

Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Janvier 1999

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

La recherche
des météorites

Canada : \$ 8,75



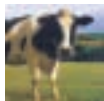
BLOC-NOTES

de Didier Nordon

5

TRIBUNE DES LECTEURS

6



JEU-CONCOURS

Problème bruxellois

par Pierre Tougne

8



POINT DE VUE

Grossesse et justice

par Dominique Cabrol

9

SCIENCE ET ÉCONOMIE

Qui va payer nos retraites?

par Bernard Guerrien et Sophie Jallais

11

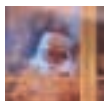


PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Les physiciens japonais

par Laurie Brown et Yoichiro Nambu

12



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Recettes de Noël

par Hervé This

21



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

22

■ Mes mains ont la parole ■ Le titanosaur ovipare
■ La puce et l'aveugle ■ Électricité contre douleurs
■ Du mou au dur ■ Cent millions de débris sous la mer ■ État de
veille prolongé ■ D'Afrique en Asie ■ Cultures de cellules souches
embryonnaires ■ Les nouveaux Noé



LOGIQUE ET CALCUL

Négligeable, mais troublant

par Jean-Paul Delahaye

100



VISIONS MATHÉMATIQUES

Bulles de savants

par Ian Stewart

106



L'EXPÉRIENCE DU MOIS

L'anagyre

par Janick Simeray

108



ANALYSES DE LIVRES

110

■ Oiseaux, merveilleux oiseaux. Les dialogues du
ciel et de la vie, de Hubert Reeves
■ Les lettres de Tanis, la découverte des trésors royaux, de
Pierre Montet
■ RedShift 3, CD-Rom Windows 95 et Macintosh
■ Cerveau de soi, cerveau de l'autre, de Pierre Buser

Le jour où le sable s'enflamma

34

par Jeffrey Wynn
et Eugene Shoemaker

Une météorite a creusé trois
cratères au milieu du désert.

**Une mystérieuse météorite
groenlandaise**

42

par Wayt Gibbs

Comment on chasse
la météorite au Groenland.

**L'origine
des maladies**

50

par Randolph Nesse
et George Williams

Les principes de l'évolution
par la sélection naturelle
expliquent les poussées de
fièvre, les douleurs ou encore
les nausées des femmes
enceintes.



**L'instructive histoire
des noms de familles**

58

par Jean-Marie Legay
et Michel Vernay

La transmission des noms
de famille obéit à des lois
génétiques. Leur histoire ren-
seigne sur l'Histoire des
hommes, sur leur origine géo-
graphique et sociale, ainsi que
sur les migrations.



L'asymétrie de la matière

66

par Helen Quinn
et Michael Witherell

Dans quelques semaines, de nouveaux accélérateurs de particules rechercheront les violations d'une symétrie fondamentale de la nature et repousseront ainsi les limites de la physique.

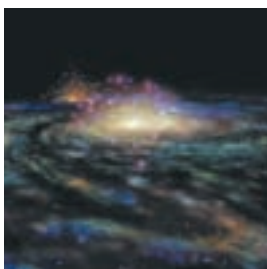


Derrière la Voie lactée

74

par Renée Kraan-Korteweg
et Ofer Lahav

Près d'un cinquième de l'Univers échappe à l'observation, dissimulé par les étoiles et par les poussières de la Voie lactée. Depuis quelques années, les astronomes voient à travers cette matière.



Les choix alimentaires des primates

84

par Bruno Simmen
et Claude-Marcel Hladik

La comparaison des populations de primates et des populations humaines révèle le fondement biologique des comportements alimentaires de notre espèce.

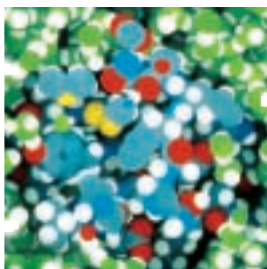


Les molécules biologiques dans l'eau

92

par Mark Gerstein
et Michael Levitt

Les modélisations par ordinateur montrent l'influence de l'eau sur la structure et la dynamique des molécules biologiques.



