avec leur rostre (d) en août et en septembre. Les larves se développent alors (en marron) dans les châtaignes, jusqu'à la chute de celles-ci et leur entrée en diapause. Les périodes d'éclosion, de développement embryonnaire et larvaire, d'enfouissement et de diapause automnale se chevauchent en raison d'une forte variabilité interindividuelle.





2. Des larves de *Megastigmus spermotrophus*, un hyménoptère qui attaque les graines de sapin de Douglas, prolongent leur diapause pendant un an ou plus. Pendant ce temps, l'autre partie de la population poursuit son développement et entre en nymphose. On voit ici, aux rayons X, les deux stades de développement à l'intérieur des graines.

La dormance la plus simple est la quiescence : le développement s'arrête sous l'effet direct d'une baisse de la température, d'un assèchement ou d'un manque de nourriture. Lorsque, par exemple, la température descend en dessous d'une valeur seuil (qui dépend de l'espèce considérée), les réactions biochimiques du métabolisme sont arrêtées : l'insecte entre en quiescence. Dès que la température redevient supérieure au seuil, le développement reprend. L'entrée et la sortie de quiescence dépendent directement des conditions environnementales.

La diapause, en revanche, n'est pas un simple arrêt de croissance et de développement, mais un état physiologique dynamique, contrôlé par des modifications hormonales. L'entrée en diapause correspond au déclenchement de réactions biochimiques, telle la synthèse de glycérol et de sorbitol qui servent d'«antigel» à l'insecte pour résister au froid hivernal. Le développement de l'insecte est alors caractérisé par des rythmes physiologiques différents du développement classique. Ainsi, tandis que la vitesse de la morphogenèse diminue avec la température jusqu'à s'annuler lors de la quiescence, le développement de la diapause est accéléré par des basses températures. L'insecte se développe pendant de la température, comme chez le balai de la châtaigne.

Contrairement à l'entrée en quiescence, l'entrée en diapause a lieu avant que les conditions climatiques ou nutritionnelles ne se dégradent. Dans les régions tempérées, la diapause hivernale commence le plus souvent à la fin de l'été ou en automne, alors que les

températures sont encore favorables au développement. Les insectes réagissent à des signaux annonciateurs tels que la diminution de la durée du jour, qui précède chaque année l'abaissement des températures et la raréfaction de la nourriture.

Alors que la diapause intervient dès l'amélioration des conditions environnementales, la levée de la diapause n'a lieu que lorsque le développement de diapause est achevé. Chez le balanin de la châtaigne, la morphogenèse est arrêtée entre octobre et fin décembre, quelles que soient les températures subies par l'insecte pendant cette période.

Les individus qui sortent de diapause avant la fin de l'hiver entrent ensuite dans une phase de quiescence postdiapause. Pendant cette quiescence, l'insecte garde la plupart des caractéristiques de diapause (accumulation de graisse, résistance au froid), mais son développement est ralenti. Dès le retour des conditions favorables, les larves du balanin de la châtaigne sont ainsi maintenues dans un état de quiescence postdiapause entre janvier et février, car les températures ne dépassent le seuil de développement qu'en mars.

En plus de ces modifications saisonnières, prévisibles, de leur environnement. Grâce à ce comportement, ils résistent à des stress climatiques et nutritionnels périodiques. La diapause synchronise le développement d'insectes avec celui de la plante dont ils se nourrissent : beaucoup d'espèces des régions tempérées entrent ainsi en diapause à

l'automne et ne reprennent leur activité qu'au début du printemps de l'année suivante, en même temps que leur plante hôte recommence à se développer.

Dormir un an, ou plus

À la fin du XIX^e siècle, l'entomologiste français A. Giard a découvert que des larves de *Lygellus epilachnae*, hyménoptère qui pond ses œufs dans les œufs de la coccinelle *Epilachna argus*, prolongeaient leur diapause pendant un an. Ce comportement, d'abord considéré comme anormal, est pratiqué par de nombreuses espèces.

Le record de durée de diapause prolongée est détenu par le papillon *Protoparce inversus*, qui attaque les fruits du yucca dans les régions arides des États-Unis : des larves sont restées 17 ans en diapause. Une telle durée de dormance est exceptionnelle : chez la majorité des espèces étudiées dans la nature, les individus à diapause prolongée restent inactifs pendant seulement deux ou trois hivers (Ferguson, 1993). La proportion d'insectes qui sortent de diapause chaque année diminue lorsque la durée de la diapause augmente. Chez la mouche *Rhagoletis mendax*, qui attaque les myrtilles, en moyenne 80 pour cent des individus se réveillent après un hiver en diapause, 16 pour cent après deux hivers, 4 pour cent après trois hivers et 0,4 pour cent après quatre hivers.

La diapause prolongée est à distinguer des très longs développements connus chez plusieurs espèces. Par exemple, le cycle œuf-larve-nymphes de *Buprestis aurulenta*, coléoptère qui se développe dans les arbres, peut durer de 20 à 50 ans. Les nymphes des cigales américaines du genre *Magicalicada* émergent en masse du sol tous les 13 ou 17 ans, selon les espèces. Chez le hanneton commun *Melolontha melolontha*, en France, les adultes apparaissent tous les trois ans, après une succession de dormances hivernales et de phases de développement.

Quels sont les avantages adaptatifs de la diapause prolongée ? On ren-

contre ce comportement chez de nombreuses espèces vivant dans des environnements où de longues périodes sont défavorables au développement des insectes (régions arides, milieux d'altitude et arctiques). Il est aussi fréquent chez des espèces des régions tempérées qui se développent dans des graines ou dans des fruits : l'abondance de ces habitats temporaires, qui four-

nissent la nourriture, varie tous les ans. La diapause prolongée existe enfin chez des insectes qui se développent dans des larves ou dans des nymphes d'espèces présentant elles-mêmes une diapause prolongée : le développement des deux espèces est alors synchronisé.

Tandis que la diapause simple (hivernale ou estivale) permet aux insectes de survivre dans un environnement aux variations régulières, la plupart des diapauses prolongées sont des adaptations à des variations irrégulières des conditions climatiques et biotiques. Selon J. A. Powell, de l'Université de Californie, la quasi-totalité des larves des papillons du yucca du genre *Prodoxus*, qui vivent dans des régions arides des États-Unis, restent en diapause prolongée pendant quatre à huit ans (parfois plus) quand elles sont gardées, au laboratoire, à une température élevée et sans exposition directe aux précipitations. Des recherches complémentaires seraient nécessaires pour savoir si cette diapause est prédictive, c'est-à-dire contrôlée par des signaux environnementaux, telle la pluie qui annonce l'abondance des ressources alimentaires.

Une diapause prédictive stricte, où tous les individus d'une population prolongent leur diapause si certains signaux annoncent des conditions défavorables au développement et à la reproduction de l'insecte, n'a pas encore été observée dans les conditions naturelles, certainement car aucun environnement n'est totalement prévisible.

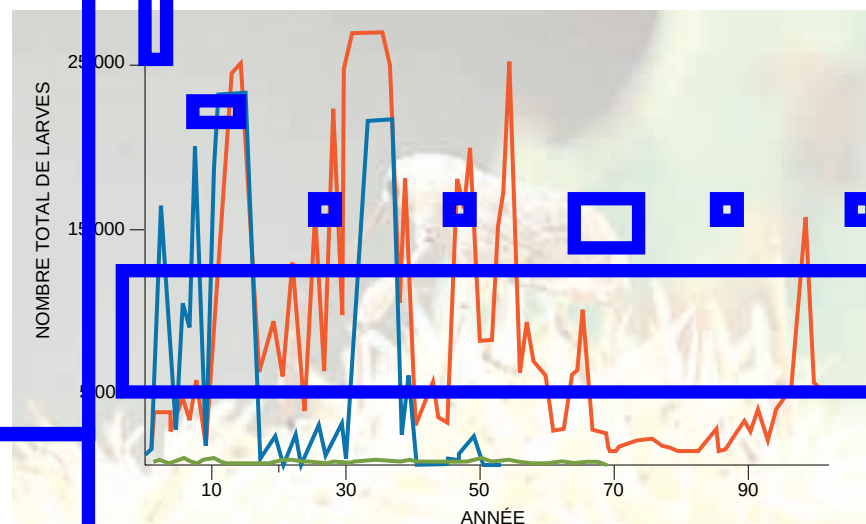
Chez la mouche du mélèze *Strobilomyia melania*, qui s'attaque aux graines et aux cônes du conifère, la proportion d'individus qui entrent en diapause prolongée varie de 5 à 50 pour cent selon l'année. Plus la production de cônes chute d'une année sur l'autre, plus la proportion d'entrées en diapause prolongée est élevée. Selon Alain Roques, de l'INRA d'Orléans, des substances chimiques contenues dans les cônes ont des conséquences directes sur l'entrée en diapause prolongée des insectes. L'abondance de cônes une année provoquerait des modifications physiologiques favorables à la diapause prolongée des insectes. La relation entre la durée de diapause et la production en graines n'est toutefois pas parfaite et, au sein d'une population, la diapause simple coexiste toujours avec la diapause prolongée. La diapause prédictive n'est donc pas le seul mécanisme responsable de ce comportement.

La diapause prolongée permet aussi à des espèces de s'adapter à des changements cycliques du milieu, de période supérieure à une année. C'est le cas de *Megastymus strobilobius*, qui attaque les graines d'épicéa en Finlande et en Scandinavie. Cette espèce est adaptée à la variation périodique de la production en graines de son hôte. Ainsi que cette dernière est statistiquement cyclique (elle est forte, en moyenne, tous les trois ans), les insectes ont une diapause prolongée de deux à quatre ans, avec un maximum

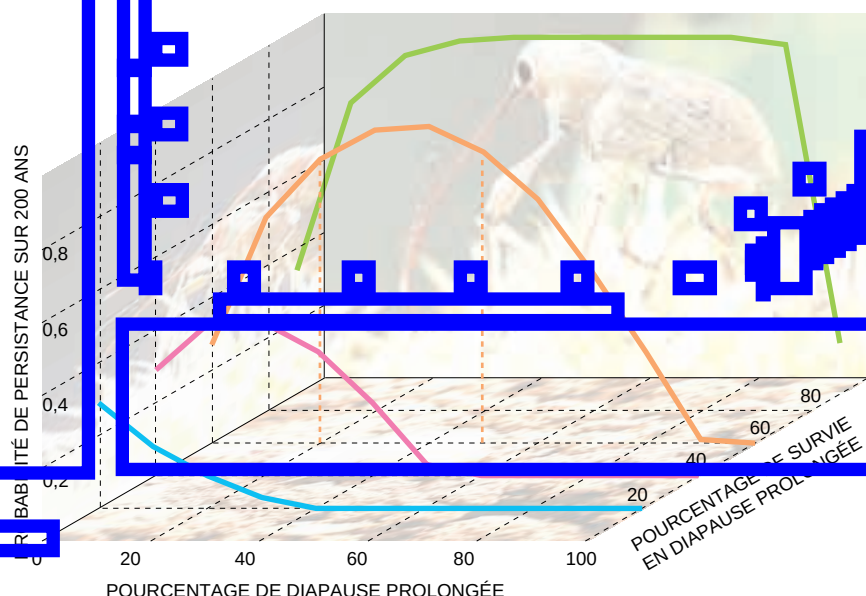
sur trois ans (plus de 50 pour cent des individus d'une population). Cette diapause prolongée cyclique n'est pas une

adaptation à la production de graines d'insectes d'une population émergent après deux, trois et quatre ans de dormance, indépendamment de la production réelle de graines par l'épicéa.

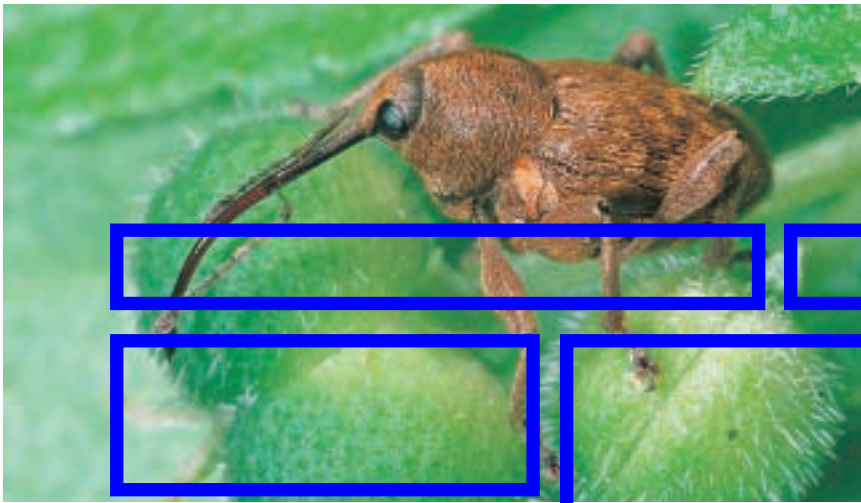
La diapause du balanin de la châtaigne est, en revanche, préventive : la proportion de la population qui prolonge sa diapause est relativement stable d'une année à l'autre. Aucun



3. L'ÉVOLUTION DE POPULATIONS du balanin de la châtaigne a été simulée par ordinateur. Des génotypes qui produisent des diapauses de durée fixe, de trois mois (en bleu) ou de 15 mois (diapause prolongée, en vert), s'éteignent avant 100 ans. En revanche, une population à génotype mixte qui prolonge la diapause chez 50 pour cent des larves se maintient facilement (en orange).



4. UN GÉNOTYPE À STRATÉGIE MIXTE, dont chaque année une partie des porteurs seulement entrent en diapause prolongée, a une forte probabilité de persister malgré des variations assez grandes du pourcentage de diapause prolongée. Si la survie des individus en diapause prolongée est, par exemple, de 60 pour cent (en orange), le pourcentage de la population qui entre en diapause prolongée peut varier entre 20 et 50 pour cent sans menacer l'existence de la population.



5. DES INSECTES RAVAGEURS DES PLANTES tel le balanin de la noisette *Corythidius pumilio* (à gauche) ou le chenille processionnaire *Thaumetopoea pityocampa* (au milieu) résistent bien aux variations de leur environnement et aux tentatives d'éradication menées par l'homme. Leur cycle de vie contient des périodes de diapause prolongée : en permanence, une partie de la population

signal ne permet à ces insectes de connaître les conditions environnementales de l'année suivante. Quel mécanisme génétique peut être à l'origine de ce comportement ?

La sélection des gènes

La diapause prédictive (ou en partie prédictive) est explicable par l'existence, chez les insectes, de génotypes qui ajustent la durée de la diapause aux conditions environnementales. Si des signaux qui annoncent les conditions environnementales futures existent, la sélection naturelle a retenu des génotypes capables de répondre à ces signaux en prolonger la diapause si les conditions sont défavorables. Une forte irrégularité dans la variabilité des conditions de l'environnement permet, à moyen terme, que ces génotypes envahissent la population : leur probabilité d'extinction est beaucoup plus faible que celle de génotypes qui n'entraînent qu'une diapause simple.

La diapause prolongée cyclique de *Megastigmus strobilobius* est explicable par la coexistence de trois génotypes, qui produisent une diapause de deux, trois et quatre ans. La production de graines par l'épicéa est statistiquement cyclique.

ans : une forte production a lieu, le plus souvent, tous les trois ans, mais aussi, plus rarement, tous les deux ou quatre ans. À long terme, aucun des trois génotypes n'est éliminé. Les individus que leur génotype conduit à une diapause de trois ans sont toutefois privilégiés.

La diapause prolongée préventive du balanin de la châtaigne provient-elle,

de la même façon, de la coexistence au sein d'une même population, de génotypes produisant des durées différentes, mais fixes, de diapause ? La méthode la plus rationnelle pour répondre à cette question est de simuler par ordinateur l'évolution de populations de balanin de la châtaigne dans un environnement variable et imprévisible. Pour simplifier, nous ne considérons que deux génotypes, dont les porteurs émergent après, respectivement, un an (diapause simple, noté DS), et deux ans (diapause prolongée, noté DP).

Comme la variabilité de l'environnement provoque des variations de la mortalité et de la fécondité des insectes, chaque année est caractérisée par les valeurs de trois paramètres : le pourcentage de survie des larves dans les châtaignes pendant la période de développement antérieure à la diapause, leur pourcentage de survie pendant l'année qui précède la reproduction (diapause, quiescence postdiapause, développement postquiescence) et la fécondité des insectes. Nous avons restreint la variation de chacun de ces trois paramètres à deux valeurs : une valeur défavorable et la valeur correspondante aux années défavorables. Nous avons fixé à 60 pour cent les valeurs une probabilité d'occurrence, aussi calculée à partir des observations. En tirant au sort les valeurs des différents paramètres pour chaque année, nous avons simulé l'évolution de populations de balanins sur 200 ans.

Dans ces conditions, les probabilités d'extinction des génotypes DS et DP sont fortes : en fixant à 60 pour cent la sur-

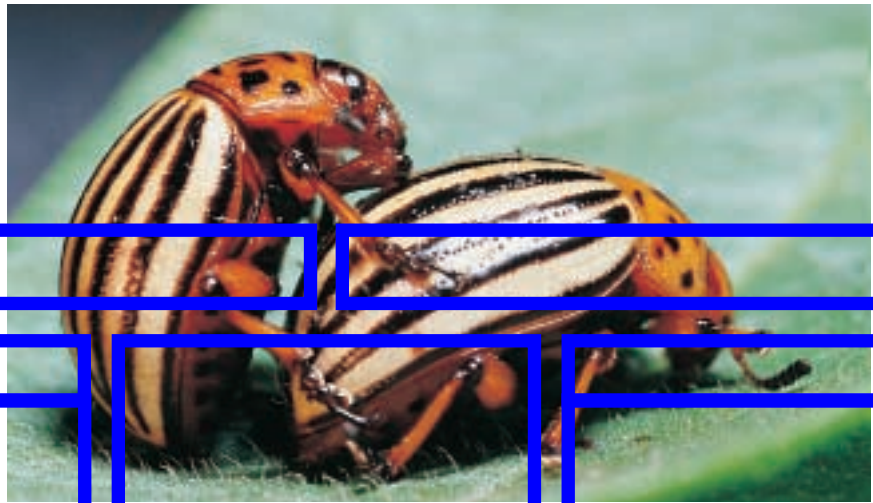
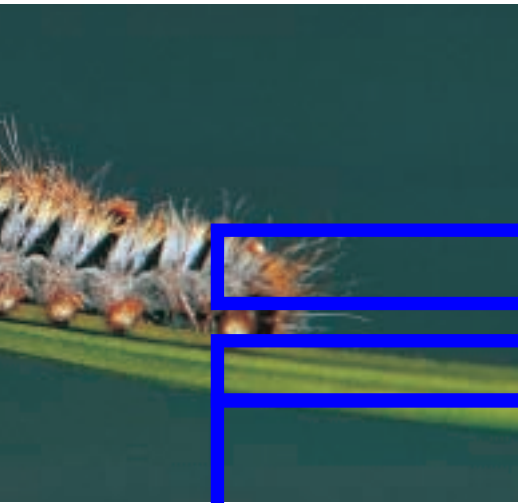
vie pendant la diapause prolongée, 70 pour cent des individus de génotype DS et 100 pour cent des populations porteuses des génotypes DS et DP.

Autrement dit, dans un environnement imprévisible, un génotype qui ne produirait qu'une diapause prolongée de durée fixe ne peut pas se maintenir dans des populations composées, au départ, uniquement de génotypes DS et DP.

Un génotype souple

Les populations de balanins seraient-elles alors composées principalement de porteurs de génotypes à stratégie mixte, qui déclenchent chez certains individus une diapause prolongée préventive et chez d'autres une diapause simple en fonction de facteurs environnementaux indépendants des changements futurs de l'environnement ? Nous avons testé cette hypothèse par la simulation : quand le pourcentage d'individus en diapause prolongée varie entre 30 et 50 pour cent et que le pourcentage de survie pendant la diapause prolongée est supérieur ou égal à 60 pour cent, la probabilité d'extinction des génotypes est beaucoup plus faible que celle des génotypes à composition en DS et DP.

numériques, ils ne s'éteignent que dans moins de 20 pour cent des cas dans un environnement qui varie de façon imprévisible. En ne mettant pas toutes ses larves dans le même panier, un génotype à stratégie mixte souscrit une assurance multirisque. Il est plus compétitif qu'un génotype à diapause simple et *a fortiori* qu'un génotype à dia-



est enfouie dans le sol et inaccessible aux traitements. Le doryphore *Leptinotarsa decemlineata* (à droite), originaire des États-Unis, a été introduit accidentellement en France, dans les années 1920, à Bordeaux. Il a envahi l'Europe en moins de 60 ans, probablement grâce aux diapauses hivernales, estivales et prolongée qui rythment son cycle de vie.

pause prolongée cyclique quand l'imprévisibilité du milieu est forte.

Comment la durée de la diapause d'un génotype à stratégie mixte est-elle déterminée? Thomas Philippi, de l'Université de l'Utah, a démontré la présence de génotypes à stratégie mixte chez *Lepidium lasiocarpum*, plante des déserts Nord-Américains : une même plante produit des graines qui présentent des dormances de durées variables. Cette variabilité n'est pas due à des différences génétiques entre les graines, mais à leur taille et à leur position sur la plante. Dans les régions où les pluies sont imprévisibles, ces génotypes augmentent leur chance de succès reproductif, car, chaque année, seule une partie des plantes risque de mourir par dessèchement. D'autres études sur les plantes ont montré que l'âge de la plante mère lors de la production des graines intervient aussi sur la durée de la dormance de la descendance.

Les mécanismes de la diapause simple (estivale ou hivernale) de plusieurs insectes sont aussi bien connus. L'entrée en diapause d'un œuf du ver à soie *Bombyx mori* est programmée au stade embryonnaire de la future mère. L'âge de cette dernière ou les conditions environnementales qu'elle subit influencent la durée d'autres espèces.

L'expression d'une diapause simple ou prolongée par un génotype à stratégie mixte dépend probablement aussi d'effets maternels, ou de facteurs climatiques ou nutritionnels subis par les larves avant ou pendant l'entrée en diapause. Le pourcentage de diapause prolongée chez l'hyménoptère *Neodi-*

prius sortier dépend probablement de la durée du jour et de la température au début de la diapause. Chez le balain de la châtaigne, la durée de la diapause pourrait dépendre du poids de la larve : plus elle a constitué de réserves, plus elle aurait tendance à prolonger sa diapause.

Les conséquences de la diapause prolongée sont très variables. Elle d'une population dépendent du type de diapause considérée. Les diapauses prolongées prédictives (ou en partie prédictives) et les diapauses prolongées cycliques conduisent à de fortes fluctuations annuelles des effectifs. En revanche, les diapauses préventives réduisent l'amplitude des variations. Dans tous les cas, la diapause prolongée

favorise la survie des populations dans un environnement irrégulier.

L'existence de la dormance prolongée dans des groupes aussi différents que les insectes, les crustacés, les vers, les nématodes, les plantes ou certains poissons tropicaux témoigne de son importance dans l'évolution des espèces. La similitude des comportements des

espèces éloignées résulte certainement d'une convergence adaptative sous des pressions sélectives semblables, telle l'irrégularité de l'environnement. La dormance prolongée réduit le risque d'extinction de nombreuses espèces animales et végétales : c'est un mécanisme majeur dans le maintien de la biodiversité de notre planète.

Frédéric MENU et Domitien DEBOUZIE sont respectivement maître de conférences et professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1, au sein du laboratoire de génétique, génétique et biologie des populations (UMR 5558 du CNRS).

Les photographies des balanins et des doryphores sont de Pierre AUDÉNIS, service photographique IASBSE de l'Université Claude Bernard.

M. TAUBER, C. TAUBER et S. MASAKI, *Seasonal Adaptations of Insects*, University Press, Oxford, 1986.

D. DANKS, *Insect Dormancy : an Ecological Perspective*, in *Biological Survey of Canada*, National Museum for Natural Sciences, Ottawa, 1987.

A. ROQUES, *Comment s'ajustent les populations d'insectes phytophages confrontés à des fluctuations saisonnières acycliques d'abondance de leurs hôtes ? L'exemple de*

la diapause prolongée chez les insectes inféodés aux structures reproductives de conifères, in *Régulation des cycles saisonniers chez les invertébrés*, pp. 113-116, sous la direction de P. Ferron, J. Missonnier et B. Marchamp (Colloques de l'INRA, n° 52), INRA, Dourdan, France, 1990.

F. MENU et D. DEBOUZIE, *Coin-Flipping Plasticity and Prolonged Diapause in Insects : Example of the Chestnut weevil Curculio elephas (Coleoptera : Curculionidae)*, in *Oecologia*, n° 93, pp. 367-373, 1993.

F. MENU, *Strategies of Emergence in the Chestnut weevil Curculio elephas (Coleoptera : Curculionidae)*, in *Oecologia*, n° 96, pp. 383-390, 1993.

T. PHILIPPI, *Bet-Hedging Germination of Desert Annuals : Variation among Population and Maternal effects in Lepidium lasiocarpum*, in *The American Naturalist*, n° 142, pp. 488-507, 1993.

La pêche à Terre-Neuve

JACQUELINE HERSART DE LA VILLEMARQUE

La pêche de la morue sur les bancs de Terre-Neuve a longtemps été rentable et, pendant près de 500 ans, de nombreux ports ont armé pour cette pêche. Saint-Malo fut l'un des derniers à désarmer, au début des années 1990.

«Ceux qui ont nommé les Bancs,
Les ont bien nommés.
Ils en font de beaux images,
Ils n'y en ont jamais été.
S'ils faisaient une campagne
Comme nous venons de faire.
Ils diraient que Saint-Pierre
C'est un pays d'enfer,
C'est un pays d'enfer.
...»

Chanson des terre-neuvas

Quelle fut l'importance de la pêche de la morue pour l'économie française? Pour les ports qui ont armé pour Terre-Neuve? Que nous apprend l'histoire de cette pêche, c'est-à-dire celle des hommes qui la pratiquaient? L'étude des documents, archives et inventaires notariaux révèle que cette pêche a été l'économie dominante de plusieurs ports; elle reflète l'évolution des techniques de pêche et de construction des navires. Ce poisson que l'on savait conserver dans le sel compensait, dans de nombreuses régions, la pénurie de viande et de légumes.

Le nombre de bateaux armant pour Terre-Neuve – les terre-neuviens – n'a cessé d'augmenter du XVI^e au XX^e siècle, et ce jusqu'à la Seconde Guerre mondiale que le déclin a été irréversible. Toutefois, cette évolution globale a été maintes fois perturbée. Pourquoi, certaines années, les bateaux restaient-ils au port? Une étude minutieuse de ces années néfastes indique que les périodes de sécheresse, de guerres perturbaient l'activité des terre-neuvas.

Les Normands découvrent l'île de Terre-Neuve à la fin du IX^e siècle, mais ils oublient peu à peu le chemin du Nouveau Monde. Au XII^e siècle, les Basques traversent l'Atlantique à la poursuite des baleines et découvrent le Grand-Banc, un haut fond remar-

quablement riche en poissons. Deux siècles plus tard, après une nouvelle période d'oubli, ils redécouvrent Terre-Neuve et nomment l'île *Terra-Bacalaos*, c'est-à-dire le Pays des morues. Ils s'établissent sur l'île du Cap-Breton, en Nouvelle-Écosse et au Sud-Ouest de Terre-Neuve. Au XV^e siècle, les Bretons et les Normands rejoignent les Basques. Le 24 juin 1497, le Génois Jean Cabot et son frère, le navigateur, s'installent à

Breton. Vers 1500, les Portugais arrivent à Terre-Neuve. En 1506, Jean Denys, de Honfleur, et Thomas Aubert, de Dieppe, naviguent du côté du cap Bonaville à Terre-Neuve. À partir de cette date, des marins embarquent régulièrement à Dieppe, La Rochelle, Honfleur et Saint-Malo, pour aller pêcher à Terre-Neuve.

Au XVI^e siècle, la pêche de la morue devient un commerce très lucratif. C'est le début d'une véritable pêche intensive dans l'Atlantique Nord, qui ne diminue qu'au XIX^e siècle. Cette pêche difficile, à la limite des capacités humaines, du climat et les difficultés de traversée de l'Atlantique, est source de nombreux conflits, notamment avec les Anglais; divers traités d'attributions des zones de pêche ponctuent l'histoire de la pêche à Terre-Neuve.

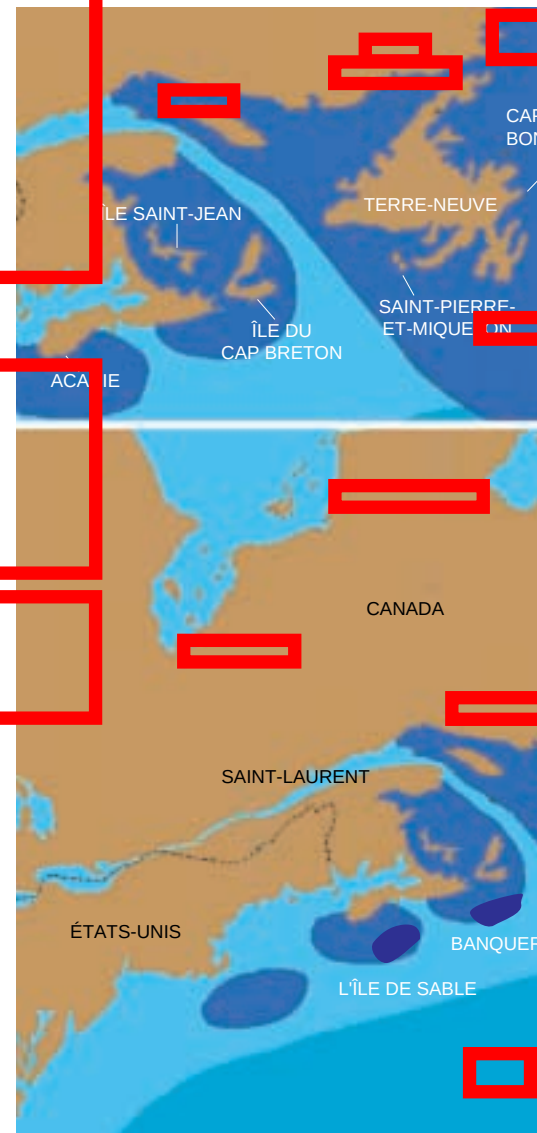
Le poisson

La morue *Gadus morhua*, est un poisson de mers froides d'Europe, de la Méditerranée, de l'Atlantique Nord et l'Ouest. Dénommé cabillaud quand il est vendu et consommé frais, ce poisson devient morue quand il est conservé après salage et séchage.

1. PLUSIEURS STOCKS DE MORUE (en violet) parsèment les océans. La côte de Terre-Neuve et le Grand-Banc ont été sillonnés par les pêcheurs de morue, du XVI^e au XX^e siècle.

On a identifié plusieurs stocks de morue qui ont des couleurs, des pigments différents : celui de Terre-Neuve, celui de l'Ouest du Groenland, des îles Féroé, celui de la mer du Nord, etc. (voir la figure 1).

On a beaucoup étudié l'évolution des stocks de morue. Le stock canadien qui, dans les années 1960, représentait 2,5 millions de tonnes, a commencé à diminuer dans les années

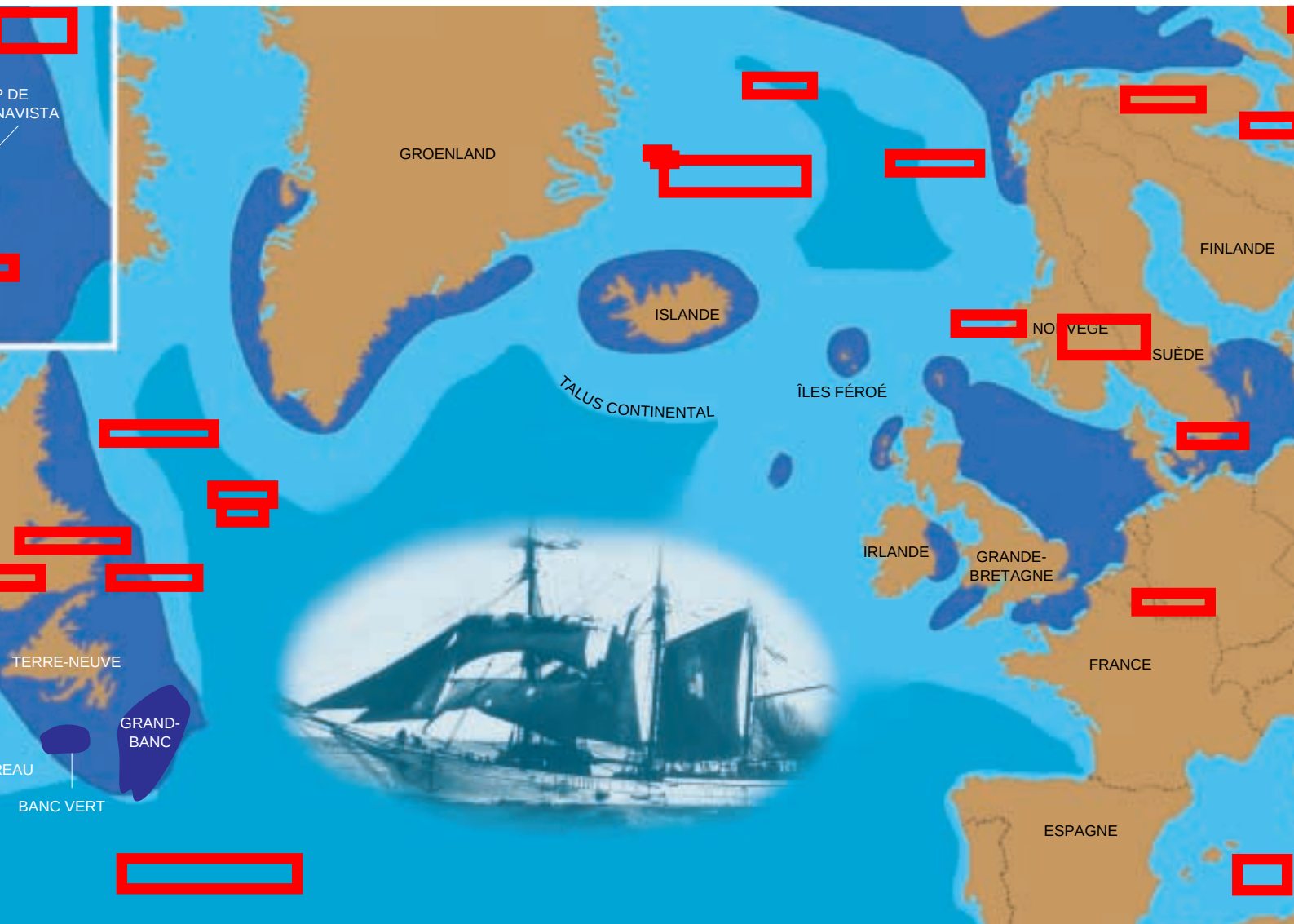


siècles précédents, du XVI^e à la fin du XVIII^e, le climat est beaucoup plus froid dans l'hémisphère Nord : on nomme cette période, le «Petit Âge glaciaire». Au cours des années froides, les glaces ne sont pas encore fondues au large de Terre-Neuve en mai et juin, de sorte que les bateaux ne peuvent s'y aventurer sans risque

gnées dans les registres notariaux. À partir du XVII^e siècle, la plupart des ports arment à la pêche morutière, et les notaires prêtent de l'argent à la «grosse aventure». Le nom du bateau, le tonnage, le nombre de marins embarqués sont consignés dans les minutes notariales. Pour le XVII^e siècle, outre ces registres, on dispose d'«Inventaires»

Les données proviennent surtout des Archives nationales, des Annales de la marine puis, à partir de 1865, des Statistiques de pêches qui donnent des chiffres fiables, mais parfois partiels.

Chaque voilier a deux chaloupes,
chacune manœuvrée par cinq ou six





2. LE DÉPART DES TERRE-NEUVAS, image d'Épinal, était toujours souvent un adieu. « Dans le sombre océan s'évanouissaient les marins, emportés par les vots ou perdus dans le brouillard. »

hommes qui pêchent de l'embarcation. À la fin de la journée, on pose une ligne de deux à trois kilomètres, que l'on relève le lendemain matin. Le poisson est débarqué sur l'échafaud, étêté, vidé, nettoyé, salé et mis à sécher sur la grève (ou grave) pendant l'été (voir la figure 4). Séchées,

les morues sont empilées dans le navire, qui retourne en France quand les cales sont pleines ou à la fin de la saison de pêche, vers le milieu du mois d'août. Il n'y a qu'une campagne de pêche sédentaire par an.

La pêche de la morue verte, ou pêche errante, se pratique en pleine



3. LES MARINS TENDENT DES LIGNES entre le navire et les chaloupes. Quel que soit l'état de la mer, ils doivent relever les lignes et charger le poisson sur les chaloupes, lequel est ensuite nettoyé, salé et stocké dans le navire. Les rigueurs climatiques contraignent parfois les marins à naviguer entre les icebergs (ici, à l'arrière-plan).

mer : le navire sillonne les bancs, à la recherche du poisson ; on pêche du bateau, une ligne à la main. Des demi-barils sont alignés le long du bord des navires, et un matelot se loge dans chaque demi-baril, revêtu d'un grand tablier de cuir, pour tendre leur ligne et le bateau dérive. À bord, le poisson est confié aux mousses qui le vidant, le nettoient et l'envoient dans les cales, où les sauteurs le frottent au sel et l'empilent en alternant les couches de sel et le poisson (on ne le laisse pas sécher). Le bateau repart pour la France à la fin de la saison, en octobre.

Après 1780, on pratique la pêche aux lignes dormantes, en utilisant une ligne de fond munie de plombs et d'une vingtaine d'hameçons garnis d'appâts. La ligne est tendue entre le navire et une chaloupe ; cette dernière s'éloigne du navire pour tendre la ligne.

Jusqu'à la Révolution, les deux sortes de pêche sont pratiquées séparément. Dès la fin du XVIII^e siècle, apparaît un armement mixte : on pêche la morue verte sur le Grand-Banc et on la sèche ensuite à Saint-Pierre-et-Miquelon.

les deux armements s'atténue encore et l'on ne distingue plus pêche errante et pêche sédentaire. À cette époque, à la suite de conflits franco-britanniques, le Canada est interdit aux morutiers français. L'essentiel de la pêche s'effectue à Terre-Neuve, sur les Bancs, autour de Saint-Pierre-et-Miquelon et de l'Islande, et en mer du Nord.

Au XIX^e siècle, les « doris » remplacent les chaloupes : ils sont plus légers et plus maniables, et deux hommes montent à bord. En pêche, chaque doris déploie jusqu'à trois kilomètres de lignes armées de cinquante à cent hameçons appâtés à la « boëtte » (des encornets, des capelans...). La ligne est tendue entre le doris et une bouée, maintenue au fond par une ancre. Quand le doris est plein, il regagne le bord... au fait : des centaines de doris ne sont jamais revenus, emportés par les brumes, chavirés par la tempête.

Au début du XX^e siècle, les zones de pêche fréquentées sont essentiellement le Grand-Banc de Terre-Neuve et l'Islande. La pêche est fructueuse en Islande jusque vers 1925, et sur les côtes du Groenland entre 1929 et 1938. Pendant les années de guerre, la pêche est interrompue, et les terre-neuviers

ne repartent que vers 1955. Après cette reprise, les ports qui continuent à armer pour Terre-Neuve cessent d'être actifs.

La pêche de la morue sèche nécessite des bateaux lourds, avec de nombreux mâts, tandis que celle de la morue verte requiert des bateaux maniables et rapides, avec un nombre limité de marins.

Les flottes

Plusieurs sortes de navires ont été construits pour la pêche : on les sépare en deux types principaux, ceux de conception nordique et ceux de conception portugaise. Les premiers sont des bateaux lourds, à larges flancs, puissants, de grande capacité, mais de vitesse réduite ; ce sont les heux, les hourques, les dogres, les roberges (voir la figure 5). Ils ont tous 100 à 200 tonneaux et sont utilisés pour la pêche sédentaire à Terre-Neuve ; l'équipage est constitué de 50 à 60 marins. Les navires de conception biscaïenne ou portugaise, utilisés pour la pêche errante, ont des tonnages plus faibles, de 30 à 50 tonneaux ; l'équipage se limite à une dizaine d'hommes. Les pinasses sont des embarcations à fond plat, en pin, utilisées pour la pêche sur le littoral aussi bien qu'à Terre-Neuve. Les caravelles ont deux ou trois mats et des voiles carrées : trois fois plus longues que larges, elles sont adaptées à la haute mer.

Au XV^e siècle, des navires lourds, à l'arrière rond, ont un tonnage moyen compris entre 100 et 300 tonneaux et sont destinés à la pêche sédentaire. Ainsi, la goélette est un bâtiment à fond plat, à deux mâts, jaugeant 50 à 300 tonneaux, avec l'avant et l'arrière ronds. Des bâtiments plus légers, des pinasses ou des fré-gates, ont un tonnage moyen de 70 à 100 tonneaux. La pinasse est un bâtiment à fond plat, carré et jauge 150 à 350 tonneaux. Au XVII^e siècle, le nombre de départs de terre-neuviens augmente notablement : 1 163 bateaux partent au XVI^e siècle, 4 341 au XVII^e. Ils partent d'abord une fois par an, puis, à partir de la fin du XVIII^e, deux fois par an, lorsque les conditions climatiques sont favorables.

Au XVIII^e siècle, les tonnages augmentent, mais au cours de la seconde moitié du siècle, des bateaux nouveaux apparaissent : les senaux, des bâtiments à deux mâts, qui jagent

La morue, *Gadus morhua*

Ce poisson des mers froides est commercialisé dès qu'il atteint 50 centimètres et 1,3 kilogramme. Les plus gros mesurent 1,4 mètre et pèsent jusqu'à 24 kilogrammes. Si le cabillaud peut évoluer entre la surface et 450 mètres de profondeur, il préfère rester près du fond. Il se cantonne dans les eaux froides dont la température est comprise entre trois et dix degrés.

La morue se nourrit de crabes, de petits crustacés et de crevettes, mais aussi de poissons, tels que les capelans ou les lançons. Les femelles sont plus grandes que les mâles.

En moyenne une femelle de la région du golfe du Maine, au Canada, pond annuellement un million d'œufs. À la saison de la ponte qui s'étend de novembre à mai, selon les régions, les morues se concen-

cent en larges bancs au-dessus des îles. À Terre-Neuve, les principaux lieux de ponte sont les bancs et la côte américaine. On a localisé des zones de ponte au Groenland, en Islande, en mer du Nord.

Les œufs de morue mesurent entre 1,1 et 1,8 millimètre de diamètre ; ils sont transparents, et leur période d'incubation est fonction de la température.

À 15 °C, l'éclosion a lieu en une dizaine de jours ; à 6 °C, plus de 20 jours sont nécessaires ; après des deux tiers des œufs meurent lorsque l'eau est à 0 °C. Beaucoup de ces œufs sont dévorés par des poissons, par de petits crustacés ou ne sont pas fécondés, de sorte que peu de larves se développent.

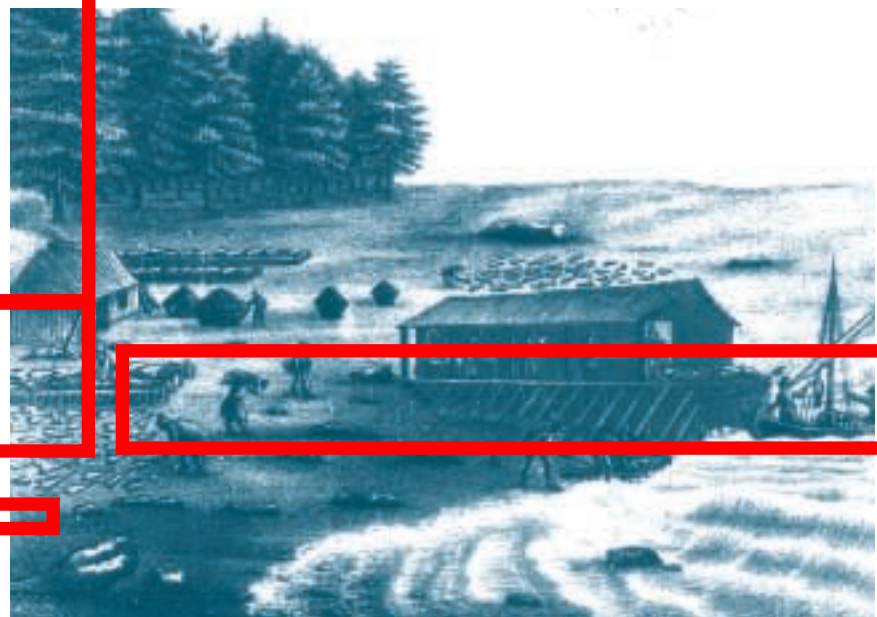


entre 100 et 150 tonneaux, et jagent de 50 à 100 tonneaux. Les dernières sont des voiliers à deux mâts ; leur tonnage est inférieur à celui des senaux, mais leur nombre est supérieur.

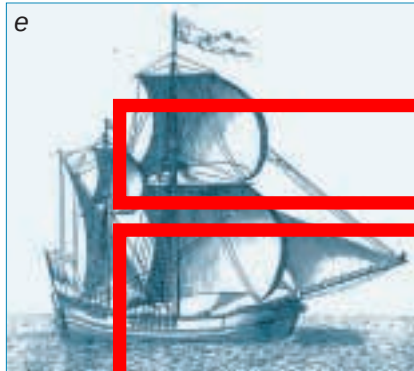
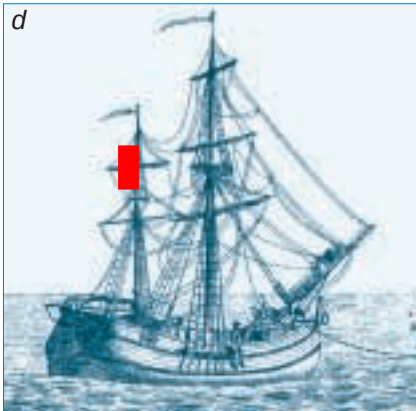
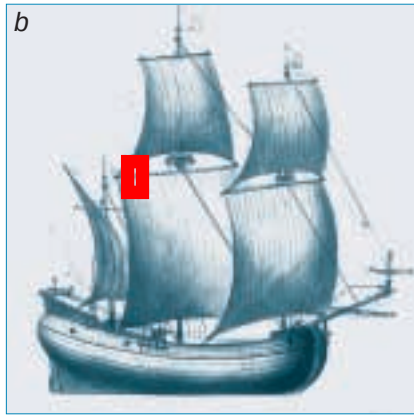
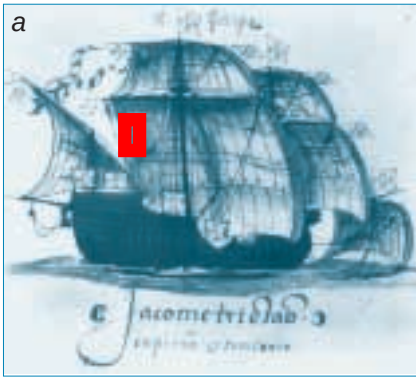
La goélette est le bateau morutier spécifique. Il est adapté au « métier de la mer » : son pont dégagé permet d'y loger les barils et de laisser de la place aux hommes pour pêcher. La « goélette

réée au mât de misaine, et le « brick-goélette » a jusqu'à cinq mâts.

Pour la pêche à Saint-Pierre-et-Miquelon, on envoie en mars des goélettes de 50 tonneaux, avec huit hommes d'équipage qui pêchent, traitent le poisson, puis le débarquent à Saint-Pierre pour le faire sécher sur les échafauds. Ils vont pêcher par trois fois



4. LES SÉCHERIES de morue étaient aménagées sur la côte de Terre-Neuve. Le poisson était apporté à terre par chaloupe (à droite), préparé sous le hangar, lavé, salé, puis mis à sécher sur des « échafauds » (à gauche), des plates-formes en bois construites sur pilotis. Après séchage, la morue était embarquée dans des navires qui appareillaient pour la France.



5. DIFFÉRENTS TYPES DE TERRE-NEUVIERS : le plus ancien est une caravelle (a) qui date du XV^{e} siècle. Au XVII^{e} , le flibot (b) et la pinasse (c) remplacent la caravelle. Puis, au XVIII^{e} , on construit des hourques (d), des galiotes (e) et des frégates (f). Les bateaux du XIX^{e} siècle sont des bricks (g) et des bricks-goélettes (h).

sur le banc de Saint-Pierre, rapportent les prises qu'ils laissent sécher et, la quatrième fois, ils pêchent la morue verte, qu'ils emportent avec eux. Ils font voile vers la France. Au printemps, de gros brigantins de 100 à 200 tonneaux, avec 16 hommes à bord, arrivent à la colonie, déchargent des marchandises qu'ils troquent contre la morue laissée à sécher par les marins des goélettes, pêchent à la morue sèche et repartent vers la France avec toute la cargaison.

Au XX^{e} siècle, des goélettes à trois ou à quatre mâts et des goélettes à huniers partent encore pour Terre-Neuve. Les goélettes à huniers de Saint-Malo ont une jauge moyenne de 180 tonneaux, et le tonnage des trois et des quatre-mâts varie de 300 à 400 tonneaux. À partir de 1903 apparaissent les premiers chalutiers à vapeur.

qui partent pour l'Islande, puis pour Terre-Neuve. Les chalutiers de la Grande Pêche ont entre 70 et 100 tonneaux. Après 1918, ils atteignent 400 tonneaux et sont équipés de machines à vapeur d'une puissance de 700 à 800 chevaux, qui assurent des vitesses de 10 à 12 nœuds (18 à 22 kilomètres par heure).

Les ports morutiers

De 1500 à 1950, nombre de ports français s'ouvrent à la morue. Au XVI^{e} siècle, presque tous les ports de la Manche et de l'Atlantique participent à cette pêche, notamment ceux où l'argent abonde : Rouen, Saint-Malo, Nantes, Olonne, La Rochelle, etc. Entre 1510 et 1540, une cinquantaine de ports envoient des bateaux pêcher la morue. Certains se spécialisent dans la morue verte, tels Fécamp, Honfleur ou Le Havre, d'autres deviennent des ports de morue sèche, tels Nantes ou Bayonne ; certains ports pratiquent les deux sortes de pêche. Les Bretons et les Basques s'embarquent régulièrement dès 1506. Au XVI^{e} siècle, les premiers ports morutiers sont La Rochelle et Bayonne. Bientôt, les Bretons se joignent à eux.

Les premiers à s'aventurer sur les côtes de Terre-Neuve sont les Bretons. Ils envoient alors que quelques morutiers en pêche.

Le XVII^{e} siècle marque l'essor de la Grande Pêche, avec une augmentation notable des terre-neuviens. Sur les lieux de pêche, on assiste à la concentration de la pêche sédentaire dans certaines régions et à la création

de colonies de pêcheurs, bien que le climat soit particulièrement rigoureux et que les glaces polaires avancent. L'État encourage la formation de matelots, la France et l'Angleterre se livrant bataille pour acquérir l'hégémonie des mers en Europe.

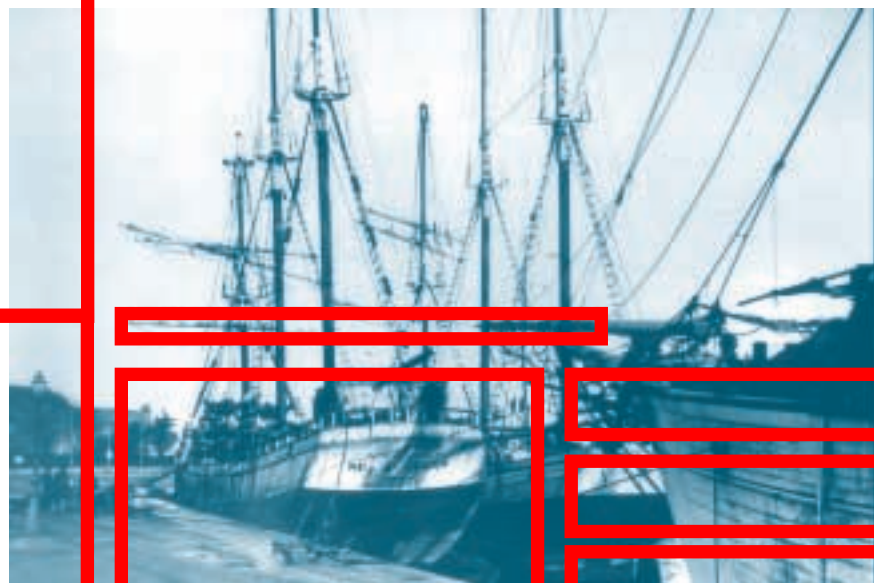
Au XVIII^e siècle, bien que les campagnes de pêche soient perturbées par des guerres, le trafic morutier français augmente. En 1713, à la révocation de l'édit de Nantes, en 1685, ébranle le commerce terre-neuvier de Nantes, de La Rochelle et du Havre : de nombreux armateurs protestants quittent ces régions. De surcroît, entre 1688 à 1697, la guerre de la Ligue d'Augsbourg dresse l'Europe contre Louis XIV et sa volonté de conquêtes.

D'après l'inventaire Colbert de 1664, 17 ports sont actifs : Dunkerque, Dieppe, Le Havre, Honfleur, Cherbourg, Granville, Saint-Malo, Saint-Brieuc, Nantes... Au XVIII^e siècle, Saint-Malo est sans conteste devenu le premier port morutier français. Parmi les 1 805 bateaux qui partent pour Terre-Neuve, les trois quarts pratiquent la pêche sédentaire et rapportent de la morue sèche.

Le XVIII^e siècle est marqué par la guerre de Sept Ans (1756-1763), le nombre de départs de bateaux diminue : l'insécurité règne sur les mers, et les Anglais pillent et incendient les ports de Terre-Neuve. Cette guerre se conclut par le traité d'Utrecht, qui contraint la France à abandonner Terre-Neuve et l'Acadie à l'Angleterre, laquelle affirme ainsi sa suprématie maritime.

En 1763, la guerre de Sept Ans contre l'Angleterre s'achève par la signature du traité de Paris, qui oblige les Français à abandonner le Canada, le Labrador, l'île du Cap-Breton et l'île Saint-Jean. Il ne reste aux morutiers français que l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon, au large de Terre-Neuve, le *French Shore*. La guerre de l'Indépendance américaine, de 1779 à 1783, freine encore les départs de navires pour Terre-Neuve. En 1783, le traité de Versailles modifie les limites de la côte de Terre-Neuve concédée aux Français : elle se limite désormais à la côte Ouest de l'île.

Durant 25 ans, ces guerres se succèdent ; elles ne s'achèvent qu'avec la Révolution française. Pendant cette période, le commerce s'intensifie avec



6. RETOUR DES TERRE-NEUVIERS À SAINT-MALO.

les Annelles, et les capitaux se concentrent dans certains ports, ce qui modifie l'activité des ports morutiers. L'activité de quelques ports diminue, et certains sont même contraints d'y renoncer, tels Rouen ou Nantes. Cinq ports conservent ou augmentent le nombre des navires en pêche, dont Saint-Malo, Dunkerque, Cherbourg,

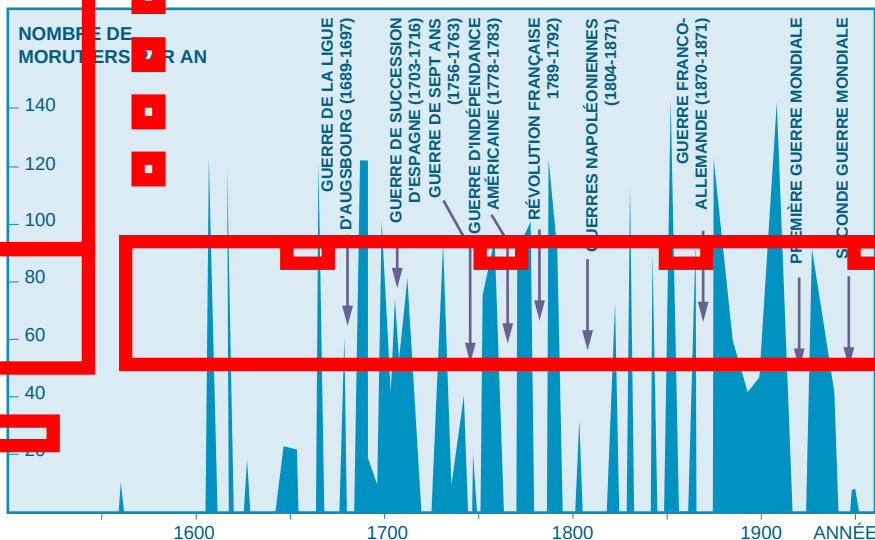
Le XVIII^e siècle est celui de l'apogée de l'armement terre-neuvier de Saint-Malo. Premier port morutier de la pêche sédentaire, Saint-Malo arme aussi à la pèche errante : la pêche de la morue verte s'intensifie au cours de la seconde moitié du siècle, lorsqu'un loi imposant des droits élevés sur la pêche est assouplie par Louis XV.

Une période de paix et de prospérité s'étend de 1749 à 1756.

Saint-Malo, premier port morutier au XVIII^e siècle

Chaque année, 80 bateaux environ partent vers Terre-Neuve et pratiquent la pêche sédentaire.

l'indépendance américaine et la Révolution française. En 1793, à la chute de la monarchie, le traité de Versailles, la pêche de la morue verte est interdite. En 1783, le traité d'Utrecht, qui rapporte à l'Angleterre la pêche de la morue. À Terre-Neuve, la pêche de la morue verte, le poisson se vend mal. De surcroît, la crise économique cède et les troubles politiques



7. L'ÉVOLUTION DU NOMBRE DE NAVIRES ayant appareillé pour Terre-Neuve au départ de Saint-Malo reflète les périodes de troubles politiques qu'a traversées la France. Au cours des guerres, les pillages en mer étaient fréquents, et les marins expérimentés de Terre-Neuve étaient réquisitionnés par la Royale, de sorte que peu de navires quittaient le port.

Le Grand Mécier

« Et puis il y a les hommes. Ceux des voiliers, passant des heures à boîter des kilomètres de lignes et des milliers d'hameçons des heures à souquer sur les avirons d'undoris que les lames se renvoient comme un bouchon, pour aller les poser, ces lignes, à deux ou trois milles du bord ; des heures à attendre l'arrivée d'un opaque sans retrouver le navire.

Dur, effrayant métier, pour un maigre pain. Trente heures de travail pour quelques heures de sommeil, l'inquiétude du retour, la fatigue, l'éloignement de la famille, en fait il n'y a pas pour que la moindre querelle, la maladie, le cafard engendrent les rongantes idées noires ? »

Ablé YVON, *Les bagnards de la mer*

La pêche de la morue était difficile et dangereuse. Avant leur départ, les marins demandaient la protection des saints et de la Vierge, les églises bretonnes sont ornées des multiples offrandes des marins qui ont

été épargnés et sont revenus des Bancs de Terre-Neuve.

Le recrutement se faisait dans les campagnes, les mousses étaient embarqués vers 15 ans, les veaux américains. Les souffrances devaient matelots après quelques campagnes de pêche. L'armateur payait à l'avance avant le départ et, au retour, une part proportionnelle à la valeur de la pêche. À bord, on mangeait du biscuit, du pain dur, du lard gras, des pommes de terre ; on embarquait aussi de l'eau et de l'eau-de-vie. La morue apportait des protéines et l'huile de foie, source de vitamines.

Le travail était pénible, la moindre écorchure se transformait en crevasse et en plaie en raison du froid et du sel. Le rythme de travail ne permettait aucun repos. Pour déjeuner, on se contentait au plus une vingtaine de minutes. Les marins, harassés, manquaient de sommeil, ils n'étaient pas soignés. L'alcool atténuait l'angoisse de se perdre dans les brumes.

se multiplient ; aucun morutier ne part de Saint-Malo entre 1793 et 1800.

Au XIX^e siècle, le nombre de ports morutiers diminue encore, bien que le nombre total des terre-neuviens continue à croître. Ce siècle est moins perturbé que le XVIII^e siècle, à l'exception faite de la Révolution de 1848 et de la guerre de 1870. Les bateaux ont de meilleures caractéristiques techniques. Certains ports cessent définitivement la pêche de la morue (Lorient, Nantes, Rochefort). En revanche, dans l'ensemble des ports de la Manche, l'activité morutière est intense.

Les six principaux ports morutiers sont Dunquerque, Saint-Malo, Granville, Saint-Brieuc, Fécamp et Paimpol. Saint-Malo est le deuxième port morutier du XIX^e siècle, avec plus de 5 400 départs répertoriés.

Entre 1830 et 1842, 90 terre-neuviens, en moyenne, quittent Saint-Malo. Ensuite, selon les années, le nombre de départs varie de 31 (en 1847) à 141 (en 1852).

À partir de 1860 et jusqu'à la fin du siècle, on compte une moyenne de 75 bateaux par an. Les meilleures campagnes sont celles de 1867 avec 119 morutiers en pêche et celles de 1874 avec 85 bateaux. La guerre de 1870 semble avoir eu peu d'influence sur l'activité morutière de Saint-Malo. La pêche fléchit irrévér-

siblement au cours des 15 dernières années du XIX^e siècle, mais les Malouins continuent à aller pêcher sur les Bancs, sur les côtes de Terre-Neuve et Saint-Pierre-et-Miquelon.

En 1900, à la suite d'accords avec la Commission internationale pour l'exploitation de la pêche sur la côte de Terre-Neuve. Les seules zones encore accessibles restent Saint-Pierre-et-Miquelon, les Bancs, l'Islande et le large du Nord. Les voiliers sont progressivement remplacés par les bateaux à vapeur, puis à moteur mécanique, même si, en 1912, les voiliers sont encore majoritaires.

Jusqu'en 1914, l'activité reste prospère à Saint-Malo : 56 bateaux partent en 1904 et 146 en 1912. La Première Guerre mondiale ralentit l'activité du port, mais la reprise a lieu dès 1919 : on dénombre 91 terre-neuviens en 1923. À la veille de la Seconde Guerre mondiale, plusieurs ports, naguère prospères, abandonnent la pêche à la morue.

Dieppe, Granville, Cancale arrêtent la pêche à la morue dès 1940. Trois ports reprennent leur commerce morutier après 1944 : Fécamp, Bordeaux et Saint-Malo, qui reste le premier port morutier de la première moitié du XX^e siècle. Seuls huit à dix morutiers partent encore chaque année, pour les Terres-Neuves

L'irréversible disparition des terre-neuviens

Activité importante, la pêche de la morue a été florissante aux XVII^e et XVIII^e siècles. Les techniques de pêche ont notablement changé au cours des siècles, et les rendements ont été améliorés : sous l'Ancien Régime, il fallait 350 navires et 10 000 hommes pour pêcher 56 000 tonnes de morue ; vers 1950, 29 navires et 1 600 hommes y parvenaient.

La pêche de la morue a influé sur l'architecture des ports, le recrutement des marins et sur le développement des ports. Les pêcheurs de morue de Terre-Neuve étaient des hommes expérimentés et étaient recrutés par la Marine royale en cas de guerre, on les incitait à partir sur les morutiers pour rapporter du poisson, mais aussi pour servir sur les navires du roi, le cas échéant.

Sur la cinquantaine de ports morutiers du XIX^e siècle, seuls quatre ports poursuivent cette activité, en 1950 : Saint-Malo, Fécamp, Bordeaux et Paimpol. En 1990, Saint-Malo a été le dernier port morutier français, avec les deux derniers chalutiers de l'armateur Pêve. Aujourd'hui, l'un s'est converti vers une autre pêche, l'autre va devenir un bateau-musée à Lorient.

On n'entendra plus la chanson des terre-neuviens citée en début d'article.

Jacqueline HERSART DE LA VILLEMARQUÉ est chargée de recherches au Laboratoire d'écologie halieutique, au Centre IFREMER de Nantes.

Ch. de LA MORANDIÈRE, *Histoire de la pêche française de la morue dans l'Atlantique septentrional*, éditions Maisonneuve et Larose, 3 volumes, 1962.

J. HERSART DE LA VILLEMARQUÉ, *Les pêches françaises du XVI^e au XVIII^e siècle. Relations avec le climat*, in *Équinoxe - IFREMER* n° 33, pp. 35-41, n° 34 (1^{re} partie), 1990.

J. HERSART DE LA VILLEMARQUÉ, *Les pêches françaises du XIX^e siècle. Relations avec le climat*, in *Équinoxe - IFREMER*, n° 34, pp. 37-43 (2^e partie), 1991.

J. HERSART DE LA VILLEMARQUÉ, *La pêche morutière française de 1550 à 1950. Statistique, climat, société*, in *Repères océan*, n° 11, IFREMER, 134 pages, 1995.

Einstein, père des trous noirs malgré lui

JEREMY BERNARDINI

Les équations de la relativité générale sont les fondements de la théorie moderne des trous noirs. Pourtant Albert Einstein voulait les utiliser pour démontrer que ces étranges objets célestes ne peuvent exister.

Les grandes avancées scientifiques ont parfois des conséquences qui dépassent non seulement l'imagination de leurs créateurs, mais aussi leurs intentions. La théorie de la relativité générale a ainsi contribué à établir le concept de trou noir, malgré Albert Einstein. En 1939, Einstein publie un article au titre décourageant : *Sur un système stationnaire à symétrie sphérique composé de plusieurs masses liées par la gravitation*. Avec cet article, Einstein pensait prouver l'inexistence des trous noirs, objets célestes si denses que leur gra-

vitité empêche même la lumière de s'en échapper.

Pour cette démonstration, il utilisa la théorie de la relativité générale, qu'il avait développée en 1916. Aujourd'hui utilisée pour démontrer que les trous noirs sont non seulement possibles, mais aussi, l'état final inéluctable de nombreux corps célestes. D'ailleurs, quelques mois après la parution de cette tentative de réfutation, Robert Oppenheimer et Hartland Snyder publièrent un article intitulé *Sur la poursuite de la contraction gravita-*

tionnelle, où ils utilisaient la théorie de la relativité générale pour montrer comment les trous noirs pourraient se former. Le physicien américain Carl Sagan a écrit : « La théorie de la relativité générale d'Einstein est la base de la physique moderne des trous noirs ».

des trous noirs, plus généralement, de l'effondrement des étoiles s'appuie sur un aspect différent de l'héritage d'Einstein de la physique statistique. Sans les effets décrits par cette physique, toutes les étoiles finirait par s'effondrer en un trou noir, ce qui conduirait à un univers très différent de celui où nous vivons.

Bose, Einstein et la physique statistique

L'introduction par Albert Einstein de la mécanique quantique en physique statistique fut inspirée par une lettre qu'il reçut en 1924. Le physicien indien alors inconnu, Satyendra Nath Bose. Cette lettre était accompagnée d'un manuscrit qui avait été refusé par un journal scientifique britannique. Après avoir lu le manuscrit, Einstein le traduisit lui-même en allemand et s'arrangea pour le faire publier dans la prestigieuse revue *Zeitschrift für Physik* (Revue de physique).

Pourquoi Einstein pensait-il que ce manuscrit était important ? En 1924, il s'était interrogé sur la nature des rayonnements électromagnétiques, surtout lorsqu'ils sont piégés dans un récipient chauffé et en équilibre thermodynamique avec les parois du récipient, ce qu'on nomme le corps noir. Au début du XX^e siècle, le physicien allemand Max Planck avait découvert la fonction mathématique qui



POUR ET CONTRE : en 1939, Robert Oppenheimer (à droite) avança que les trous noirs pourraient se former, alors qu'Albert Einstein essayait de réfuter leur existence. Leurs carrières se croisèrent à l'Institut d'études avancées de Princeton, à la fin des années 1940, lorsque cette photographie fut prise, mais l'on ignore s'ils discutèrent jamais de trous noirs.

décrivait l'intensité des divers rayonnements de ce corps en fonction de leur longueur d'onde (ou couleur). Il avait trouvé que la loi de Planck dépend pas du matériau de la paroi du récipient, mais seulement de sa température. Par exemple, lorsque l'on chauffe un morceau de fer, sa couleur passe successivement du rouge au blanc puis au bleu à mesure que la température s'élève : la couleur du fer, son spectre d'émission, dépend uniquement de sa température.

Bose avait utilisé la physique statistique pour étudier le rayonnement du corps noir, et il avait retrouvé la loi de Planck à partir des principes de la mécanique quantique. Fidèle à lui-même, Einstein généralisa le procédé : il utilisa la même méthode pour calculer le comportement d'un gaz de molécules massives qui obéissent au même type de loi que les photons. Bose avait utilisées pour les photons. Il en déduisit l'analogie de la loi de Planck pour ce cas et prédit un phénomène remarquable : lorsque l'on refroidit, à une température critique, le gaz de particules qui obéissent à la statistique dite de Bose-Einstein (les bosons), toutes les particules se retrouvent soudain dans un même état quantique « dégé-

né». Cet état de la matière est aujourd'hui nommé le condensat de Bose-Einstein (ou condensat de Bose-Einstein).

L'hélium 4 subit une telle condensation. Cet isotope de l'hélium a un noyau composé de deux protons et de deux neutrons. À la température de 2,18 kelvins ($-272\text{ }^{\circ}\text{C}$), ce gaz devient un liquide aux propriétés troublantes, s'écoulant notamment sans frottement (superfluidité).

Toutes les particules ne se condensent pas ainsi. En 1925, juste après les publications d'Einstein sur la condensation, le physicien autrichien Wolfgang Pauli identifia une seconde classe de particules qui se comportent différemment. L'électron, le proton ou le neutron sont des exemples de ces particules nommées fermions. Pauli découvrit que deux fermions identi-

ques ne peuvent jamais être dans le même état : cette propriété est aujourd'hui le principe d'exclusion de Pauli. En 1926, Enrico Fermi et Paul Dirac établirent les lois statistiques du comportement de ces particules, par analogie à la statistique de Bose-Einstein.

En raison du principe d'exclusion de Pauli, les fermions ne se condensent

pas à basse température. Lorsque l'on refroidit et que l'on comprime un gaz, ces derniers sont forcés de s'approcher si près qu'ils commencent par empiéter sur l'espace des voisins. Toutefois, comme ils ne peuvent être dans le même état quantique, ils s'évitent en s'enfuyant à des vitesses proche de celle de la lumière. Pour les électrons et pour les autres fermions, la pression créée par la dispersion de ces particules persiste même si le gaz est refroidi jusqu'au zéro absolu. Elle ne doit rien au fait que les électrons se repoussent mutuellement par leur charge électrique identiques : les neutrons, qui ne sont pas chargés électriquement, ont le même comportement : la pression d'un gaz dégénéré est purement d'origine quantique.

Statistique quantique et naines blanches

Quel est le rapport entre la physique statistique et les étoiles ? Au XIX^e siècle, les astronomes avaient identifié une catégorie d'étoiles particulières, petites et peu lumineuses : les naines blanches. Ainsi Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel, a un compagnon dont la masse est

L'histoire des trous noirs



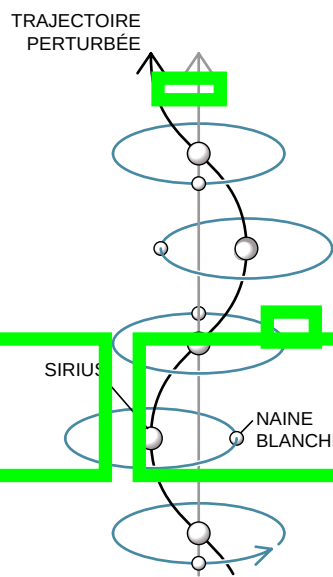
1900

Max Planck découvre le rayonnement du corps noir.



1905

Dans un article sur le rayonnement du corps noir, Albert Einstein montre que la lumière peut être considérée comme un flux de particules (les photons).



1915

Walter Adams observe le compagnon qui donne à Sirius sa trajectoire perturbée. C'est une petite étoile dense et chaude, une naine blanche.



1916

Einstein publie sa théorie de la relativité générale, dont les équations décrivent la gravitation.

voisine de celle du Soleil, mais dont le rayonnement est 360 fois inférieur. Quand on divise la masse d'une naine blanche par son volume, on obtient une densité considérable : un centimètre cube du centre du compagnon de Sirius pèse 61 tonnes. Que sont donc ces objets bizarres ? C'est Arthur Eddington qui le dira.

Lorsque j'ai commencé à étudier la physique à la fin des années 1940, Eddington était l'un de mes héros, mais pour de mauvaises raisons. Je ne savais rien de son remarquable travail en astronomie, mais j'admirais ses livres de vulgarisation. Eddington, qui mourût en 1944, croyait que toutes les choses importantes de l'Univers pouvaient être étudiées par la seule force de l'esprit. De la fin des années 1910, où Eddington dirigea l'une des deux expéditions qui

courbe le trajet des rayons lumineux, comme Einstein l'avait prévu, jusqu'à la fin des années 1930, Eddington était l'un des géants de la science du XX^e siècle. Il est un de ceux qui créèrent la discipline qui conduisit à la compréhension de la constitution interne des étoiles, titre de son livre de 1926, devenu un classique. Les naines

blanches étaient un affront que le ciel lui faisait, au moins du point de vue esthétique, ce qui ne l'empêcha pas de les étudier et d'avoir la bonne idée.

En 1926, Eddington imagina que la force gravitationnelle qui comprime une naine blanche pouvait arracher quelques-uns de leurs électrons aux atomes. Ces derniers perdaient ainsi leur front. Le gaz dégénéré aurait agglutiné les noyaux en un amas petit et dense. L'effondrement de la naine blanche aurait cessé lorsque la force exercée par la pression du gaz dégénéré d'électrons (quand le principe d'exclusion de Pauli force les électrons à s'écarter les uns des autres) aurait compensé la force de gravitation.

La masse limite

La compréhension des naines blanches progressa à nouveau en juillet 1930, grâce à Subrahmanyan Chandrasekhar, âgé de 19 ans seulement. Ayant lu le livre d'Eddington sur les étoiles et le livre de Fowler sur la mécanique quantique, Chandrasekhar avait été fasciné par les naines blanches. Invité à l'Université de Cambridge (où se trou-

vait Eddington) par le physicien britannique Ralph Fowler, Chandrasekhar avait pris son bateau pour relier Madras à Southampton. Pour passer le temps au cours de la traversée, il se demanda s'il existait une limite supérieure à la masse d'une naine blanche avant qu'elle ne s'effondre sous sa propre gravité. Sa réponse déclencha une révolution.

Comme une naine blanche dans son ensemble est électriquement neutre, tous les électrons ont un proton correspondant. Le proton étant 2 000 fois plus massif que l'électron, les protons de la naine blanche engendrent l'essentiel de la compression gravitationnelle. Si la naine blanche ne s'effondre pas, c'est que la pression du gaz dégénéré d'électrons et la force de gravité des protons s'équilibrent. Cet équilibre limite le nombre de protons et, par conséquent, la masse de la naine.

nommée la limite de Chandrasekhar, Cette masse maximale est égale à 1,4 fois la masse du Soleil. Les naines blanches plus massives sont instables.

Le résultat de Chandrasekhar troubla Eddington. Que se passe-t-il si la masse est supérieure à 1,4 fois celle du Soleil ? À moins qu'un mécanisme ne limite la masse des étoiles ou que



1916

Karl Schwarzschild montre que, dans les équations qui décrivent la gravitation d'une quantité de matière concentrée en un point, il existe un rayon ou une singularité apparaît.



1924

Einstein publie le travail de Satyendra Bose sur le rayonnement du corps noir et décrit le comportement statistique de particules nommées bosons (tels les photons).



1924

Arthur Eddington propose que, dans une naine blanche, la gravitation dissocie les noyaux atomiques séparant les électrons des protons.



1925

Wolfgang Pauli formule le principe d'exclusion, qui stipule que certaines particules ne peuvent se trouver dans le même état quantique.

le résultat de Chandrasekhar ne soit faux, toutes les étoiles massives étaient condamnées à disparaître dans un effondrement gravitationnel. Eddington trouva cela intolérable et contesta l'usage par Chandrasekhar de la physique statistique dans le feu public, publiquement et en privé. Ces critiques accablèrent Chandrasekhar, mais il tint bon, soutenu par des physiciens tels que Niels Bohr, qui lui assura qu'Eddington se trompait et qu'il ne fallait pas s'en faire.

Une sensation singulière

Tandis que certains exploraient ainsi la physique statistique et les naines blanches, d'autres examinaient le travail d'Einstein sur la gravitation : sa théorie de la relativité générale. À ma connaissance, Einstein ne consacra jamais de temps à rechercher des solutions exactes à ses équations de la gravitation. Pourtant, des solutions approchées décrivaient avec une précision suffisante des phénomènes tels que la courbure de la lumière par les étoiles. Aussi fut-il impressionné quand, en 1916, l'astronome allemand Karl Schwarzschild trouva la solution exacte

décrivant le champ gravitationnel produit par un corps à symétrie sphérique dans le vide.

Dans ses calculs, Schwarzschild observa qu'à une certaine distance du centre de l'étoile, le champ de gravitation ne devenait pas infini. À cette distance, nommée aujourd'hui rayon de Schwarzschild, la variable temps s'élimine des équations et l'espace devient infini. Les équations possèdent ce que les mathématiciens nomment une «singularité». Le rayon de Schwarzschild est généralement bien inférieur au rayon de l'objet considéré. Pour le Soleil, par exemple, il est égal à trois kilomètres, et pour une boule d'acier de une tonne (60 centimètres de diamètre), il est égal à 10^{-24} mètre (un millième de milliardième de milliardième de millimètre).

Schwarzschild savait que sa formule était absurde, mais il ne s'en soucia pas. Il décida que ça n'avait pas d'importance. Il construisit un modèle simplifié d'étoile et montra qu'il faudrait un gradient de pression infini pour la comprimer jusqu'à ce rayon. Cette singularité, pensa-t-il, était sans intérêt pratique.

Toutefois Einstein restait gêné, car le modèle stellaire de Schwarzschild ne satisfaisait pas certaines conditions

de la théorie de la relativité. Plusieurs physiciens montrèrent que l'on pouvait récrire les solutions de Schwarzschild, afin d'éviter la singularité, mais celle-ci disparaissait-elle vraiment ? Le débat se poursuivit ainsi jusqu'en 1939 dans le petit cercle des physiciens qui s'intéressaient au sujet.

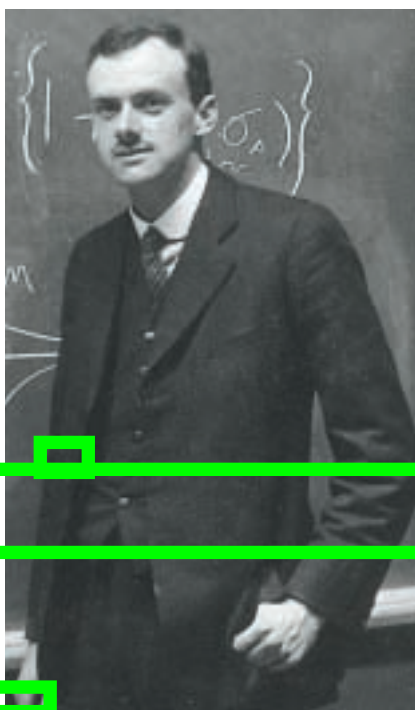
Dans son article de 1939, Einstein attribua son regain d'intérêt pour le rayon de Schwarzschild à des discussions avec l'astrophysicien Howard Robertson de l'Université de Princeton. Avec cet article, Einstein voulait venir à bout de la singularité de Schwarzschild. À la fin de son texte, il écrivait : «Le résultat principal de cette recherche est la compréhension claire des raisons pour lesquelles les singularités de Schwarzschild n'existent pas dans la réalité physique», formulé en langage

Pour sa démonstration, Einstein considéra un ensemble de petites particules qui se déplacent sur des orbites circulaires sous l'influence de leurs forces de gravitation mutuelles, un peu comme dans un amas sphérique d'étoiles. Puis il se demanda si une telle configuration pouvait s'effondrer sous l'effet de sa propre gravité en une



1926

Enrico Fermi et Paul Dirac édictent les lois statistiques qui décrivent les particules obéissant au principe d'exclusion de Pauli, les fermions (comme les électrons et les protons). Lorsqu'elles sont trop comprimées, ces particules s'éloignent les unes de l'autre ; ce mouvement crée une pression.



1930

En utilisant la physique statistique et le travail d'Eddington sur les étoiles, Subrahmanyan Chandrasekhar déduit que les naines blanches ne peuvent avoir une masse supérieure à 1,4 fois la masse du Soleil. Les étoiles plus massives devraient donc s'effondrer indéfiniment.

étoile stable de rayon égal à son rayon de Schwarzschild. Il conclut par la négative, car, à un rayon supérieur, les étoiles de masse donnée s'effondrent plus vite que la lumière, fin de maintenance d'une configuration stable. Bien que le raisonnement d'Einstein soit correct, sa conclusion l'est peu : peu importe qu'une étoile devienne instable quand elle se contracte jusqu'au rayon de Schwarzschild, car l'étoile continuera de s'effondrer au-delà de ce rayon.

Des neutrons aux trous noirs

Pendant qu'Einstein poursuivait ces recherches, Robert Oppenheimer et ses étudiants bâtit la théorie moderne des trous noirs (*Robert Oppenheimer et la physique théorique*, par John Rigden, *Pour La Science*, septembre 1995). Si l'histoire des trous noirs est curieuse, celle de son origine ne l'est pas moins : cette théorie fut inspirée par une idée qui se révéla complètement fautive. En 1932, le physicien britannique James Chadwick découvrit le neutron, le composant neutre du

noyau atomique. Peu après, Fritz Zwicky, de l'Institut de technologie de Californie, et Lev Landau (à Moscou) imaginèrent que la présence de neutrons dans les naines blanches fournirait leur énergie aux naines blanches, alors que ce n'est pas le cas.

Si la force gravitationnelle devient suffisamment forte au sein de l'étoile, comme ils le pensaient, les électrons peuvent interagir avec les protons et former des neutrons. L'étoile serait alors entièrement constituée de neutrons. Au moment de ces travaux, le mécanisme qui produisait l'énergie au sein des étoiles ordinaires n'était pas connu, et l'on envisageait même la présence d'une étoile à neutrons au cœur des étoiles ordinaires, tout comme on suppose aujourd'hui que les trous noirs sont au cœur des

l'énergie des quasars.

Quel était alors l'équivalent de la masse de Chandrasekhar pour ces étoiles ? Cette question était bien plus difficile que dans le cas des naines blanches, car les neutrons interagissent par la force forte, dont nous ne comprenons toujours pas toutes les propriétés. Si l'étoile est suffisamment

massive, la gravitation finira par vaincre ces forces, et la matière s'effondrera. Une estimation précise de la masse limite dépend naturellement de la force forte. En 1932, puis en 1939, Oppenheimer et ses étudiants Robert Serber et George Volkoff publièrent deux articles qui concluaient que la limite en masse, dans ce cas, était comparable à la limite de Chandrasekhar pour les naines blanches.

Oppenheimer se posa alors le même problème qu'Eddington à propos des naines blanches : que se passerait-il si une étoile de masse supérieure à l'une de ces limites s'effondrait ? Oppenheimer connaissait peut-être le travail d'Einstein sur les trous noirs, à quelque 5 000 kilomètres de là. Toutefois, ce travail ne répondant pas à la question de l'effondrement d'une étoile,

Oppenheimer ne put pas construire une étoile stable de rayon égal à son rayon de Schwarzschild, mais voulait voir ce qui se passerait si on laissait l'étoile s'effondrer au-delà de son rayon de Schwarzschild. Il suggéra à Snyder d'étudier le problème.

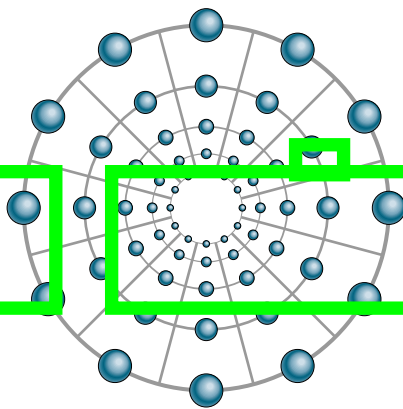
Oppenheimer conseilla quelques hypothèses simplificatrices : il proposa de négliger la pression du gaz dégé-



1932

James Chadwick découvre le neutron. Son existence conduit les astrophysiciens à se demander si les «étoiles à neutrons» ne pourraient être une solution au problème des naines blanches.

«Sur un système stationnaire à symétrie sphérique composé de plusieurs masses liées par la gravitation» – Albert Einstein in *Annals of Mathematics*, 1939.



1939

Stimulé par des conversations avec des collègues, Einstein publie un article dans les *Annales des Mathématiques* pour montrer une fois pour toutes que le rayon de Schwarzschild est infranchissable.



1939

Utilisant des idées sur l'effondrement gravitationnel des naines blanches et des étoiles à neutrons, Robert Oppenheimer et Hartland Snyder montrent comment peut se former un trou noir.

né ou la... Son intuition... thèses ne... mentalem... des physiciens d'une autre génération, armés d'o... tré qu'il avait raison. Snyder trouva alors que la vision d'une étoile qui s'effondre dépend de la position de l'observateur d'une manière spectaculaire.

Deux points de vues

Commençons par un observateur au repos, à une distance prudente de

Supposons aussi qu'un autre observateur, à la surface de l'étoile, accompagne son effondrement et envoie des signaux lumineux à son collègue stationnaire. À mesure que l'étoile se contracte, l'observateur stationnaire voit les signaux de son homologue mobile qui se décalent progressivement vers l'extrémité rouge du spectre électromagnétique (par l'effet Doppler, qui fait paraître plus aiguë la sirène d'une ambulance qui s'éloigne). Comme la fréquence d'un signal est assimilable au rythme d'une

montre, l'observateur stationnaire verra la montre de l'observateur mobile ralentir progressivement.

Lorsque le rayon de l'étoile sera égal à son rayon de Schwarzschild, l'effondrement s'arrête lorsque le rayon de l'étoile est égal à son rayon de

Les erreurs d'Einstein

Avant les années 1960, la plupart des spécialistes de la relativité générale pensaient que le champ gravitationnel à l'extérieur d'une concentration sphérique de matière (étoile ou atome) était proche de celui que prévoyait la théorie de Newton. Ce champ était même si proche de celui prédit par la théorie newtonienne, qu'il était difficile de trouver des tests qui permettraient de savoir si la gravitation s'accordait plutôt avec la théorie de Newton ou avec celle d'Einstein.

On pouvait toutefois poser un cas d'école : quel était le champ gravitationnel d'une énorme sphère de matière supposée homogène ? Très près du centre, apparaissait une limite étrange : le rayon de Schwarzschild (égal à $r = 2GM/c^2$, où G est la constante de gravitation, M la masse de la sphère et c la vitesse de la lumière). Beaucoup de travaux ont alors été consacrés à l'étude des propriétés de cette sphère. L'opinion répandue – entre 1915 et les années 1960 – était qu'il s'agissait bel et bien d'une *singularité* qui semblait impénétrable, d'une « sphère magique ».

Un tel objet stellaire ne pouvait se former ; d'une part, parce qu'il n'existait pas de matériau assez dense pour cela, mais aussi parce que la limite de Schwarzschild était infranchissable. Ainsi, la singularité de Schwarzschild ne pouvait-elle pas exister dans la réalité physique, et la question restait un cas d'école. Bref, on avait l'esprit tranquille. C'est cette tranquillité d'esprit que menacent les travaux d'Oppenheimer et de ses élèves, mais que défend Einstein avec quelque entêtement.

La même question posée par Oppenheimer et Snyder et par... deux réponses opposées. L'origine de cette différence se situe sans doute dans l'opinion d'Einstein, qui croit et veut l'impénétrabilité. Cette croyance se traduit par le choix d'un modèle particulier pour étudier la possibilité de l'effondrement d'une étoile : tandis qu'Oppenheimer et Snyder choisissent une symétrie radiale (on accepte que cela tombe !), Einstein assujettit les particules constituant son modèle à suivre des cercles (on est loin de la chute !)... C'est un peu comme si vous tentiez de comprimer un

en essayant d'en réduire le diamètre. Bref, Einstein a fait entrer dans la physique une singularité qui n'en a pas.

En fait, plusieurs travaux – qu'Einstein n'a probablement pas lus – réalisés dans les années 1930, montrent que la limite de Schwarzschild n'est pas singulière ; notamment des travaux de Robertson, qu'Einstein remercie dans son article. Mais il n'est pire sourd que celui qui ne veut pas entendre...

Il s'agit d'une question essentielle qui concerne l'existence de la théorie. Einstein est, depuis toujours, opposé à l'existence d'une singularité, car, ainsi qu'il l'écrit quelques années plus tôt dans un article déjà consacré à cette question, « une singularité apporte tant d'arbitraire à la théorie qu'elle invalide les lois. » Si une singularité existe en un point, la physique cesse d'être déterminée ; mais, dans la mesure où la physique est la relativité générale modèle l'espace-temps lui-même, une singularité représente une discontinuité de l'espace.

On comprendra mieux les difficultés d'Einstein si l'on sait que le vaste problème des singularités en relativité générale n'est toujours pas bien résolu, même si, dans les années 1960, l'on a répondu à la question précise sur laquelle Einstein a achoppé.

Toutefois, en 1939, il n'était pas question de trous noirs ni de singularités. L'existence de ces objets n'est pas encore claire. Étrangement, les « corps obscurs », des objets proches des trous noirs par plusieurs aspects, ont été imaginés assez facilement dès le XVIII^e siècle dans le cadre de la théorie de la gravitation de Newton.

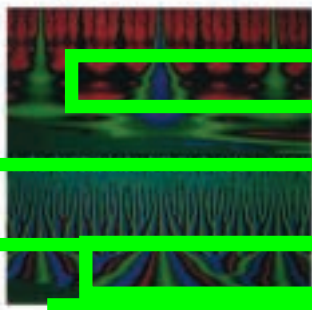
Jean EISENSTAEDT, Laboratoire gravitation et cosmologie relativistes, Paris

SCIENCES D'AVENIR

BARBARA BURKE HUBBARD

ONDES ET ONDELETTES

LA SAGA D'UN OUTIL MATHÉMATIQUE



PRIX FLORENCE 1992

ONDES ET ONDELETTES

Barbara Burke Hubbard

L'élaboration des ondelettes
est une saga moderne.

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

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

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Schwarzschild : l'étoile est «gelée» dans l'état de Schwarzschild.

Jusqu'à ce que le physicien John Wheeler lors d'un cours en décembre 1967, ces objets étaient souvent surnommés des étoiles gelées. Comme Oppenheimer et Snyder l'observèrent dans leur article, l'étoile qui s'effondre «tend à se fermer à toute communication avec un observateur distant ; seul persiste son champ gravitationnel». Autrement dit, un trou noir s'est formé.

Que voit, d'autre part, l'observateur rivé à l'étoile qui se contracte ? Pour lui, le rayon de Schwarzschild n'a pas de signification spéciale. Il le traverse et, en l'espace de quelques heures à sa montre, il atteindra le centre. Cependant, quelques temps après cette traversée, il subira des forces de marées considérables qui le mettront en pièces.

En 1939, le monde était lui-même sur le point d'être mis en pièces. Oppenheimer partit bientôt construire l'arme la plus destructive jamais conçue par l'homme, et il ne repréoccupait plus sur les trous noirs. À ma connaissance, Einstein n'en plus. En 1947, la paix revenue, Oppenheimer devint directeur de l'Institut de physique de Princeton, où Einstein était encore professeur. Parfois ils discutaient, mais rien n'indiquait qu'ils aient parlé de trous noirs. Les progrès devront attendre les années 1960, où la découverte des quasars, des pulsars et des sources compactes de rayons X ravivèrent la réflexion sur le destin mystérieux des étoiles.

Jeremy BENNETT est professeur de physique à l'Institut de technologie Stevens.

A. PAIS, *Albert Einstein : la vie et l'œuvre*, InterÉditions, 1993.

K. WALI, *Chandra : A Biography of S. Chandrasekhar*, University of Chicago Press, 1991.

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

J. EISENSTADT, *Trajectoires et impasses de la solution de Schwarzschild*, in *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 37, p. 275; 1987.

J. EISENSTADT, *La préhistoire des trous noirs*, *Pour la Science*, février 1990.

K. SUGIMOTO, *Albert Einstein, biographie illustrée*, Belin, 1990.

J. SCHWINGER, *L'héritage d'Einstein*, Belin, 1988.

Neuf kilomètres sous l'Allemagne

ROLF EMMERMANN

En Allemagne, les géologues ont foré à neuf kilomètres de profondeur, afin de comprendre la formation et l'évolution du continent européen.

Le 12 octobre 1989, entre 14h30 et 14h45, les transformations métamorphiques de forage qui ont amené les trempans à une profondeur de 9 101 mètres, où la température atteignait 275 °C, les géologues allemands participant au programme KTB ont cessé leur activités. Après trois expériences, la phase opérationnelle a cessé, conformément aux prévisions, le 31 décembre 1994.

L'idée d'une exploration de la croûte terrestre par un forage à grande profondeur fut émise pour la première fois lors de la session de printemps de la Société allemande de recherche : malgré les progrès considérables de l'exploration profonde, de la pétrochimie et de la géochimie, seule l'étude directe du sous-sol permettrait, espérait-on, d'interpréter sans ambiguïté les images sismiques électriques et magnétiques du sous-sol.

Comme on prévoyait des modifications notables des propriétés physiques des roches et une accélération des réactions chimiques aux profondeurs où la température est supérieure à 250 °C, on décida de forer jusqu'à une profondeur d'environ dix kilomètres. En 1986, on choisit le site du forage : Windischeschenbach, dans le Haut-Palatinat, 40 kilomètres à l'Est de Bayreuth.

Les raisons de ce choix étaient nombreuses. Tout d'abord, la région est située dans la zone de collision de deux grands blocs constitutifs des monts varisques (voir la figure 2), qui se sont formés il y a 400 à 500 millions d'années (ces monts tirent leur nom de la peuplade germanique des Varisques, qui vivait dans la région). La géologie locale se caractérise par des complexes rocheux de diverses origines et qui ont

subi des transformations métamorphiques variées (le métamorphisme est l'ensemble des modifications minéralogiques qui se produisent à température et pression élevées, dans les profondeurs de l'écorce terrestre).

D'autre part, les géophysiciens avaient établi, pour la région de Windischeschenbach, un modèle géologique qui pouvait être testé par un forage à grande profondeur. Des sondages géophysiques avaient montré que les structures géologiques qui se reflétaient dans les données sismiques étaient présentes à une profondeur accessible et qu'un plan de bonne conduction électrique se trouvait à une profondeur de 9 à 11 kilomètres sous la surface du sol. Enfin, la proximité du fossé de l'Eger, d'âge géologique récent, promettait l'élucidation d'intéressantes anomalies thermiques et géochimiques du sous-sol.

Le double forage

Les conditions qui règnent dans les grandes profondeurs étant mal connues, un forage pilote fut décidé : ayant une idée du sous-sol, on pourrait ensuite mettre au point des équipements et des instruments d'analyse qui tireraient pleinement parti du forage à très grande profondeur. En

outre, les données géophysiques de cette partie du sous-sol, tout en facilitant le début du forage final, les prélèvements d'échantillons étant déjà effectués. Enfin les foreurs voulaient accumuler des renseignements sur les paramètres litho-structuraux (types de roches, alternance des couches plissées, angle d'incidence des couches, etc.), sur la forabilité du

massif et sur la stabilité du trou de forage. Ils voulaient notamment savoir s'il existait des horizons d'apport, par lesquels des liquides provenant du massif pénétreraient dans le trou de forage, ou les zones de perte, qui absorberaient les boues de forage.

Le forage commença le 22 septembre 1987. Après 560 jours de forage, la technique de carottage à câble spécifiquement développée pour ce projet atteignit une profondeur de 4 000 mètres. Pendant un an, les géologues examinèrent le trou de forage à l'aide de sondes variées ; la structure géologique du sous-sol fut explorée par l'expérience géophysique SO 89, qui comprenait un sondage sismique tridimensionnel sur une surface de 18 × 19 kilomètres, avec le trou de forage.

Le forage monta ainsi que les couches de roches plissaient de manière à ce que jusqu'à la profondeur finale l'attente. L'augmentation de la température, beaucoup plus rapide que prévu, conduisit à penser qu'on devrait limiter la profondeur du puits principal à dix kilomètres au lieu des 12 prévus initialement.

Le forage vertical

Entre avril 1989 et octobre 1990, les géologues installèrent le matériel du forage principal (voir la figure 3). Le trou de

forage, haute de 83 mètres, fut équipée d'un système de manutention semi-automatique des tiges de forage, composé d'un système de manutention, de dispositifs de transport et de basculement des tiges, de systèmes hydrauliques de vissage des tiges, d'un élévateur et d'un système intégré de cales de blocage automatique. C'était

la première fois qu'un tel système était mis en œuvre dans l'histoire du forage. Grâce à l'utilisation de trains de tiges de 40 mètres de long (au lieu des 27 mètres classiques), le temps de remplacement des outils de forage usés a

été raccourci de près de 30 pour cent au cours de chacun des 500 remplacements effectués (voir la figure 3).

Le système de relevage des tiges était installé dans un logement spécial, à la base de la tour de forage, et il était

télécommandé à partir de la salle de commande. Trois moteurs actionnaient le tambour de relevage, sur lequel s'enroulait le câble de relevage des tiges ; lors de la descente du train de tiges, ces mêmes moteurs fonctionnaient comme



1. LES INSTALLATIONS du forage principal KTB, près de Windischeschenbach, en Allemagne. Dans le grand bâtiment situé à droite de la tour de forage se trouve la station de traitement des fluides de forage. En bas à droite, les conteneurs bleus et blancs protègent les installations de mesure, tel un treuil fixe équipé d'un câble d'une longueur de dix kilomètres, au bout duquel des sondes de mesures sont

régulièrement descendues dans le puits. Le bâtiment central, situé à gauche à l'arrière-plan, abrite les bureaux, ainsi que le laboratoire principal où les échantillons de roches sont répertoriés, décrits et analysés dès leur remontée à la surface. Dans les bâtiments préfabriqués sur la gauche sont abritées les équipes de forage, ainsi que les installations d'approvisionnement.

générateurs d'électricité en freinant le tambour. Le système de relevage et le système de manutention des trains de tiges étaient coordonnés par un système informatique, ce qui évitait les fausses manœuvres.

Les concepteurs des systèmes avaient envisagé des sollicitations considérables, mais leurs prévisions ont été dépassées. Pourtant l'installation a parfaitement fonctionné, avec un temps de maintenance inférieur à quatre pour cent.

Les boues de forage étaient injectées sous une pression de 350 atmosphères. Une installation de préparation, composée de tamis vibrants, de pièges à sable, de séparateurs de gaz, de séparateurs de particules, éliminait les résidus de broyage et les gaz dissous.

Généralement les forages dévient de la verticale, car le trépan suit les formations rocheuses ou part dans la direction de moindre résistance de la roche. Ces déviations augmentent les frottements entre les tiges de forage et les parois du puits de forage. Aussi le forage principal a été équipé d'un système de contrôle de la verticalité (voir la figure 4), composé d'un châssis stationnaire, de capteurs d'inclinaison du trou de forage, d'une commande et de vannes hydrauliques, qui activaient quatre guides latéraux. Un moteur à roulement, actionné par la circulation des boues de forage, était situé directement au-dessus du trépan, au-dessus était relié par un arbre. Les mesures d'inclinaison du trou de forage, de la température, de l'état de charge de la

batterie et de la pression étaient transmises par un intermédiaire de variations de pression dans les boues de forage. Au total, la verticalité est restée quasi parfaite sur une profondeur de plus de 7 500 mètres, limite au-delà de laquelle les températures excessives ne permettant plus la mise en œuvre du système.

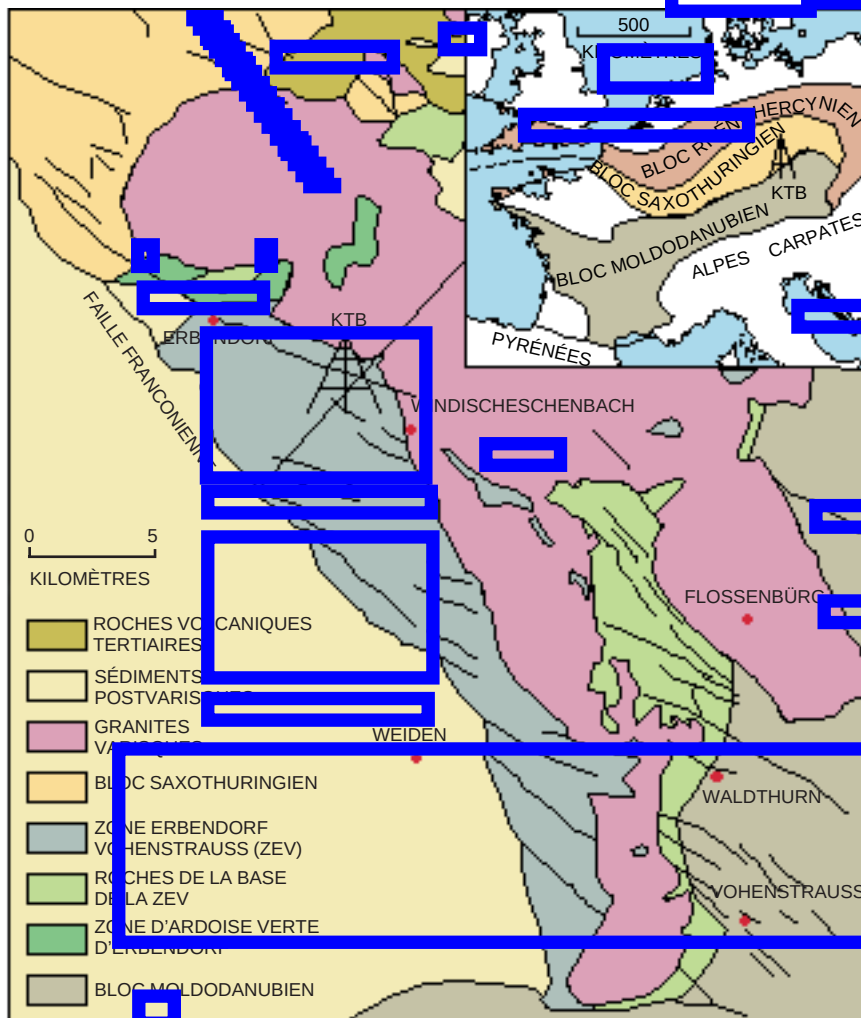
Afin d'éviter les chutes de roches à partir d'une certaine profondeur, le chemisage était placé chaque fois que 3 000 mètres avaient été percés. La verticalité parfaite du trou de forage permit d'exigir à 15 millimètres le jeu entre le tube de forage et la paroi (dans les forages classiques, l'espace supérieur qui est ménagé engendre un volume de déblai à évacuer supérieur de 50 pour cent).

En avril 1993, pour la première fois dans l'histoire du forage, on a chemisé le trou jusqu'à une profondeur de 6 000 mètres : il fallut descendre et visser 469 tubes d'un diamètre de 34 et 34,6 centimètres dans le trou de forage d'un diamètre égal à 37,5 centimètres. Le poids total du chemisage atteignait 706 tonnes. La vitesse d'assemblage fut réduite de moitié. Afin d'éviter des pressions localisées trop importantes sur les parois du puits, en raison de l'étroitesse de l'espace entre la paroi et le chemisage, réduite à 15 millimètres. Grâce à l'absence de déblai, à une profondeur de chemisage de 6 013,5 mètres a été atteinte en cinq jours seulement.

Au cours du forage, les géologues analysaient les roches et les boues. Les résultats des analyses étaient comparés à ceux donnés par des sondes qui déterminent les propriétés de l'écorce terrestre traversée par le forage.

Structure et évolution de l'écorce terrestre

Windischeschenbach est au Nord de la zone Erbindorf Vohenstrauss (ZEV), un ensemble géologique situé à l'Ouest du Massif tchèque, à l'Est de la faille de Franconie. En surface, les roches sont essentiellement des metabasites et des paragneiss, qui se sont constitués par métamorphisme de roches initialement basaltiques ou sédimentaires. Les études préliminaires semblaient indiquer que la ZEV était le reste d'un complexe de couverture qui s'étendait au-dessus de la zone de suture entre



2. ORGANISATION GÉOLOGIQUE des environs de Windischeschenbach. Sur la carte en haut à droite, on voit que le site du forage KTB est à la limite de deux gros blocs continentaux : le bloc saxothuringien et le bloc moldodanubien. Il y a 300 à 400 millions d'années, ces blocs sont entrés en collision et se sont soudés, alors que s'élevaient les monts varisques. Windischeschenbach est dans la partie Nord de la zone Erbindorf Vohenstrauss (ZEV), un complexe géologique à l'Ouest du massif bohémien, où le socle affleure. La ZEV est délimitée, à l'Ouest, par des sédiments relativement récents, qui correspondent au grand système de perturbation de la faille franconienne.

deux énormes blocs continentaux (le bloc saxothuringien et le bloc moldo-danubien) qui sont entrés en collision et se sont soudés à l'époque de la formation du massif varisque. Aussi nous attendions nous à détecter, une fois traversé le complexe de couverture, la suture cachée, d'une hauteur de trois à cinq kilomètres.

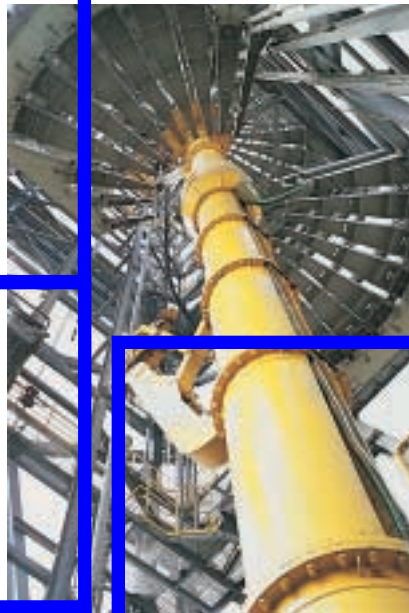
Cette zone a été traversée par le principal traversa des structures de type ZEV sur toute sa profondeur. En revanche, nous avons découvert que les couches rocheuses ont été fragmentées et cisailées à un point qu'on n'aurait jamais imaginé, car Windischeschbach est au milieu d'une plaque tectonique que l'on croyait rigide et stabilisée.

L'écorce terrestre traversée est une alternance de gneiss et d'amphibolite, des roches qui dominent en surface : les paragneiss, les metabasites et des alternances de gneiss et d'amphibolite (voir la figure 6). Ces couches rocheuses plongent vers le Sud-Ouest avec un angle compris entre 50 et 70 degrés, et la succession des couches ne semble ni s'inverser ni présenter de répétitions de profil dues à des plissements.

La zone de faille de Franconie est la plus importante se trouve entre 6 860 et 7 260 mètres de profondeur. Elle est constituée d'un faisceau de zones de cisaillement, où les roches sont fortement ébranlées. Vraisemblablement le forage a traversé à ce niveau le prolongement en profondeur du grand système de perturbation qui est visible en surface sous la forme de la faille de Franconie.

Les gneiss se forment à partir de grès gris friables, riches en feldspath, qui se sont déposés sous la forme de couches alternées dont l'épaisseur est comprise entre quelques mètres et plusieurs mètres. Ces gneiss ont en grande partie conservé la composition isotopique des roches sédimentaires dont ils proviennent. Il s'agit vraisemblablement de turbidite, un sédiment de granulométrie très fine, déposé par des cours d'eaux troubles et qui aurait glissé du plateau continental vers le fond.

Inversement la composition des metabasites laisse penser qu'elles étaient vraisemblablement d'anciens fonds marins de petits bassins océaniques du type de celui de la mer Rouge. Enfin les alternances de gneiss et d'amphibolite sont des mélanges de roches d'origine volcanique ou boueuse comportant des carbonates



3. LE PROGRAMME KTB a suscité la mise au point de techniques nouvelles qui ont été reprises par les industries pétrolières. Ainsi le système de manutention automatique des tiges (en jaune) comporte des bras à commande hydraulique qui saisissent les sections de 40 mètres de tiges de forage vissées ensemble et les déposent dans la tour de forage, au niveau de la plate-forme digitée (en haut à droite). Cette installation a réduit de moitié le poids des tiges et a permis le démontage et de réassemblage des tiges, lors de l'échange des trépanes de forage usés.

(tels que les veines de marbre) : on suppose qu'elles se sont formées à partir de dépôts sédimentaires dans une mer peu profonde, située dans une zone d'activité tectonique.

Toutes ces roches ont subi des transformations minéralogiques sous des pressions de 6 000 à 8 000 atmosphères et à des températures de 650 à 700 °C. Ce métamorphisme résulte de transformations complexes : après leur sédimentation sur le plateau océanique qui émerge lors de la collision avec le continent voisin, les roches ont subi le bord de ce dernier au cours d'une subduction telle celle qui se produit aujourd'hui au large de la côte Ouest de l'Amérique du Sud ou de la côte Est de l'Asie. Les couches sédimentaires

profondes de l'écorce terrestre, où elles ont été soumises à des pressions et à des températures élevées.

Ce métamorphisme se produit il y a environ 410 à 380 millions d'années, mais les premières transformations minéralogiques, principalement sous l'effet de la pression, semblent dater de 480 millions d'années, pendant l'Or-

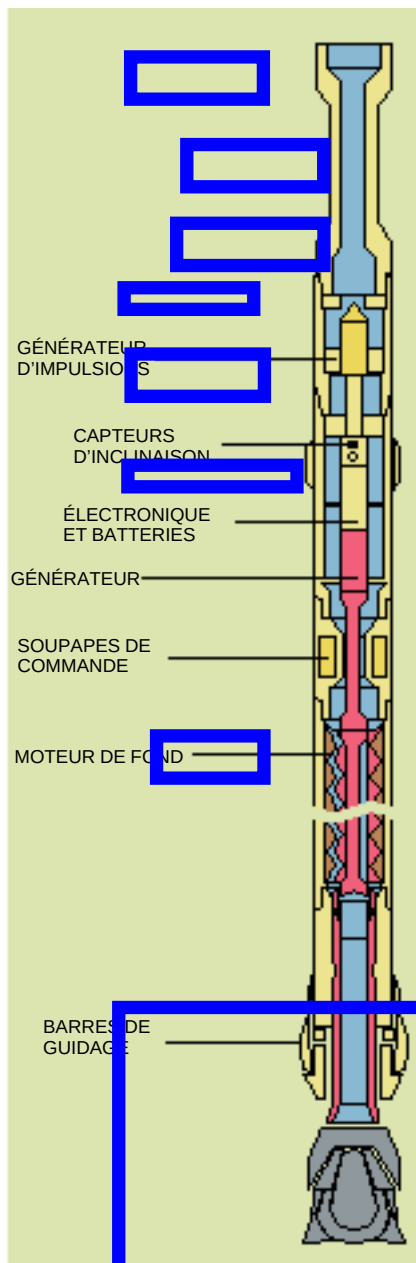
dovicien. Cette hypothèse concorde avec les derniers résultats géochronologiques, qui indiquent que des sédiments s'étaient déjà déposés à cette époque.

Pourquoi les pollens fossiles retrouvés dans ces roches proviennent-ils du Dévonien inférieur (environ 390 millions d'années)? Probablement parce qu'il y a 480 millions d'années, les roches ayant subi la subduction furent soulevées. Ce processus a dû être rapide, car les données disponibles indiquent que la température ambiante n'atteignait plus que 300 °C, il y a 300 millions d'années. Quand la ZEV est-elle arrivée dans sa position actuelle? On l'ignore encore, mais on sait que cette zone a été peu modifiée par le métamorphisme de la déformation varisque, qui s'est déroulé à pression faible et à température élevée, il y a 300 à 320 millions d'années.

Lorsque le massif varisque s'est soulevé, la ZEV a été épaissie par compression et refoulement, notamment lors du pissement alpin, qui a commencé il y a 100 millions d'années et a atteint son point culminant il y a 40 millions d'années. Une telle conclusion découle d'observations indépendantes qui montrent que, dans la zone de forage principal, les propriétés de la roche ont été modifiées peu jusqu'à une profondeur d'environ 7 500 mètres ; les effets de la température croissante ne deviennent visibles qu'au-delà. La faille franco-nienne profonde de neuf à dix kilomètres a probablement formé une rampe de glissement le long de laquelle la ZEV s'est trouvée repoussée vers le haut.

Ainsi les résultats des forages profonds, combinés aux recherches sur les zones avoisinantes, apportent des renseignements précieux sur la géologie de l'évolution de l'écorce varisque mésoeuropéenne. Notamment on a obtenu des informations sur les interactions de la zone Erben-dorf-Vöhrstrauss, du bloc saxothuringien du bloc moldo-danubien et du

le bloc bohémien. Ces massifs rocheux indépendants ou erratiques se seraient égarés sur le bouclier continental européen. Le bloc bohémien aurait glissé sous le bloc moldo-danubien, et la ZEV correspondrait à une partie repoussée du bloc bohémien ou à un complexe de suture entre lui et le bloc saxothuringien.



4. CE SYSTÈME DE CONTRÔLE de la verticalité a été spécialement mis au point pour le projet KTB. En l'absence de guidage, le trépan est dévié par les roches, de sorte que le trou de forage serpente dans le sous-sol. Cette mauvaise verticalité du forage provoque des frottements notables de la tige de forage contre les parois du puits et engendre des contraintes considérables sur tout le train de tiges. Dans le système de contrôle de la verticalité qui a été mis en œuvre à Waidischschenbach, un capteur vérifie en permanence toute déviation et, lors du dépassement d'une valeur limite, il active une unité de réglage constituée de quatre pistons entraînés électromagnétiquement, reliés chacun à une barre de guidage située directement au-dessus du trépan. En forage normal, les barres sont sorties et maintiennent ainsi le train de tiges au milieu du trou de forage. Lorsque le capteur envoie une impulsion, on rétracte une barre, afin que le train de tiges bascule vers la barre rétractée.

Les fluides

Le programme KTB a également donné une foule de renseignements nouveaux sur les profondeurs jusqu'auxquelles on trouve des fluides (liquides et gaz), sur la mobilité de ces fluides et sur leur rôle dans l'évolution de la croûte terrestre. Dans les morphismes différents, les roches des divers types détectés ont conservé des rapports isotopiques du soufre et de l'oxygène égaux à ceux des roches d'origine, autrement dit, les phénomènes métamorphiques se sont essentiellement déroulés dans des systèmes compartimentés, sans imbibitions massives de fluides.

Ces fluides sont en partie inclus, à des concentrations infimes (de l'ordre de 0,01 à 0,1 % en volume, par exemple), dans les minéraux qui constituent les roches traversées par le forage. Les inclusions fluides les plus fréquemment rencontrées sont des solutions de chlorure de calcium (souvent mélangées à des chlorures de sodium et de potassium), qui ont été incluses il y a 25 à 30 millions d'années.

Beaucoup plus rarement, et uniquement dans certaines couches, on rencontre des solutions peu concentrées de chlorures de sodium et de potassium, qui proviennent vraisemblablement du granite de Falkenberg et qui auraient été incluses tardivement.

Dans des zones bien délimitées, et avec une fréquence qui augmente nettement avec la profondeur, les inclusions gazeuses contiennent du dioxyde de carbone, du méthane et de l'azote en concentrations variables. On ignore encore si ces gaz sont apparus lors du métamorphisme sous pression moyenne, mais les zones les plus intéressantes sont celles où les composés carbonés dominent et où l'on trouve souvent du graphite.

Celui-ci est souvent associé au sulfure de fer et à la chlorite dans les zones fortement perturbées. L'enrichissement en graphite est parfois si spectaculaire, dans des zones de cisaillement épaisses de quelques millimètres à peine, que des veines de conduction électrique apparaissent. Tout porte à penser que le graphite s'est déposé là à la suite d'une réaction entre le méthane et le dioxyde de carbone. Une telle transformation a été vraisemblablement amorcée et

favorisée par les frottements, lors du cisaillement des roches. Dans cette hypothèse, des veines conductrices de graphite devraient être interconnectées dans les régions de forte activité tectonique.

L'association et la combinaison parfois complexes du graphite avec les minéraux de fer que sont la pyrite et la pyrrhotine, ainsi qu'avec la chlorite, révèlent que ces minéraux se sont vraisemblablement formés à partir de solutions hydrothermales (solutions aqueuses à haute température et sous pression). De telles minéralisations ont également été rencontrées lors du forage effectué jusqu'à une profondeur de 12 800 mètres sur la presqu'île russe de Kolguev (voir *Le forage le plus profond du monde* par Ye Kozlovsky, *Pour la Science*, février 1985). Elles semblent être caractéristiques de massifs terrestres continentaux.

En fin de forage, on a extrait quelque 460 mètres cubes de la saumure la plus concentrée. Celle-ci provient-elle d'évaporites (roches salines) qui ont cristallisé au Permien, lors de l'évaporation de bassins marins isolés, ou a-t-elle migré vers la région du KTB il y a 25 à 30 millions d'années, à partir de bassins sédimentaires, le long de structures tectoniques profondes. Ou bien encore a-t-elle été libérée lors de la phase de subduction prévarisque, il y a environ 400 millions d'années, pour gagner progressivement son niveau actuel, lors du soulèvement prévarisque et postvarisque de la ZV.

Mais espérons répondre à ces questions en analysant les fluides recueillis après l'achèvement du forage principal. Une expérience a consisté à baisser le niveau de l'eau dans le trou de forage, afin de créer une dépression par rapport à la roche environnante. Les eaux profondes qui se déversent dans le trou de forage ont fait remonter le niveau, ce qui a réduit la différence de pression (voir la figure 2). La vitesse de remontée du niveau était de 4,3 mètres par 12 heures.

La zone située entre 9 030 et 9 101 mètres de profondeur (le reste du trou de forage était étanche, en raison de son chemisage cimenté).

Après cette entrée de fluide, on a fermé la partie supérieure du trou de forage et on a mesuré l'augmentation de la pression ; elle révéla la perméabilité et la capacité de stockage du

massif rocheux. On sait déjà que les roches situées au fond du puits sont beaucoup plus profondes que prévu. On le prévoyait d'après les expériences de laboratoire. Malgré les contraintes considérables qui s'exercent en profondeur, les fluides s'écoulent dans les roches.

La sismologie de l'écorce terrestre

Le forage de Windischeschenbach avait été effectué pour comprendre l'origine des nombreux réflecteurs sismiques que l'on rencontre dans toutes les zones des massifs continentaux. On a notamment étudié la zone de croisement de deux profils sismiques qui avaient révélé l'existence de réflecteurs sismiques à une profondeur accessible (voir la figure 5).

Les explorations préparatoires avaient mis en évidence deux groupes essentiels de réflecteurs : des réflecteurs plans, plongeant jusqu'à des profondeurs de plus de dix kilomètres, et des réflecteurs quasi horizontaux, plus grands et situés à des profondeurs comprises entre 8,5 et 12 kilomètres.

Ces derniers délimitaient des zones de réflectivité sismique intense, sous lesquelles devait se trouver un corps où les ondes sonores se propagent à plus de sept kilomètres par seconde. Le bord supérieur de ce « corps d'Erbenndorf » est, dans la zone du forage principal, à une profondeur de 11 kilomètres.

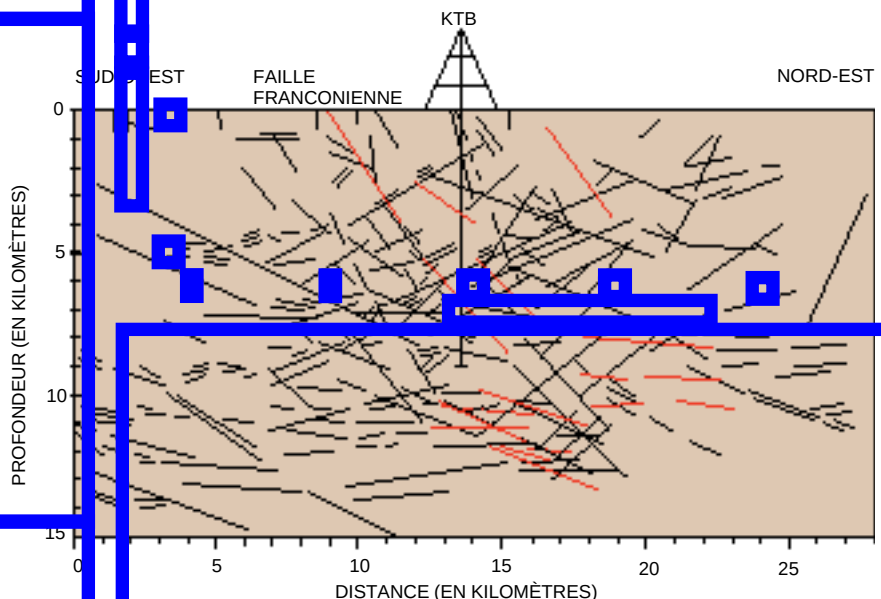
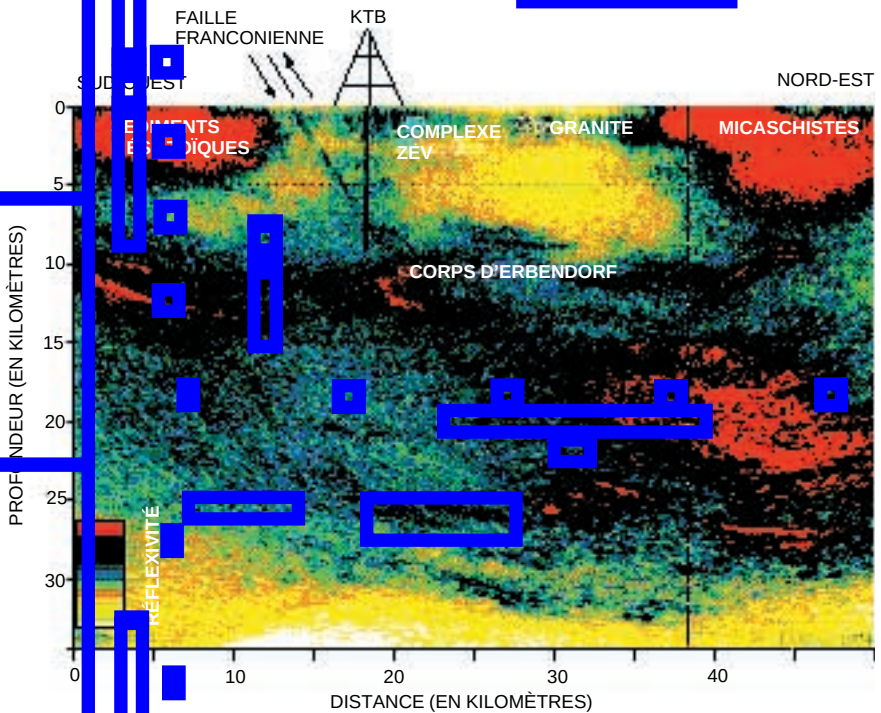
Les réflecteurs inclinés pouvaient être directement reliés à des zones de perturbation détectables en surface ; aussi avait-on supposé qu'ils étaient des prolongements de ces perturbations. Le réflecteur le plus intense, qui plonge selon un angle de 55 degrés, est relié à la zone de perturbation d'Altensteinpark de la faille franconienne. On avait calculé que le forage principal l'atteindrait à une profondeur comprise entre 6 800 et 7 100 mètres et, effectivement, le forage traversa, entre 6 800 et 7 200 mètres, un puissant faisceau de perturbations.

Au total, la comparaison des études sismiques et du forage montre que les réflecteurs sismiques fortement inclinés révèlent surtout le dessin des fractures de l'écorce terrestre.

Géoelectricité et magnétisme

Au cours des dernières années, des sondages électromagnétiques profonds ont mis en évidence des horizons de

conductivité élevée au sein de l'écorce terrestre. Cette propriété a été attribuée à l'existence de veines liquides chargées en sels, ou à des réseaux de dépôts de graphite et de diverses combinaisons de celui-ci avec des minerais métal-



5. LES ENVIRONS DU SITE DE FORAGE ont été analysés par des techniques sismiques. L'un des objectifs primordiaux du projet KTB était d'étalonner ces techniques dans un massif cristallin, c'est-à-dire d'identifier les structures géologiques du sous-sol qui renvoient préférentiellement les signaux sismiques. On a représenté sur cette figure deux profils sismiques orientés du Nord-Est au Sud-Ouest. Le profil supérieur a été obtenu par une technique nouvelle. La structure la plus spectaculaire, à proximité du forage, est la faille franconienne, qui plonge vers le Nord-Est et qui a été traversée entre 6 860 et 7 260 mètres de profondeur. Tout près du fond du puits de forage se trouve le corps dit d'Erbenndorf, un massif de roches à fort pouvoir réfléchissant, où les ondes sonores se propagent rapidement. Les mêmes structures se retrouvent sur le profil inférieur, qui a été obtenu par la méthode classique. Sur ce profil, on reconnaît de nombreux autres réflecteurs supplémentaires (ceux qui figurent en rouge sont les plus intenses). Ainsi la méthode de réflexions sismique sous angle élevé indique, dans les roches cristallines, les profils de faille de l'écorce terrestre plutôt que les frontières entre diverses unités rocheuses et formations géologiques.

liques. Les recherches systématiques réalisées dans le cadre du grand projet européen *Geotraverse* ont démontré la présence d'un conducteur à conductivité élevée au sein de l'écorce méso-européenne varisque. Leur existence a été établie au cours de sondages préparatoires pour le choix du site de forage, tant en Forêt-Noire que dans le Haut-Palatinat. Au voisinage de Windischeschenbach, à une profondeur d'environ dix kilomètres, un conducteur électrique se prolonge loin au Nord.

D'après les mesures électromagnétiques, il est quasi parallèle à la faille franco-allemande.

Les géophysiciens ont effectué, pour la première fois au monde, une expérience dite dipôle-dipôle (voir figure 7) : ils envoyaient des impulsions électriques à partir de dipôles électriques situés à des distances allant jusqu'à 60 kilomètres du puits de forage et ils enregistraient les courants entrants à l'aide de sondes disposées dans la partie la

plus profonde et non chemisée du préforage et du forage principal, ainsi qu'en une trentaine d'autres emplacements de la surface. Les résultats de cette expérience sont en cours d'analyse.

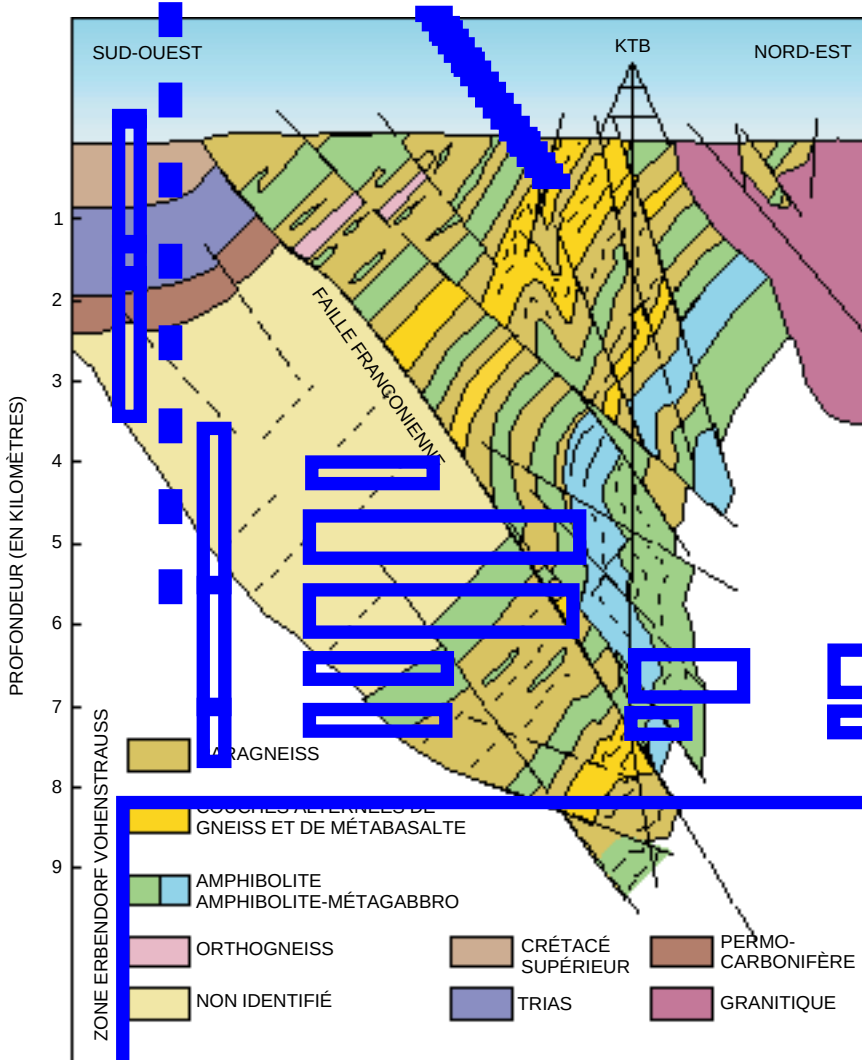
Des sondages électromagnétiques effectués dans les environs du site de forage, avant et après le forage, ont également retrouvé les horizons conducteurs proches de la surface. On a découvert que le trou de forage se trouve situé près d'une anomalie du potentiel électrique qui court du Nord-Ouest au Sud-Est : apparemment le sous-sol contient des zones à des potentiels différents, reliées par les conducteurs, tel le réseau de couches de graphite. Autrement dit, la trou de forage se trouve sur une sorte de pile électrique géologique.

Le programme KTB a également beaucoup apporté à la compréhension des sondages magnétiques. De manière surprenante, c'est le sulfure de fer sous la forme de pyrrhotine qui constitue le porteur principal du magnétisme, tant dans les gneiss que dans les metabasites ; les dépôts de magnétite sont beaucoup plus rares et ne sont responsables du magnétisme que de manière très localisée – par exemple, dans les amphibolites qui conduisent à la formation de marbre. Les concentrations en pyrrhotine sont inférieures à un pour cent en volume, augmentent localement – par exemple, dans les zones les plus perturbées – pour atteindre dix pour cent. Comme nous l'avons vu, ce minerai est alors fréquemment associé à de la pyrite et autres minerais à base de sulfures, et souvent accompagné de veines de graphite et de chlorite.

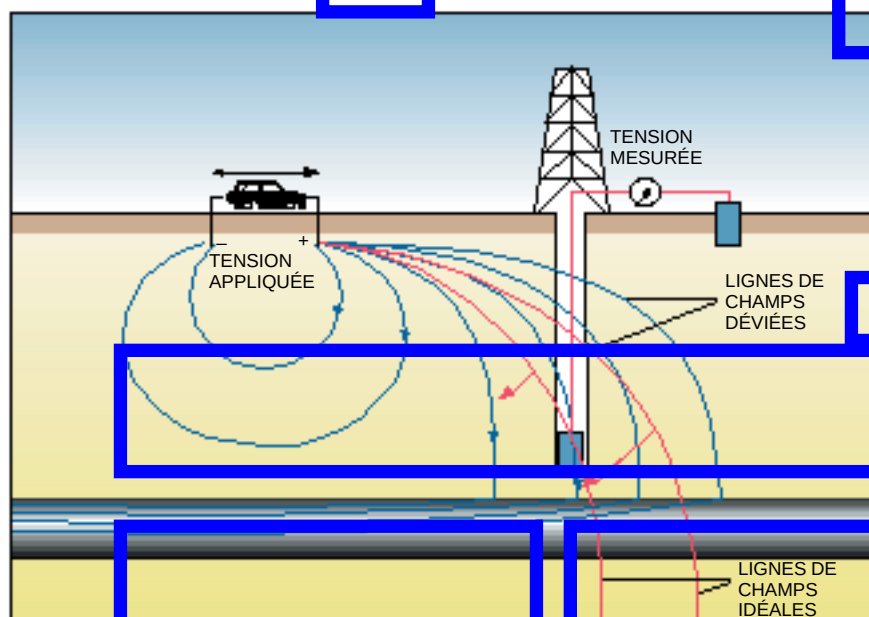
La pyrrhotine naturelle est ferromagnétique, avec une température de Curie (la température à partir de laquelle l'aimantation s'annule) d'environ 355 °C. Aux températures un peu inférieures, elle est faiblement magnétique, ce qui augmente généralement de manière très forte. Au fond du puits de forage, à 2750 mètres de profondeur, de 2750 degrés, un tel phénomène devrait déjà se révéler par un effet très important. En fait, on observe, dans la zone terrestre, ce qui ouvre une possibilité d'observer directement son influence au niveau de l'écorce terrestre.

Géothermie et mécanique

Le préforage avait déjà révélé que l'échauffement de 21 °C par kilomètre ne se poursuivait que jusqu'à une pro-



6. CE PROFIL, orienté du Sud-Ouest au Nord-Est et passant par le trou de forage a été construit à partir des données du forage principal KTB et des sondages sismiques. Avant l'exécution du sondage profond, on considérait que la zone Erbsdorf Vohenstrauß (ZEV) était le reste d'un complexe de couverture épais de quatre kilomètres, recouvrant la suture entre le bloc saxothuringien et le bloc moldodanubien. On sait aujourd'hui qu'il s'agit d'une formation géologique beaucoup plus profonde, qui s'est formée bien avant le plissement varisque, au cours duquel le bloc saxothuringien et le bloc moldodanubien se sont heurtés et soudés. Elle est essentiellement constituée de paragneiss, de metabasites, et de couches alternées de gneiss et d'amphibolite ; les roches qui ont engendré la zone se sont déposées il y a 490 millions d'années dans un bassin marin peu profond. Plus tard, ce fond marin a glissé sous le bord du continent voisin, où, dans les profondeurs de l'écorce terrestre, elles ont été transformées sous des pressions et des températures élevées (métamorphisme). Il y a 380 millions d'années, soulevées par l'intrusion du socle granitique, elles fusionnèrent avec les formations montagneuses voisines, avant de subir deux phases de compression, dont la dernière remonte à 70 millions d'années, sous l'influence du plissement alpin.



7. LORS DE L'EXPÉRIENCE de type dipôle-dipôle, une tension est appliquée à la surface du sol à une certaine distance du puits de forage, et le parcours des lignes de champ était mesuré au fond du puits. L'existence de conducteurs électriques, dans les couches profondes de la Terre, a été révélée par la déviation des lignes de champ, qui normalement sont circulaires.

fondeur de 1 000 mètres environ. Ce gradient augmente au cours des 500 mètres suivants et oscille alors autour d'une valeur de 28 degrés par kilomètre.

Cette série de questions encore ouvertes. Pour l'instant, les mesures de température, dans le forage principal, sont trop rares et trop imprécises, car les opérations de percement ont perturbé la température de la roche environnante. Le retour à l'équilibre thermique prendra un temps de l'ordre de celui de la durée du percement.

Enfin, l'un des buts principaux du programme KTB est de déterminer le comportement mécanique de l'écorce terrestre. Les connaissances dans ce domaine sont fondamentales, car elles expliqueront la tectonique des plaques continentales internes, la formation des chaînes montagneuses, la création de bassins sédimentaires, ainsi que les causes et les mécanismes des séismes.

Notre connaissance actuelle des propriétés mécaniques de la croûte est basée sur des expériences de laboratoire qui ont montré que la résistance de la partie supérieure de l'écorce terrestre dépendrait de la résistance au frottement sur des «surfaces de rupture» ; les contraintes maximales augmenteraient proportionnellement à la profondeur. D'autre part, des expériences menées à haute température et à faible

vitesse de déformation, la plasticité des roches augmenterait de manière exponentielle au-delà d'une certaine température.

La transition de ces deux régimes correspond à la transition fragile-plastique. Dans le cas du quartz, omniprésent dans l'écorce terrestre, cette transition devrait se produire aux environs de 300 °C.

La compréhension de cette transition est d'une importance considérable. En sciences de la Terre, les géophysiciens du programme KTB procéderont à des mesures de contraintes, afin de déterminer les contraintes jusqu'au fond du forage principal. Ainsi ont-ils découvert que les contraintes mécaniques sont effectivement transmises à partir de la partie superficielle et rigide de l'écorce terrestre. Elles augmentent avec la profondeur jusqu'à ce qu'elles atteignent la limite de rupture des roches.

Pour mieux connaître ce comportement, on a fracturé les roches, à des profondeurs de 1 000 mètres, au cours d'une expérience de vidage du trou de forage et d'injection de fluides. Un sismographe disposé au fond du préforage a détecté plus de 400 microséismes d'une intensité atteignant une magnitude de 1,2. L'expérience a d'ores et déjà démontré que des systèmes de fissures existent également dans les couches

profondes de l'écorce terrestre et qu'elles peuvent s'ouvrir sous l'action de la pression hydraulique.

Un indicateur approximatif du début de la zone fragile de l'écorce profonde est donné par la profondeur jusqu'à laquelle des tremblements de terre localisés se produisent. L'analyse des microséismes de la zone KTB a l'aide du réseau local de sismographes a montré que les épicentres sont situés à une profondeur d'une dizaine ou, au maximum, d'une dizaine de kilomètres sous la surface. L'observation microscopique et submicroscopique des caractéristiques structurales de minéraux tels que le quartz, qui subit des modifications considérables lors de la transition vers la plasticité, a permis d'identifier des indices qui permettent l'identification du domaine de transition.

Ces modifications sont aisément reconnaissables sur les plus petits échantillons de forage observés au microscope électronique, et elles ont révélé que le forage principal avait effectivement atteint le domaine de transition.

Depuis la fin du forage, Windischschenbach est devenu un observatoire géologique. L'ensemble des deux puits, distants de 200 mètres, permet d'analyser la roche intermédiaire. On effectue aussi des expériences sismiques de «trou croisé», au cours desquelles les puits se croisent.

Une sonde est placée dans un puits, et une sonde réceptrice dans l'autre ; on a également analysé la communication hydraulique entre les deux puits. Windischschenbach est aussi l'amorce d'une collaboration internationale pour l'étude de l'écorce terrestre. Le programme international de forage continental profond doit reprendre cette année.

Rolf EMMERMANN travaille au Centre de recherches géologiques de Potsdam.

The German Continental Deep Drilling Program (KTB) Site Selection Studies in the Oberpfalz and Schwarzwald, sous la direction de R. Emmermann et J. Wohlenberg, Springer-Verlag, 1989.

Geodynamik und Plattentektonik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1995.

Scientific Rationale for Establishment of an International Program of Continental Scientific Drilling, sous la direction de Mark Zoback et R. Emmermann, GeoForschungsZentrum Potsdam, 1994.

Les taxoïdes: de nouvelles armes contre le cancer

KYRIAKOS NICOLAOU • RODNEY GUY • PIERRE POTIER

Après avoir découvert le principe anticancéreux de l'if, les chimistes mettent au point des composés analogues qui permettent de combattre la maladie.

Il y a sept ans, la presse annonçait une avancée dans le traitement des cancers de l'ovaire grâce à un composé nommé taxol, extrait de l'if américain, *Taxus brevifolia*. Toutefois, cette découverte faisait surgir un grave problème écologique : la substance était extraite de l'écorce du tronc de l'arbre et obligeait donc à l'abattre. Or, les ifs poussent lentement (un arbre atteint la maturité en une centaine d'années et il mesure alors environ huit mètres) et ils ne produisent chacun qu'une faible quantité d'écorce : un arbre centenaire ne fournit qu'un gramme de taxol, soit la moitié de la quantité nécessaire pour le traitement d'une seule personne pendant un an. De surcroît, les ifs dont l'écorce contient du taxol ne se trouvent que dans les forêts anciennes, fragiles et protégées du Nord-Ouest américain. L'abattage massif des ifs suscita une controverse aux États-Unis : les écologistes réclamaient la protection des arbres restants, tandis que les personnes atteintes de cancer et leurs familles réclamaient le médicament.

La chimie a mis fin à cette âpre opposition : en 1994, l'Agence américaine du médicament (FDA) a autorisé l'utilisation du taxol hémisynthétique, fabriqué en laboratoire et disponible en quantité illimitée, pour le traitement de divers cancers (voir plus loin). Au début de 1996, une équipe médicale de l'Université Emory a publié les résultats de ses études sur les propriétés thérapeutiques de cet agent : sans se lamenter sur la pénurie,

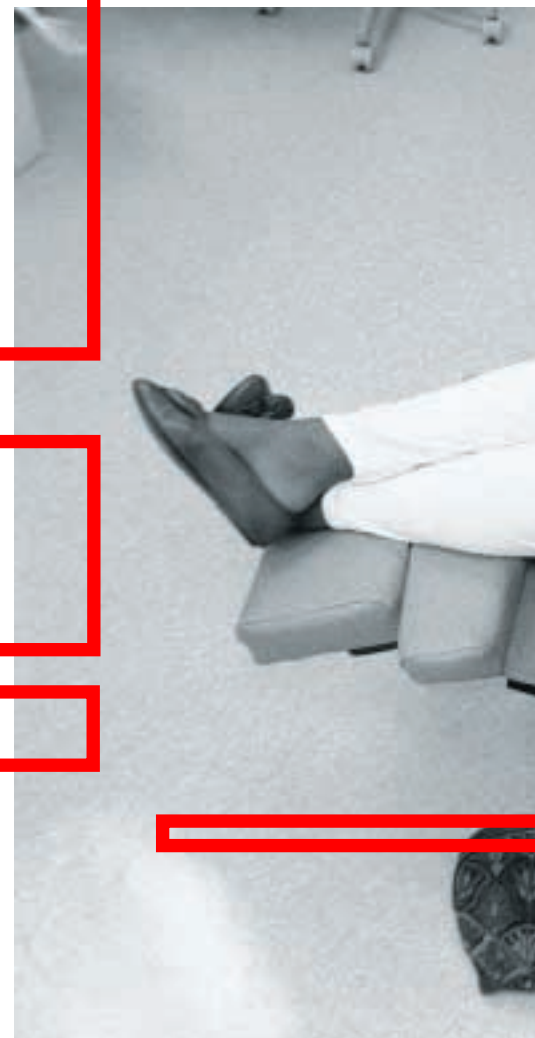
les médecins ont insisté sur son efficacité attendue. En effet, les femmes souffrant de cancer avancé des ovaires et traitées par du taxol associé à un autre médicament anticancéreux (par exemple, du cis-platine) vivaient en moyenne 14 mois de plus que les patientes traitées par le cis-platine seul. D'aujourd'hui, le taxol est considéré comme l'un des traitements les plus prometteurs contre les cancers de l'ovaire, mais, aussi, du sein et d'autres types de cancer. Des études ont montré son efficacité contre le cancer du poumon et contre les mélanomes. Comment cet agent, naguère rare, s'est-il ainsi imposé ?

L'histoire du taxol est un bel exemple de travail scientifique et technique : les chimistes avaient identifié ce composé en 1966, mais les progrès réalisés par les biologistes ont déterminé comment il agissait, et les médecins ont exploré ses propriétés bénéfiques. Aujourd'hui, de nombreux chimistes cherchent à mettre au point toute une famille de composés analogues au taxol – les taxoïdes – qui seraient plus faciles à fabriquer et plus actifs que le taxol.

Redécouvrir le taxol

Si l'on ne s'est intéressé au taxol qu'envers 1966, les propriétés médicinales de l'if sont connues depuis des siècles. Dans l'un des sept livres de *La guerre des Gaules*, Jules César rapportait la mort du chef Catuvolcus, qui se suicida en buvant une infusion d'écorce d'if. Les

tribus indiennes du Nord-Ouest des États-Unis, tels les Quinault, les Multnomah et les Nez Percés, utilisaient l'écorce de l'if du Pacifique comme désinfectant, comme substance abortive et comme traitement du cancer de la peau. Cependant, au cours de ces 100



1. ON UTILISE LE TAXOL contre le cancer, en l'injectant dans les veines, lors de plusieurs séances qui durent chacune jusqu'à six heures. Les chimistes espèrent que des dérivés du taxol, les taxoïdes, pourront être administrés par de simples injections ou même par voie orale.

dernières années, l'arbre fut négligé. Dans le Nord-Ouest des États-Unis, par exemple, les sociétés d'exploitation du bois brûlaient les ifs qui les gênaient quand ils abattaient les pins et les sapins dont ils faisaient le commerce.

En 1952, le botaniste américain Arthur Barclay déclencha un processus long et tortueux qui devait redorer le blason de l'if. À l'époque, l'Institut américain contre le cancer avait demandé ses chercheurs d'explorer les milieux naturels, afin d'identifier des substances aux propriétés pharmaceutiques nouvelles. A. Barclay récolta toutes les parties de l'if du Pacifique de

l'État de Washington, et les envoya en Caroline du Nord, où les chimistes Mansukh Wani et Monroe Wall découvrirent qu'un extrait préparé à partir des écorces du tronc tuait des cellules leucémiques conservées en culture. En 1967, M. Wani et M. Wall isolèrent de ce mélange le principe actif qu'ils nommèrent taxol.

Aujourd'hui l'appellation «taxol» reste largement utilisée, mais les Laboratoires Bristol-Myers Squibb, qui ont déposé la marque «Taxol», préférèrent que la communauté scientifique utilise plutôt le terme «paclitaxel» (bien qu'un médicament français, maintenant disparu, utilisé contre la constipation ait déjà porté le nom de taxol).

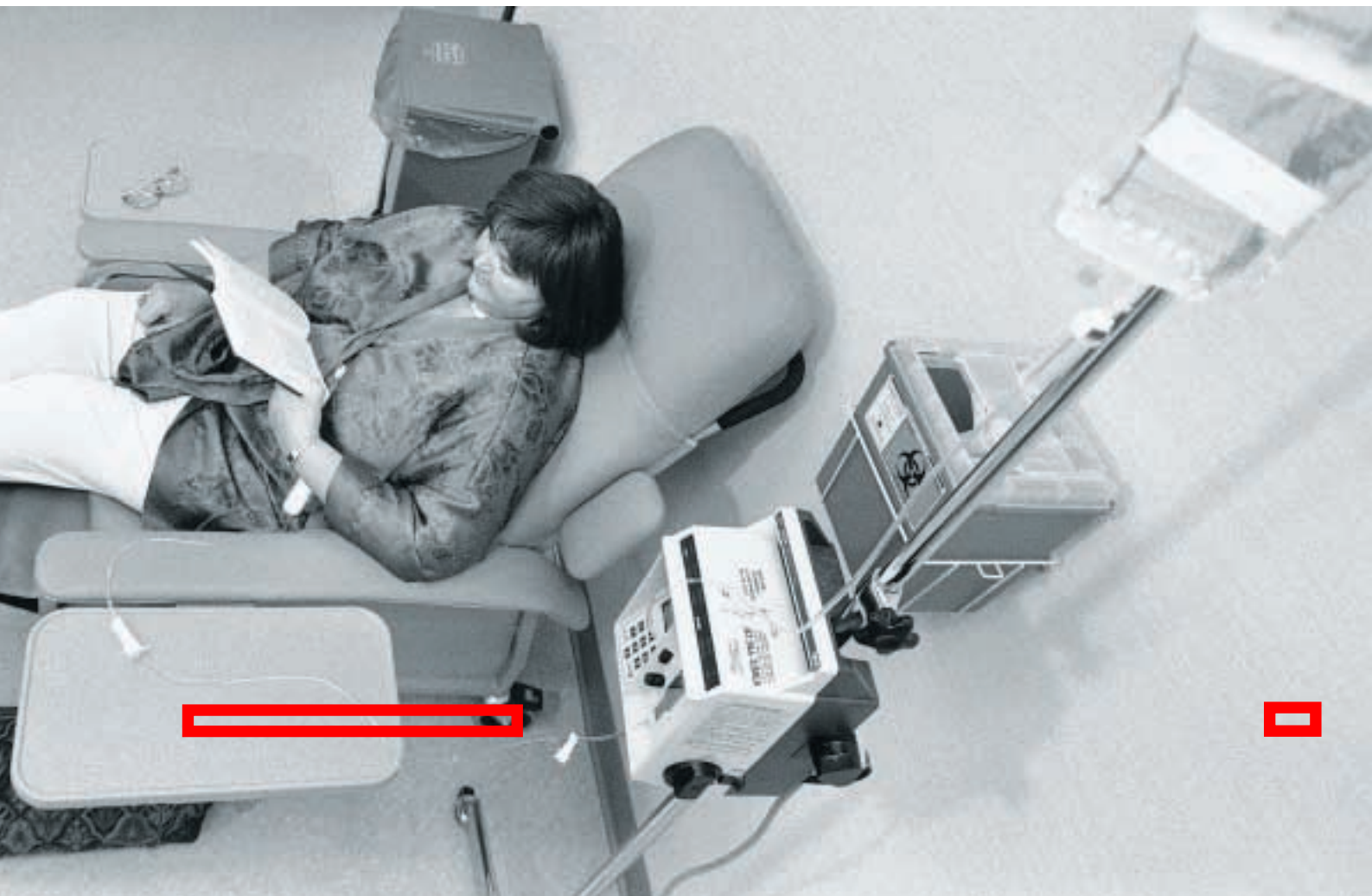
Après le travail de M. Wani et M. Wall, le taxol retomba presque dans l'oubli. L'Institut américain du cancer n'en avait pas vu toutes les potentialités. Au cours des premiers essais biologiques, d'autres composés s'étaient révélés tout aussi efficaces

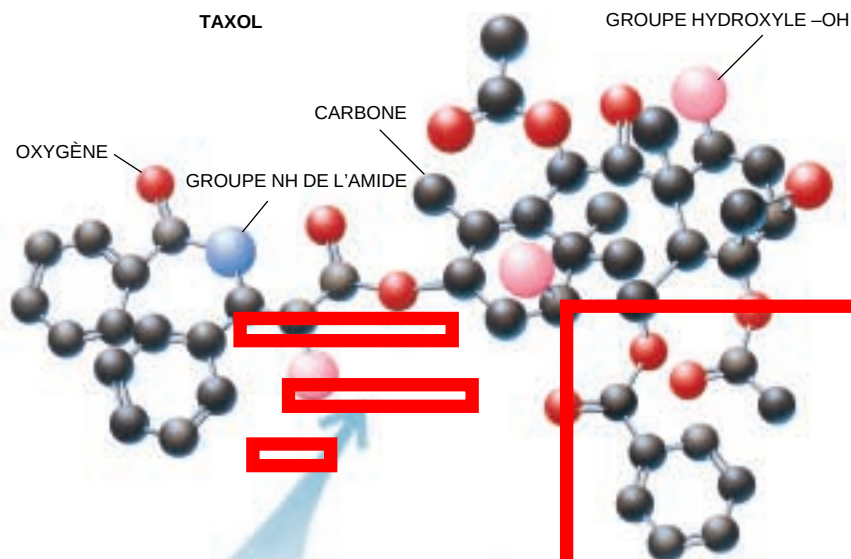
de plus, le taxol était difficile à obtenir et fort peu soluble. Toutefois M. Wall restait convaincu de son intérêt et continua d'en vanter les propriétés. En 1977, l'Agence accepta d'approfondir les recherches en la matière, mais ces travaux supplémentaires ne montrèrent pas de supériorité particulière du composé.

Des microtubules rigides

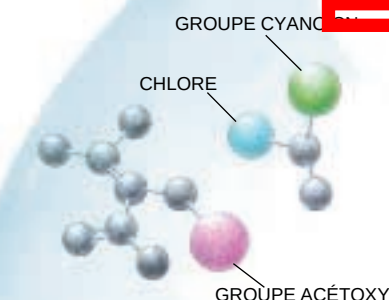
Cette deuxième série d'essais était à peine achevée que deux biologistes du Collège de médecine Albert Einstein, à New York, découvrirent une nouvelle facette du taxol : en 1978, Susan Horwitz et Peter Schiff démontrèrent que l'action du taxol était complètement différente de celle des autres médicaments connus à l'époque. Progressivement, pendant dix ans, S. Horwitz et ses collègues explorèrent les effets du taxol, découvrant notamment que la molécule se liait à des structures cellulaires nommées microtubules, qui soutiennent la structure et la motilité interne des cellules.

Normalement, les microtubules sont des assemblages souples, qui jouent un rôle crucial au cours de la division cellulaire ; ce sont les principaux constituants du fuseau mitotique, qui contribue à la séparation des chromosomes, au cours de la mitose. Quand le taxol se lie aux microtubules, ces der-

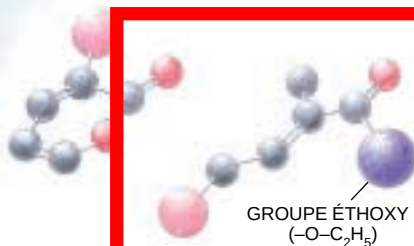




MOLÉCULES INITIALES



2. ON SYNTHÉTISE LE TAXOL à partir de molécules simples. À l'Institut de Recherche Scripps, K. Nicolaou et ses collègues ont d'abord associé les fragments supplémentaires en une série de 39 étapes. En substituant divers groupes d'atomes, aux étapes successives de la synthèse, les chimistes fabriquent des centaines de dérivés du taxol, ou taxoïdes (ici les atomes d'hydrogène ne sont pas représentés, par souci de clarté ; ils complètent à quatre le nombre de liaisons de chaque atome de carbone).



niers deviennent extrêmement stables et statiques, de sorte que la division cellulaire est bloquée : les cellules sont tuées au moment où elles commencent à se diviser. Comme les cellules cancéreuses se divisent plus fréquemment que les cellules saines, le taxol agit comme un

les cellules tumorales, dont les divisions sont anarchiques. Toutefois d'autres cellules à division rapide, telles les cellules sanguines ou les cellules intestinales, sont également affectées, de sorte que le taxol a des effets secondaires, affaiblissant le système immunitaire ou tuant certaines cellules nerveuses, et provoquant des nausées et une calvitie. Mal-

gré ces inconvénients, la communauté scientifique fut très intéressée par le mécanisme d'action original du taxol, qui pouvait renforcer d'autres traitements, lors de l'apparition de résistances. En outre, comme le taxol tuait les cellules cancéreuses d'une manière nouvelle, il offrait un espoir aux patients dont le cancer n'était plus jugulé par les traitements habituels.

Dès 1984, les médecins de quelques hôpitaux américains avaient entrepris la première phase d'évaluation clinique chez l'homme pour s'assurer de l'absence de risques liés à l'utilisation du taxol. Au cours de l'une de ces études, Eric Rowinsky et ses collègues du Centre oncologique de l'Université de Pittsburgh, obtinrent des résultats sans précédent : le taxol avait réduit la taille des tumeurs de 30 à 50 % chez 20

personnes dont la maladie résistait aux chimiothérapies classiques ; l'un des patients était même guéri. D'autres études ayant confirmé ces résultats, le taxol devint un candidat thérapeutique très prometteur.

Ce n'était pourtant pas une panacée, et nombre de personnes traitées faisaient de graves allergies au traite-

ment, sans que l'on comprenne bien la cause de ces réactions. Les médecins durent ajuster les doses ainsi que la méthode d'administration, afin de minimiser ces effets. Cependant, comme avec toute chimiothérapie, les effets secondaires du taxol continuent de troubler les malades et les médecins.

Lorsque les potentialités du taxol furent démontrées, l'Institut américain du cancer fut confronté à deux difficultés. D'une part, même si le taxol semblait incroyablement efficace, il était loin d'être parfait, ce qui est le problème de la plupart des nouveaux médicaments. D'autre part, le taxol était si rare que les médecins ne purent mener qu'un nombre limité d'essais cliniques entre 1984 et 1989. En 1989, l'Institut américain du cancer et les Laboratoires Bristol-Myers Squibb signèrent un contrat qui prévoyait la production du taxol, en échange des résultats des essais cliniques de l'Institut. Les chimistes de Bristol-Myers Squibb commencèrent donc à récolter massivement l'if du Pacifique, mais ils calculèrent que le filon ne durerait pas plus d'un an : il fallait des centaines de milliers d'arbres. Les horticulteurs, des sylviculteurs, des botanistes, des biologistes et des chimistes mirent tout en œuvre pour trouver de nouvelles sources de taxol.

Un Evénement moléculaire vaincu

Les chimistes furent particulièrement intéressés par le taxol, parce que des molécules si grosses et si complexes (la molécule de taxol est composée de 112 atomes) leur donnent, comme les sommets des montagnes, des envies d'expéditions aventureuses. Comment résister à la tentation de synthétiser une telle molécule ? On savait qu'il faudrait plusieurs années de travail pour synthétiser le taxol, mais on savait aussi que ces études révéleraient d'autres propriétés du composé : quelles parties de la structure sont particulièrement stables ? Comment la molécule interagit-elle avec d'autres agents chimiques ? Ces informations permettraient d'aborder d'autres questions, plus larges, sur les mécanismes d'action moléculaire du taxol dans l'organisme. Enfin, on espérait concevoir de nouveaux médicaments ayant les avantages du taxol, mais pas ses effets secondaires.

Entre 1983 et 1993, plus de 30 équipes cherchèrent ainsi à synthétiser le taxol ou des composés apparentés, mais plus simples. La tâche se révéla ardue, voire désespérée. Initialement, plusieurs équipes explorèrent une technique dite «*fragmentation*» : l'on effectue seulement la moitié du travail ; plutôt que d'accrocher un grand nombre de petits fragments pour obtenir le produit final, on commence avec une substance voisine de celle que l'on vise, puis, en modifiant légèrement cette molécule, on synthétise le produit intéressant en quelques étapes seulement.

Au début des années 1980, l'un d'entre nous (P. Potier et ses collègues), avec Andrew Greene et ses collègues de Grenoble, réussit les premières hémisynthèses de taxol. Les chimistes français observèrent alors que le taxol est constitué de deux parties : le cœur de la molécule, nommé «*taxane*», et une chaîne latérale, qui y est attachée. En examinant l'if européen (*Taxus baccata*) à la recherche de molécules de type taxol, P. Potier et ses collègues de l'Institut de chimie des substances naturelles du CNRS, à Gif-sur-Yvette, découvrant que le cœur de la molécule de taxol pouvait être isolé à partir des aiguilles de cet arbre. Puis ils mirent au point une méthode simple pour y attacher la chaîne latérale. Les aiguilles contiennent en effet une substance renouvelable de production, le problème de la pénurie de taxol était résolu.

Aux États-Unis, les laboratoires Bristol-Myers Squibb renoncèrent ainsi à abattre les ifs du Pacifique, en reprenant un procédé de production du taxol fondé sur une hémisynthèse présentée comme différente de la version française.

La synthèse totale

Alors que P. Potier, A. Greene et d'autres étudiaient l'hémisynthèse du taxol, deux d'entre nous (K. Nicolaou et R. Guy) s'efforçaient de mettre au point la synthèse totale de la molécule. En la construisant à partir de molécules de base simples, nous espérons être capables de modifier la structure à n'importe quelle position, afin de créer des dérivés du taxol, les taxoïdes, dont certains seraient peut-être moins chers et plus efficaces que le taxol lui-même. Au début de l'année 1994, deux groupes publièrent, presque simultanément, la synthèse totale du taxol.

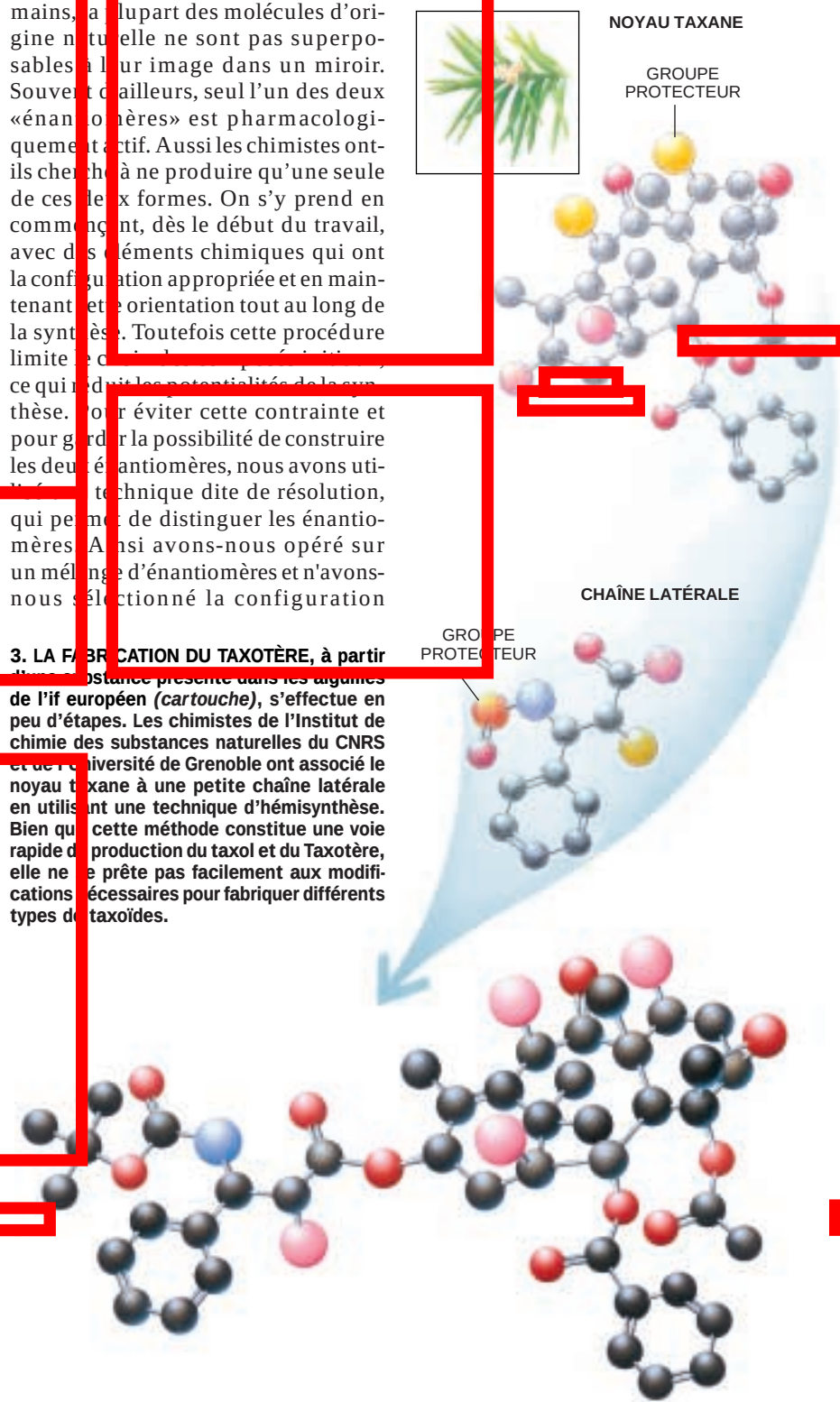
K. Nicolaou, R. Guy et leurs collègues publièrent d'abord leurs résultats dans la revue *Nature* ; puis Robert Holton et ses collègues de l'Université de Floride annoncèrent leur succès dans le *Journal of the American Chemical Society* (le journal de la Société américaine de chimie).

Pour synthétiser le taxol, on doit considérer sa «*chiralité*» : comme nos mains, la plupart des molécules d'origine naturelle ne sont pas superposables à leur image dans un miroir. Souvent d'ailleurs, seul l'un des deux «*énantiomères*» est pharmacologiquement actif. Aussi les chimistes ont-ils cherché à ne produire qu'une seule de ces deux formes. On s'y prend en commençant, dès le début du travail, avec des éléments chimiques qui ont la configuration appropriée et en maintenant cette orientation tout au long de la synthèse. Toutefois cette procédure limite le nombre de possibilités de ce qui réduit les potentialités de la synthèse. Pour éviter cette contrainte et pour garder la possibilité de construire les deux énantiomères, nous avons utilisé une technique dite de résolution, qui permet de distinguer les énantiomères. Ainsi avons-nous opéré sur un mélange d'énantiomères et n'avons-nous sélectionné la configuration

3. LA FABRICATION DU TAXOTÈRE, à partir d'une substance présente dans les aiguilles de l'if européen (cartouche), s'effectue en peu d'étapes. Les chimistes de l'Institut de chimie des substances naturelles du CNRS et de l'Université de Grenoble ont associé le noyau taxane à une petite chaîne latérale en utilisant une technique d'hémisynthèse. Bien que cette méthode constitue une voie rapide de production du taxol et du Taxotère, elle ne se prête pas facilement aux modifications nécessaires pour fabriquer différents types de taxoïdes.

appropriée que vers la fin de la synthèse.

Fallait-il viser une synthèse convergente ou une synthèse linéaire ? Dans la synthèse convergente, on commence par fabriquer plusieurs petits fragments, que l'on associe pour former le produit désiré. Dans la synthèse linéaire, au contraire, on part d'un

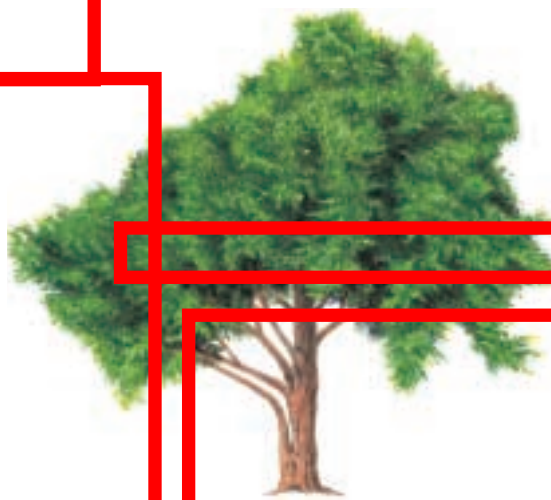


petit composé que l'on modifie progressivement. L'équipe de K. Nicolaou a suivi cette hypothèse convergente, parce que l'on peut modifier facilement la structure finale en introduisant différents éléments de construction à n'importe quelle étape de la synthèse. On pouvait modifier systématiquement soit le noyau taxane, soit la chaîne latérale de la molécule.

Les chimistes se livrent couramment à de telles modifications structurales des molécules bioactives, car ils attendent que ces variations leur révèlent les relations entre les propriétés de ces molécules et leur organisation moléculaire. Par exemple, si le remplacement d'un groupe hydroxyle (-OH) par un atome d'hydrogène rend un composé plus actif, on conclut que le groupe hydroxyle intervient directement dans les interactions entre le composé et sa cible biologique ; nanti de cette information, on peut alors fabriquer de nouvelles molécules en modifiant ou en supprimant des segments qui ne modifient pas l'efficacité ou qui provoquent des effets secondaires nocifs.

C'est ainsi que l'un d'entre nous (P. Potier) et ses collaborateurs (Daniel Guénard et Françoise Guéritte-Vogelin) produisirent le premier taxoïde notable, qu'ils nommèrent Taxotère. La structure de cette molécule diffère de celle du taxol en deux sites ; il en résulte que le Taxotère est deux fois plus actif que le Taxol. Aujourd'hui des médecins japonais et européens administrent régulièrement du Taxotère contre les cancers du sein et des ovaires ; vers la fin de l'année 1995, l'Agence américaine du médicament a approuvé le Taxotère pour le traitement des leucémies. Les médecins du cancer du sein ont engendré des métastases ou résiste aux autres traitements. Le Taxotère et le taxol semblent avoir des particularités d'action. L'utilisation extensive des deux médicaments dans le cadre d'essais cliniques de chimiothérapie a permis de définir les avantages respectifs de ces produits.

Deux d'entre nous (K. Nicolaou et R. Guy) et leurs collègues de l'Institut Scripps ont produit deux classes importantes de dérivés du taxol qui pourraient un jour avoir des applications pharmaceutiques importantes. Tout d'abord, ils ont simplifié la struc-



4. L'IF DU PACIFIQUE a été la source initiale de l'agent anticancéreux nommé taxol.

ture du taxol et produit un taxoïde un peu plus facile à fabriquer que le taxol. Au cours des tests préliminaires, il est apparu que ce taxoïde a néanmoins conservé la capacité de tuer certains types de cellules cancéreuses. Ensuite, ces chimistes ont mis au point une classe de taxoïdes qui diffèrent légèrement du taxol par des groupes qui semblent se lier aux microtubules. Ils cherchent aujourd'hui à augmenter l'efficacité du taxol en jouant sur ce site de liaison, afin d'améliorer sa capacité à se lier aux microtubules, et à empêcher la division cellulaire.

Les améliorations récentes

Tous les trois, nous avons également tenté d'éviter l'un des inconvénients majeurs du taxol : son insolubilité dans l'eau, qui gêne l'administration du médicament. Aujourd'hui, les médecins effectuent des perfusions par voie intraveineuse, pendant plusieurs heures, d'un milieu liquide utilisé, le Cremophor, pour dissoudre le taxol. Des études chez certains patients, de sorte qu'un composé soluble dans l'eau serait préférable. De nouveaux taxoïdes solubles ont été trouvés à l'Institut Scripps et à l'Institut de chimie des substances naturelles ; si leur activité antitumorale est comparable à celle du taxol, ils pourraient être employés en remplacement du taxol ou du Taxotère.

D'autres taxoïdes solubles dans l'eau permettent d'examiner en détail le mécanisme de liaison du taxol aux microtubules. Très insoluble, le taxol a l'avantage de cristalliser, ce qui facilite les études de structure. Toutefois, la forme solide d'une molécule ne repro-

duit pas toujours fidèlement ses propriétés dans l'environnement aqueux de la cellule. En observant la manière dont les taxoïdes dissous s'attachent aux microtubules, nous pouvons tenter d'identifier les segments de ces

molécules qui sont responsables de leur probabilité d'interagir dans la cellule. Afin de manipuler la structure du taxol pour améliorer son efficacité, nous devons découvrir où et comment la liaison se produit. Nous pourrions alors augmenter sa capacité à s'arrimer aux microtubules et, donc, à tuer les cellules.

L'histoire du taxol n'est pas terminée, car la recherche pharmacologique a peu d'« Eurêka ! ». C'est un travail qui dure des années, pendant lesquelles on explore les mécanismes de fonctionnement d'un principe actif, afin d'en améliorer l'efficacité. Dans le cas du taxol, les chercheurs ont déjà découvert comment produire de grandes quantités d'une molécule initialement rare et trouvé de nouvelles applications pour son utilisation dans le traitement du cancer. Il reste maintenant à modifier la structure du taxol pour obtenir un médicament moins cher et plus efficace.

Kyriakos NICOLAOU et Rodney GUY travaillent à l'Institut Scripps. Pierre POTIER est directeur de l'Institut de chimie des substances naturelles.

Hal HARTWELL, *The Yew Tree : A Thousand Whispers*, Bulogosi Communications, Eugene, Ore., 1991.

D. GUÉNARD, F. Guéritte-Vogelin et P. POTIER, *Taxol and Taxotere : Discovery, Chemistry and Structure-Activity Relationships*, in *Accounts of Chemical Research*, vol. 26, n° 4, pp. 160-167, avril 1993.

R.C. DONNOWER et E.K. ROWINSKY, *An Overview of Experience with Taxol (Paclitaxel) in the U.S.A.*, in *Cancer Treatment Reviews*, vol. 19, Supplément C, pp. 63-78, octobre 1993.

K.C. NICOLAOU, W.M. DAL et R.K. GUY, *Chemistry and Biology of Taxol*, in *Angewandte Chemie, International Edition in English*, vol. 33, n° 1, pp. 45-66, 17 janvier 1994.

K.C. NICOLAOU, Z. YANG, J.J. LIU, H. UENO, P.G. NANTERMET, R.K. GUY, C.F. CLAIBORNE, J. RENAUD, E.A. COULADOUROS, K. PAULVANNAN et E.J. SORENSEN, *Total Synthesis of Taxol*, in *Nature*, vol. 367, pp. 630-634, 17 février 1994.

La sculpture et les nombres

IAN STEWART

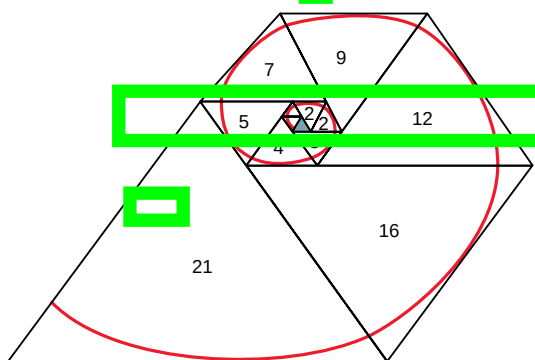
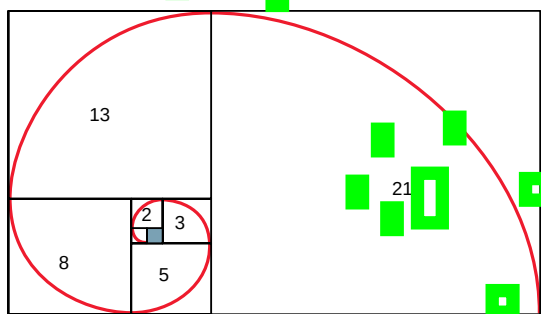
Comme le nombre d'or, le nombre plastique inspire les sculpteurs.

Alan Saint George est un architecte britannique à la retraite qui vit au Portugal et qui crée des sculptures mathématiques. Il utilise fréquemment les propriétés du nombre d'or, ainsi que celles d'un cousin moins prestigieux, le «nombre plastique», qu'il a découvert grâce l'architecte Richard Padovan. Le nombre plastique a une courte histoire en architecture, mais son origine mathématique est au moins aussi respectable que celle de son cousin doré. On ne l'a pas trouvé dans la nature aussi fréquemment que le nombre d'or, mais personne ne l'avait vraiment cherché.

Commençons avec le nombre d'or, qui vérifie l'égalité $\phi = 1 + 1/\phi$; ϕ est égal à 1,618034... Ce nombre a des relations avec les nombres de Fibonacci, que l'on construit géométriquement en formant une spirale à partir de carrés (voir la

figure 1 en haut). Le carré initial (en gris) a un côté de longueur égale à 1, de même que son voisin de gauche. On ajoute alors un carré, dont la longueur du côté est égale à 2, au-dessus des deux premiers carrés, puis on poursuit l'ajout des carrés adjacents, en tournant : la longueur du côté augmente selon la suite : 3, 5, 8, 13, 21..., chaque nombre de cette suite étant la somme des deux nombres précédents. Cette suite est nommée suite de Fibonacci. Le rapport de deux nombres successifs tend vers le nombre d'or ϕ . Par exemple, $5/3$ est égal à 1,6666..., et $21/13$ est égal à 1,61538...

Ces propriétés résultent de la règle qui engendre les nombres de Fibonacci : pour les grands nombres, elle conduit à l'équation $\phi = 1 + 1/\phi$. Quand on trace un quart de cercle à l'intérieur



1. Construction géométrique des nombres de Fibonacci (en haut) et des nombres de Padovan (en bas).

de chacun des carrés précédents, les arcs forment une spirale harmonieuse, qui approche la spirale logarithmique, souvent présente dans la nature : les graines du tournesol ou les coquilles du nautilus sont enroulées ainsi. Les tours de spirale croissent en raison du nombre d'or.

LE NOMBRE PLASTIQUE

Passons maintenant au nombre plastique. On commence la construction en utilisant un principe analogue

mais en utilisant des triangles équilatéraux à la place des carrés (voir la figure 1, en bas). Au triangle initial (en gris), on ajoute des triangles successifs dans le sens des aiguilles d'une montre. La spirale, à nouveau, est approximativement logarithmique. Les trois premiers tri-

angles ont un côté de longueur égale à 1 ; les deux triangles suivants ont un côté de longueur égale à 2 ; puis les longueurs des côtés sont égales à 3, 4, 5, 7, 9, 12, 16, 21... Là encore, la règle de construction des nombres successifs est simple : chaque nombre s'obtient en laissant de côté le nombre précédent et en ajoutant les deux nombres qui précédaient celui-ci : 21 est égal à 9 + 12. J'aimerais donner à cette suite le nom de Richard Padovan qu'on l'a étudiée (par une coïncidence heureuse, «Padovan» a la même origine que «Padoue», ville peu éloignée de Pise dont Fibonacci était originaire).

Du point de vue algébrique, les règles de construction des suites de Fibonacci $F(n)$ et de Padovan $P(n)$ sont les suivantes : $F(n+1) = F(n) + F(n-1)$, avec $F(0) = F(1) = 1$; $P(n+1) = P(n-1) + P(n-2)$, avec $P(0) = P(1) = P(2) = 1$. En reprenant pour la suite de Padovan la définition du nombre d'or, nous obtenons le nombre plastique p , limite du rapport des nombres successifs de Padovan : 1,324718... L'écriture algébrique permet d'établir l'équation $p = 1/p + 1/p^2$ ou encore $p^3 - p - 1 = 0$: p est l'unique nombre réel qui soit solution de cette équation.

La suite de Padovan augmente moins vite que celle de Fibonacci, et p est inférieure à ϕ . Elle a de nombreuses propriétés intéressantes. Par exemple, la figure illustre avec des triangles l'égalité $21 = 16 + 5$; elle donne aussi une autre définition de la suite de Padovan : $P(n+1) = P(n) + P(n-4)$.

Des nombres tels que 3, 5, et 21 appartiennent aux suites de Padovan et de Fibonacci. En existe-t-il d'autres ? Si oui, combien ? Certains nombres de Padovan, tels que 9, 16 et 49, sont des carrés ; en existe-t-il d'autres ? Les racines carrées de ces nombres sont respectivement 3, 4 et 7, qui sont également des nombres de Padovan. Les racines carrées des autres carrés de Padovan sont-elles également des nombres de Padovan ? Voilà des questions qui méritent un peu d'attention.

Une autre façon de construire les nombres de Padovan consiste à reproduire l'utilisation des carrés pour les nombres de Fibonacci, mais avec des parallélépipèdes (voir la figure 2). Partons d'un cube de côté égal à 1, et plaçons à côté de lui un autre cube identique, adjacent par une face. On obtient un parallélépipède dont deux côtés sont égaux à 1, et le troisième côté est égal à 2 (parallélépipède $1 \times 1 \times 2$). Contre la face 1×2 , plaçons un autre parallélépipède $1 \times 1 \times 2$. Nous obtenons un parallélépipède $1 \times 2 \times 2$. Puis, contre une face 2×2 , plaçons un cube $2 \times$

2×2 , afin de former au total un parallélépipède $2 \times 2 \times 3$. Contre une face 2×3 , plaçons un parallélépipède $2 \times 2 \times 3$, afin d'obtenir un parallélépipède $2 \times 3 \times 4$, et ainsi de suite en ajoutant successivement des parallélépipèdes à l'Est, au Sud, en bas, à l'Ouest, au Nord, et en haut. À chaque étape, le nouveau parallélépipède a pour longueur des côtés trois nombres de Padovan consécutifs. En outre, si l'on relie les faces carrées successives des parallélépipèdes par des segments de droite, on obtient une spirale. Cette spirale reste dans un plan. A. Saint George a fondé ses sculptures sur cette propriété, en utilisant des tiges rigides terminées par des boules de liaison (quel diagramme forme l'intersection de ce système de parallélépipèdes avec ce plan?).

LA SUITE DE PERRIN

Une suite analogue à celle de Padovan, avec les mêmes règles de construction mais des valeurs initiales différentes, a été étudiée en 1876 par le mathématicien français Édouard Lucas. Comme les idées de ce dernier ont été développées par R. Perrin en 1899, la suite est aujourd'hui nommée suite de Perrin. Les nombres de Perrin $A(n)$ diffèrent des nombres de Padovan, parce que $A(0) = 3$, $A(1) = 0$ et $A(2) = 2$. Le rapport de deux nombres de Perrin consécutifs est encore égal à p , mais Lucas observa une propriété plus intéressante : pour tous les nombres n premiers, n divise exactement $A(n)$. Par exemple, 19 est premier, $A(19) = 209$, et $209/19 = 11$.

Ce théorème donne un test de non-primauté. Par exemple, pour $n = 18$, on a $A(18) = 158$, et $158/18 = 8,777$, qui n'est

2. Les nombres de Padovan s'obtiennent également à l'aide de spirales formées par juxtaposition de parallélépipèdes.

pas entier, aussi conclut-on que 18 est un nombre composé, c'est-à-dire non premier. Plus généralement, on utilise les nombres de Perrin pour déterminer la non-primauté : tout nombre n qui ne divise pas $A(n)$ est composé.

Si n divise $A(n)$, n est-il premier? Voilà une fascinante question ouverte. Personne n'a trouvé de nombre composé n qui divise $A(n)$, mais personne n'a démontré qu'un tel nombre, nommé nombre pseudo-premier de Perrin, n'existe pas. En 1991, Steven Arno, du Centre de recherche informatique de Bowie, a démontré que les nombres pseudo-premiers de Perrin doivent avoir

plus de 14 chiffres. Si vous avez entendu parler de progrès dans l'étude de ce problème, n'hésitez pas à m'écrire.

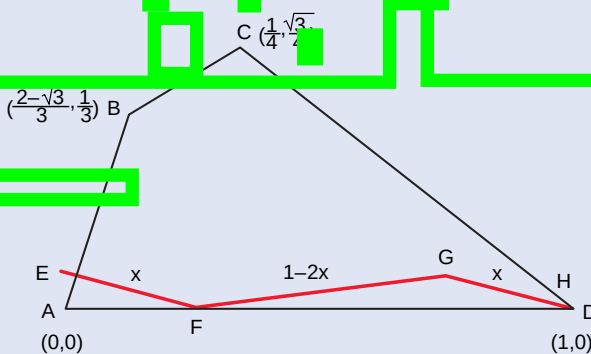
La conjecture de l'existence des nombres pseudo-premiers de Perrin est importante, car le reste de la division de $A(n)$ par n se calcule rapidement. Si la conjecture était démontrée, on obtiendrait un test de primalité (en 1982, à l'Université du Maryland, William Adams et Daniel Shanks ont trouvé un moyen de calculer ce reste en $\log(n)$ étapes). Ainsi, la conjecture aurait des applications utiles en cryptographie, laquelle est aujourd'hui souvent fondée sur les nombres premiers.

La réaction

Richard Delaware, de l'Université de Kansas City, m'a signalé que, en 1992, Rick Norwood, George Poole et Michael Laidacker ont trouvé une couverture de maman (voir *La couverture*, *Pour la Science*, mars 1996) d'aire égale à 0,7523. Cette couverture est plus petite que celle qui avait été trouvée en 1973 par Gerriets et Poole.

Ce résultat détient sans doute encore le record, parce que la couverture $ABCD$ (à droite) que je présentais est moins bonne que prévue. Richard Kendon, de Nottingham, a trouvé un ver que la couverture ne recouvre

pas. Il a observé que les angles DAB et ADC sont respectivement égaux à 75 et 30 degrés. Son ver $EFGH$ est composé de trois segments. Le point G est à une distance x sur une droite qui fait un angle GDA de 15 degrés et le point F est à la distance $1-2x$ de G sur la droite AD . Le point E est à la distance x de F , de sorte que l'angle EFA est égal à 15 degrés. R. Kendon a calculé que, pour $x = 0,01$, par exemple, l'angle EAD est égal à 75,177 degrés, c'est-à-dire supérieur à 75 degrés : le point E n'est pas dans la couverture.



Chargeurs d'eau

Tel le titan Atlas, cet insecte semble porter le monde sur son dos. Son fardeau est en fait une minuscule goutte d'eau, l'insecte lui-même ne mesurant que quelques millimètres. Tel Sisyphos, sitôt la goutte perdue, il se chargera d'un nouveau fardeau. Pour observer ce curieux portefaix, nul besoin de partir sous les tropiques : ce staphylin est commun dans les forêts et les jardins d'Europe. C'est pourtant chez une espèce de Nouvelle-Guinée, *Megarthus auricola* (en haut, à droite), que j'ai découvert le comportement «chargeur d'eau».

Cette découverte dut beaucoup au hasard. Désirant photographier un individu de cette espèce, je le plaçais quelques instants au réfrigérateur afin de ralentir son activité. Je m'aperçus alors qu'il accumulait l'eau condensée, formant

une goutte sur l'avant de son corps. Par l'action combinée du labre et des maxilles, il propulsait l'eau, via la face extérieure de ses mandibules, jusqu'à des «gouttières» situées de part et d'autre de la tête, entre l'œil et l'insertion de l'antenne. Bordées de soies, ces sillons permettent le transfert de l'eau de la base des mandibules jusqu'au sommet de la tête. Une gouttelette se forma, qui recouvrit bientôt l'avant du corps, les élytres et une partie de l'abdomen. En quelques minutes, la gouttelette atteignit le double du volume de l'insecte. L'eau fut ensuite rejetée dans le milieu, ce qui nécessite parfois l'action des pattes postérieures. Le tout dure rarement plus de dix minutes.

J'ai retrouvé le même comportement chez huit autres espèces de staphylin, dont plusieurs sont communes en

Europe (ci-dessous et page de droite). De taille modeste (deux à quatre millimètres), les chargeurs d'eau vivent sur les vieux champignons, dans la litière forestière, les composts, les excréments et les cadavres d'animaux.

Le comportement «chargeur d'eau» fait intervenir des structures morphologiques complexes et remplit

Les individus de l'espèce néo-guinéenne *Megarthus auricola* Cuccodoro forment des gouttelettes hémisphériques (taille de l'individu : trois millimètres).

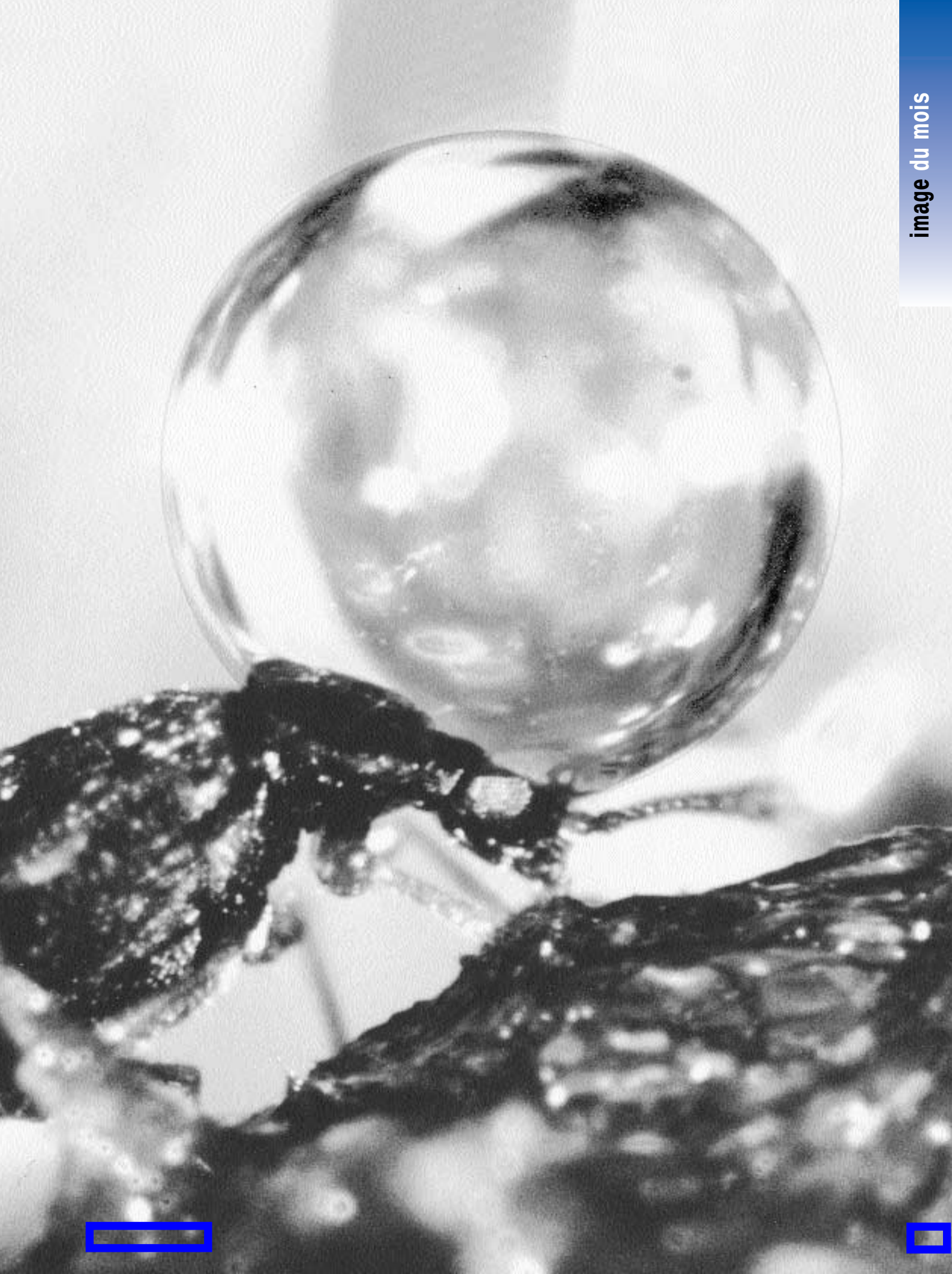
probablement une fonction importante. Le pompage et le stockage de l'eau pourraient faciliter l'hydratation ou la régulation thermique du corps de l'insecte, ou encore améliorer la dispersion des sécrétions glandulaires qui le protègent contre les prédateurs, les bactéries et les champignons. Il pourrait aussi s'agir d'un mode de nutrition élaboré, l'insecte filtrant dans un grand volume d'eau sans avoir à se déplacer. Le stockage de la gouttelette lui éviterait alors de filtrer deux fois la même eau. Des recherches menées au Muséum d'histoire naturelle de Genève et au Natural History Museum de Londres permettront de trancher entre ces hypothèses.

Qu'il ait fallu se rendre dans l'une des régions les plus reculées du Globe pour découvrir un phénomène observable dans nos jardins souligne la marginalisation actuelle de la recherche en biologie des organismes.

Giulio CUCCODORO
Muséum d'histoire naturelle de Genève

Fréquent en Europe sur les vieux champignons (ici sur de la mousse), *Proteinus brachypterus* forme des gouttelettes sphériques.

Ces deux photographies de *Proteinus brachypterus* (Fabricius), prises à une minute d'intervalle, montrent l'acroissement du volume de la gouttelette.



Botanique

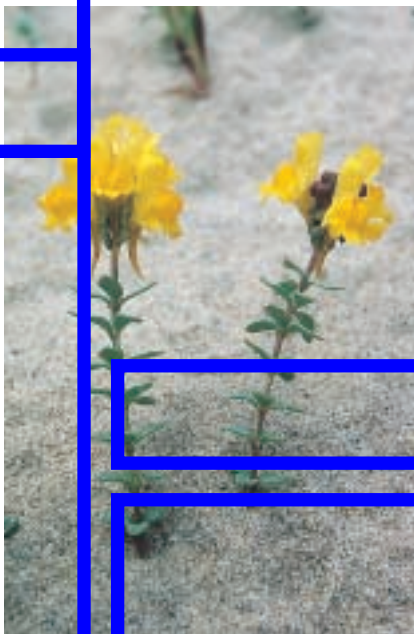
Inventaire des plantes protégées en France

Philippe Danton et Michel Baffray.
Éditions Nathan, AFSEV, 1996.

Ce superbe ouvrage est un panorama complet de la flore légalement protégée (elle reste cependant menacée) en France métropolitaine. Il apporte, de façon particulièrement agréable et claire, des informations permettant même au non-botaniste d'identifier et de respecter les 429 espèces concernées par les dispositions légales visant «à prévenir la disparition d'espèces végétales menacées et à permettre la conservation des biotopes correspondants». Il s'agit de l'arrêté ministériel du 20 janvier 1982 interdisant toutes les formes de destruction, de transport et de commerce de ces plantes. L'arrêté modificatif du 31 août 1995 se borne à quelques ajouts, à diverses précisions systématiques, et à de rares suppressions résultant d'une meilleure estimation de la fréquence de certaines espèces et des menaces pesant sur elles.

G. Ayrton nous rappelle par quel processus de réflexion et de luttes permanentes ces textes réglementaires ont vu le jour. Les menaces pesant sur telle ou telle espèce végétale sont dénoncées dès le milieu du XIX^e siècle par quelques précurseurs au sein de la communauté scientifique, mais il faut attendre 1890 pour que d'importantes décisions administratives soient prises à l'initiative de quelques trop rares préfets soucieux de la sauvegarde du patrimoine vivant. Cependant, à cette époque comme aujourd'hui, l'efficacité de ces mesures dépend de la volonté politique d'appliquer la loi, mais aussi de la faire connaître...

En effet, si nul n'est censé ignorer la loi, il faut constater que, dans le domaine de la flore spontanée, le citoyen, quel que soit son niveau d'études, est largement démuné : le contenu des programmes scolaires et universitaires actuels ne peut qu'aggraver les choses. Bien entendu, il convient ici de souligner l'effort méritoire des associations de naturalistes amateurs, mais cette action est, par la force des choses, limitée à un public restreint. Or, l'ignorance est l'une des raisons premières de la banalisation du patrimoine naturel ; elle est souvent la cause, par manque d'information, de saccages imprévisibles et irréversibles, parfois accomplis en bonne conscience : l'ouvrage de Michel Baffray et Philippe Danton s'imposait donc.



La linaria à feuilles de Thym (*Linaria thymifolia*) est légalement strictement localisée dans le monde aux dunes littorales du golfe de Gascogne.

Son efficacité repose sur un texte précis, simple et clair, associé à une riche et souvent très belle iconographie : un dessin au trait et une photographie réalisée dans le milieu naturel décrivent chaque espèce (à de rares exceptions près, pour les plantes non revues depuis plusieurs décennies, mais dont la survie est espérée). En outre sont précisées la répartition de chacune en France métropolitaine et dans le monde, son écologie (base d'une éventuelle gestion conservatoire), les menaces pesant sur sa survie, enfin les plantes pouvant être confondues avec elle.

Si cet ouvrage est diffusé et utilisé comme il le mérite, nul ne devrait pouvoir invoquer sa méconnaissance de la flore pour justifier telle ou telle action destructrice ; il relève ainsi l'une des critiques formulées à l'égard de ces listes, dont l'efficacité peut être contestée, parfois même par des naturalistes favorables à la préservation du patrimoine vivant. Il convient à cet égard de souligner que l'aspect répressif ne constitue pas, et de loin, l'objectif essentiel de ces dispositions légales. Les promoteurs ne sont pas principalement visés, bien que le piétinement, les bouquets, parfois l'arrachage de plantes ornementales en vue de l'introduction dans les jardins («vandalisme horticole») soient autour des grandes villes une cause non négligeable d'appauvrissement de la flore. La mise en garde peut concerner aussi les effets pervers des modes dits «écologiques» fondés sur l'utilisation alimentaire, non dépourvue de risques, de végétaux sauvages, ou sur l'usage de

ceux-ci à des fins para- ou pseudomédicales. L'objectif majeur des dispositions légales n'est pas d'interdire, mais d'informer, et de placer ainsi devant leurs responsabilités les utilisateurs, gestionnaires ou «aménageurs» de l'espace naturel en leur faisant connaître ces espèces, leur localisation et leurs exigences écologiques. Il devrait permettre ainsi d'éviter la destruction fortuite de leurs stations, ou la mise en œuvre de mesures erronées, allant à l'encontre de la protection souhaitée (par exemple, la réalisation de plantations forestières dans une station de végétaux rares exigeant la pleine lumière).

Il y a enfin l'intérêt de ces dispositions légales pour l'estimation de la valeur patrimoniale de chaque milieu, en fonction du nombre d'espèces protégées qui y vivent. Sur le plan administratif, ces données objectives permettent de justifier la création d'espaces également protégés (réserves naturelles, arrêtés de biotopes à la diligence des préfets, «sites Natura-2000» soumis au droit communautaire européen...). Les responsables administratifs ou politiques, garants de la préservation de notre patrimoine naturel, trouveront ainsi dans cet ouvrage matière à réflexion et à actions.

En dehors de la partie monographique constituant l'essentiel du livre, on lira avec intérêt les pages sur les enjeux de la conservation de la biodiversité, ainsi que celles qui précisent le droit de l'environnement, les objectifs des Conservatoires botaniques nationaux, les types de milieux où vivent les espèces protégées, le contenu des arrêtés ministériels concernant cette protection, sur le plan régional comme sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Rassembler autant de données sous une forme aussi remarquable représente un travail considérable et tient de l'exploit ; on a donc quelques scrupules à faire grief aux auteurs de menues erreurs matérielles, par exemple dans les cartes de répartition par département de certaines espèces (notamment pour les plaines du Nord et de l'Ouest de la France). De même, quelques illustrations sont discutables dans leur choix, parfois leur identité : ainsi le dessin censé représenter la très rare *Carex reichenbachii* se rapporte incontestablement au *Carex arenaria*, lequel ne mérite nullement cet honneur sur le plan national. Ces critiques de détail n'enlèvent rien aux très grandes qualités scientifiques et esthétiques de l'ouvrage de M. Baffray et Ph. Danton ; méritant le plus grand succès, il devrait constituer l'instrument essentiel de la préservation de notre flore menacée et de ses derniers refuges.

Marcel BOURNÉRIAS

Fantaisie mathématique

Flatland

Edwin Abbott (traduit de l'anglais par Philippe Blanchard). Anatolia Éditions, 1996.

Comment s'appelait-il ce pasteur anglican, né dans les années 1830, qui avait un rapport étrange aux femmes et qui a écrit une fantaisie à la fois onirique et logico-mathématique, grâce à laquelle il est encore bien connu aujourd'hui ? À cette question, répondre Lewis Carroll (1832-1898) serait trop facile. Ses collègues me soufflent un autre nom : Edwin Abbott (1838-1926), dont l'œuvre avait pour titre *Flatland*.

Je ne connaissais pas ce texte bien connu, et je regrette donc que l'éditeur français impose une lourde préface de Giorgio Manganelli au lieu de donner un minimum d'informations sur Abbott et sur son œuvre, ainsi que sur la réception de *Flatland*.

Au moment de présenter ce livre à mon tour, cependant, je m'aperçois qu'il est difficile d'en parler sans lourdeur. Car il s'agit d'un texte merveilleux – au sens propre du terme : il crée un monde imaginaire, enchanté, à l'intérieur duquel tout ce qui se produit a les meilleures raisons de se produire, mais dont on ne peut guère parler de l'extérieur.

Prenons le passage suivant, par exemple, situé vers le milieu : «Toute une armée de Polygones venus combattre comme simples soldats fut anéantie jusqu'au dernier homme par une armée de Triangles. Les Cercles supérieurs en nombre – tandis que les Carrés et les Pentagones demeuraient neutres. Pire que tout, certains des Cercles les plus éminents furent victimes de la fureur conjugale. On ne compte pas moins de vingt-trois Cercles qui périrent au cours de disputes domestiques, pendant les trois années que dura le soulèvement.» Texte absurde si on prolonge de dans comme ça, sans préparation, mais parfaitement «naturel» si on le lit dans la continuité de l'œuvre.

Tel est l'exploit réalisé par Abbott. S'étant placé dans un monde à deux dimensions, *Flatland*, dont les habitants sont des figures géométriques, il réussit à vivre réellement, et à nous y faire vivre. Avec le plus grand sens pratique. Toutes les questions que vous pouvez vous poser sur la vie quotidienne (comment se dire bonjour ? comment reconnaître la classe sociale d'un interlocuteur ?) obtiennent des réponses sensées – logiques, pour tout dire.

Pays imaginaire, *Flatland* ? Oui... c'est-à-dire très sûr, très réel ! Le passage précédent ne laisse pas d'illusions : les mœurs, l'histoire, de *Flatland* ressemblent à ceux des hommes, et ne sont pas moins sanglants. Parfois pires : la misogynie de *Flatland* est impitoyable, définitive. Jusqu'à la question de l'euthanasie des êtres mal formés (en l'occurrence, les Polygones irréguliers), nos débats les plus dramatiques sont également ceux de *Flatland*. Mais bien malin

celui qui pourrait dire si les transpositions opérées par Abbott révèlent de sa part des positions conformistes (dans une certaine mesure, oui : sa misogynie semble réelle) ou d'anticonformistes (dans une certaine mesure, oui également). Doit-on lire *Flatland* comme une critique sociale, une attaque contre la lâcheté et la cruauté propre aux hommes de pouvoir, ou comme la constatation que ce qui est ne pourrait guère être autrement ? Doit-on lire *Flatland* comme une aimable tentative de vulgariser la notion géométrique de dimension ou, plus profondément, comme une critique de la logique, qui peut pousser jusqu'au bout des constructions parfaitement cohérentes, mais pourtant devenues insensées à force de s'éloigner du réel ?

A chaque lecteur sa lecture : Abbott a les ambiguïtés propres à la richesse. Car ce texte est merveilleux au sens propre du terme, mais aussi au sens banal.

Didier NORDON

Physique

La physique quantique

Étienne Klein. Éditions Flammarion, 1996.

L'«honnête homme» d'antan s'intéressait au microscopique, emblémisé par le ciron de Pascal ; aujourd'hui nous nous intéressons à l'infiniment petit, à la structure intime de la matière. Livres et articles de vulgarisation, rééditions commentées de textes des «pères fondateurs», articles, émissions de radio ou de télévision sont largement proposés aux non-spécialistes qui veulent comprendre. Peut-on encore faire œuvre originale de vulgarisation dans ce domaine ? Et peut-on le faire en 124 pages d'un livre de poche ? Étienne Klein répond brièvement à cette question.

Pourtant il fait d'abord craindre le pire : d'emblée il nous rappelle que la physique quantique n'est pas ce qu'il préfère à celui, plus habituel, de la mécanique (quantique) est, avec la relativité, une «théorie cadre» de notre époque, sur laquelle reposent presque toutes les branches de la physique. Elle s'appuie sur un formalisme mathématique aussi puissant qu'aride, impossible à transposer dans la langue commune ; délaissant le visuel et le sensible au profit du formel, cette théorie impose une rupture nette avec le «sens commun» au point qu'«en physique quantique, toutes les métaphores mènent à



«Fi, fi, je vous parle carrément !»

Dans la seconde partie de l'ouvrage («matières à débats»), c'est le problème du réel, puis certains aspects des rapports entre science et philosophie qui sont discutés. Le monde quantique, inséparable de son formalisme fortement mathématisé, échappe à l'intuition sensible, et «la physique quantique vient rappeler avec insistance que toute compréhension du monde suppose des stratégies de détournement». Une très belle analogie nous est proposée entre le monde quantique et l'univers complexe, mais si prenant et en fin de compte si «réel» qu'a créé dans son œuvre José Luis Borges : ne peut-on rapprocher une nouvelle comme *Le jardin aux sentiers qui bifurquent* du concept du temps relativiste et du problème de la mesure en physique quantique ? Un grand problème reste celui de la réalité non observée : E. Klein décrit les positions des physiciens vis-à-vis de ce problème : réalisme ou positivisme, agnosticisme philosophique («indifférence pour...»), ou volonté de modifier la théorie... ou d'en proposer une autre lecture ; particulièrement intéressantes apparaissent les «théories de la désérence» qui semblent offrir une solution au problème de la mesure et permettraient d'expliquer pourquoi les objets macroscopiques

ont presque tous un comportement classique. En attendant, écrit l'auteur, «vive le pluralisme!»

Les dix dernières pages, «physique et philosophie» sont d'une grande richesse ; nous nous bornerons à esquisser rapidement les problématiques présentées. Tout en montrant les difficultés du projet, l'auteur rappelle de ses vœux fervents une «hybridation» des cultures scientifique et philosophique. La difficulté est la rareté des «esprits capables de boire aux deux cultures». D'où la nécessité des rencontres ; et, heureusement, «on se parle. Après l'indifférence ou l'affrontement, vient l'heure du dialogue». Après être revenu sur les difficultés de la vulgarisation de la physique quantique, E. Klein s'élève contre les trop fréquentes tentatives de récupération qui invoquent la physique quantique pour couvrir une marchandise douteuse, un avatar récent étant le New Age où l'on aperçoit «la cybernétique planétaire s'entrelaçant avec la physique des particules, la non-chaos, les neurosciences, toutes ces disciplines étant baptisées au passage "nouvelles sciences"».

Fuyez le New Age et plongez-vous vite dans *La physique quantique*.

George BRAM

RÉFÉRENCES DES ILLUSTRATIONS

Couverture : American Museum of Natural History. P. 7 : Bruno Vacaro. Pp. 10 et 11 : doc. PLS. P. 12 : Christian Frétigny. P. 13 : George Giusti. P. 14 (haut) : Service d'aéronomie du CNRS (Verrières). P. 14 (bas) : doc. PLS. P. 15 : J.-P. Brun. P. 16 : V. Maurice et P. Marcus, CNRS-ENSEP. P. 17 : Yves Bérard. P. 21 : RICLAFÉ/Sipa Press. Pp. 21 et 22 : doc. PLS. P. 23 : S.-I. Shoda et PLS. P. 24 : NASA. P. 25 : M.-C. Lévy. P. 26 (photographie) : Don Wilson, West Stock. P. 26 (dessins) : Laurie Grace. P. 27 : doc. PLS. P. 28 : Ron Testa, Field Museum of Natural History. P. 29 (haut) : Department Library Services, American Museum of Natural History. P. 29 (bas) : Ron Testa, Field Museum of Natural History. Pp. 30, 31 et 32 (haut) : American Museum of Natural History. P. 32 (bas) : Don Hammett, American Museum of Natural History. P. 33 (haut) : American Museum of Natural History. P. 33 (bas) : Ron Testa, Field Museum of Natural History. Pp. 34 (haut) et 35 : John Weinstein, Field Museum of Natural History. P. 34 (bas) : American Museum of Natural History. Pp. 36 et 37 (haut) : N. Bardet. P. 37 (bas) : doc. PLS. P. 38 : N. Bardet. P. 39 : doc. PLS. Pp. 40 et 41 : Eric Buffetaut. P. 45 : Audra Geras. Pp. 46 et 48 : doc. PLS. P. 50 : Ethel Moustacchi. P. 53 (haut gauche) : Jean-Marie Dubois. P. 53 (haut droit) : doc. PLS. P. 53 (bas) : d'après... P. Thiel. P. 54 (bas) : doc. PLS. P. 56 : F. Faudot. P. 57 (gauche) : doc. PLS. P. 57 (droite) : Jean-Marie Dubois et PLS. P. 58 (gauche) : doc. PLS. P. 58 (droite) : Esther Belin-Ferré. P. 59 : Claire Berger. P. 61 (haut) : Thierry Bardinet. P. 61 (bas) : British Museum. Pp. 62 et 63 : Th. Bardinet. P. 64 : doc. PLS. P. 65 : Th. Bardinet. P. 66 : British Museum et PLS. Pp. 68 et 69 (gauche) : doc. PLS. P. 69 (droite) :

Pierre Audénis/IASBE. P. 70 : Alain Roques/NR. P. 71 : PLS - P. Audénis/IASBE. P. 72 (gauche) : Patrick Lorne/Jacana. P. 72 (droite) : P. 73 (gauche) : René Dulhosi/Jacana. P. 73 (droite) : P. Audénis/IASBE. Pp. 74 et 75 (dessin) : doc. PLS. P. 75 (photographie) : Roger Viollet. P. 76 (haut) : J.-L. Charmet. P. 76 (bas) : Roger Viollet. P. 77 : J.-L. Charmet. P. 78 : Musée de la Marine. P. 79 (haut) : Roger Viollet. P. 79 (bas) : document PLS. P. 82 : International Communication Agency, avec l'autorisation d'Emilio Segre Visual Archive. P. 83 (Planck) : American Institute of Physics, Emilio Segre Visual Archive. P. 83 (Einstein 1905) : Bettmann Archive. P. 83 (dessin) : Jared Schneidman. P. 83 (Einstein 1916) : UP/Bettmann. P. 84 (Schwarzschild) : Robert Bein, AIP Emilio Segre Visual Archive. P. 84 (Bose) : Max Planck Institute, avec l'autorisation d'AIP. P. 84 (Eddington) : UP/Bettmann. P. 84 (Pauli) : AIP Emilio Segre Visual Archive. P. 85 (gauche) : UP/Bettmann. P. 85 (milieu) : AIP Emilio Segre Visual Archive. P. 85 (droite) : UP/Bettmann. P. 86 (gauche) : Bettmann Archive. P. 86 (milieu) : Jared Schneidman. P. 86 (droite) : UP/Bettmann. P. 91 : KTB-Archiv. P. 92 : Johannes Dyster, KTB-Feldlabor. P. 93 : Manfred Neuber, KTB-Feldlabor. P. 94 : Fa. Fastman Christensen. P. 95 (haut) : Michael Simon et Holmuth Lohmann, Université de Münster. Pp. 95 (bas) et 96 : G. H. Schmann, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover. P. 97 : Volker Haak, GFZ Potsdam. Pp. 100 et 101 : Erik S. Lesser. Pp. 102 à 104 : Tomo Narashima. P. 106 : Johnny Johnson. P. 107 (haut) : Bryan Christie. P. 107 (bas) : J. Johnson. Pp. 108 et 109 : Giulio Cuccodoro. P. 110 : Marcel Bournérias. P. 111 : Anatolia Éditions.

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquet, Pascale Thiollier, Marion Aguttes. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Herviel. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Lavin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Jean-Louis Bataillon, Paloma Cabeza-Orcel, François Cornet, Bettina Debû, Paul Decaux, Jean Eisenstaedt, Marie-Thérèse Landousy, Claude Olivier, Pierre Teiffel.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of Editors : Michelle Press (Managing Editor), Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Margaret Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Satcha Neameck, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Huxley. Co-Chairman : Pierre Gercens. Executive Committee : John Moeling, Vincent Barger, Robert Biewen.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06. Tél. (0) 46 34 21 42. Téléc. LIBE N 202978F. Télécopieur 43 25 18 29.

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : M. Gulo - 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.