Le contraste japonais

À mon âge, se lamentait César avant de franchir le Rubicon, Alexandre avait conquis l'Asie... César avait 30 ans.

Les jeunes physiciens japonais piaffaient aussi d'impatience intellectuelle : à leur âge, les physiciens occidentaux, De Broglie, Einstein, Heisenberg, Dirac, Pauli et nombre d'autres avaient fait progresser la toute nouvelle mécanique quantique. Les étudiants japonais étaient réduits à copier les cours de ces jeunes maîtres occidentaux qu'ils ne comprenaient pas bien (voir *Les physiciens japonais pendant la guerre*, page 12). En dépit de circonstances que l'on ne pouvait imaginer plus éprouvantes – crise économique et Seconde Guerre mondiale –, la réussite allait récompenser l'inventivité japonaise des années 1930 et 1940. Yukawa et Tomonaga recevront le prix Nobel, le premier pour la découverte du méson, la particule médiatrice des interactions entre un proton et un neutron à l'intérieur du noyau ; le second pour la formulation de l'électrodynamique quantique.

Les progrès dans l'élaboration de la mécanique quantique furent le fruit d'une collaboration internationale. Avec le recul du temps, il est patent que les physiciens japonais précédèrent souvent les Occidentaux : l'équivalence des résultats obtenus ne fut démontrée que plusieurs années après la guerre. À cette époque, les ténors japonais, puis leurs étudiants, furent invités aux États-Unis : ils n'y furent ni heureux dans cet exil «paradisique», ni particulièrement productifs. Le souvenir de l'holocauste atomique était trop présent dans les esprits, et les modes de pensée trop différents.

L'examen des participants aux congrès Solvay, les hauts lieux des rencontres internationales de l'époque, suscite des interrogations. Il n'est pas de physicien participant qui n'ait fait progresser la physique et dont le nom ne soit passé à la postérité. Les physiciens de l'époque étaient-ils plus doués que les physiciens actuels ? Les problèmes posés étaient-ils justes du bon niveau pour être solubles ? N'est-il pas étonnant que certains problèmes cèdent si facilement et soient simultanément résolus partout dans le monde, alors que d'autres, comme la turbulence, résistent à tous les efforts ? Comment les physiciens choisissent-ils les problèmes qu'ils pensent résoudre ?

Philippe BOULANGER

Spectre ambigu

Donner un titre à une conférence, c'est tout un art... Le titre doit être assez explicite pour ne pas décourager les amateurs, mais pas trop pour ne pas déflorer le sujet. Un titre ambigu ratisse large – du point de vue de l'orateur, c'est bon ; mais si la conférence ne répond pas à leurs attentes, les auditeurs risquent d'être déçus et de le manifester – du point de vue de l'orateur, c'est mauvais.

Tout cela pour dire mon admiration infinie envers celui qui a prononcé une conférence intitulée : «Sur les transformations qui conservent le spectre.» Quelle trouvaille, ce titre ! La foule qu'il a dû attirer ! «Sur les transformations qui conservent le spectre» est un alexandrin d'une parfaite facture classique, plein de poésie et de mystère. Vu son léger hermétisme, les littéraires ont dû se précipiter en s'attendant à une conférence sur l'œuvre de Mallarmé. Mais les adeptes de l'occultisme se sont sûrement précipités, eux aussi, espérant apprendre à réaliser la transmigration des âmes, exploit auquel ils attachent quelque importance. Les enfants ont cru qu'on leur raconterait des histoires de fantômes pour faire peur comme ils aiment, et sont donc venus nombreux. Les physiciens, qui ont coutume de donner un sens savant à des termes usuels, ont marmonné : «Spectre ? C'est un mot de

chez nous, ça. Allons-y voir.» A quoi les mathématiciens, qui ont coutume de donner un sens savant à des termes usuels, ont répondu en écho : «Spectre ? C'est un mot de chez nous, ça. Allons-y voir.»

Alors, à qui s'adressait la conférence ? Je vous laisse deviner. Une indication pour vous aider : je n'y suis pas allé, et je suis mathématicien. «La crédulité de ceux qui croient aux fantômes et la crédulité de ceux qui n'y croient pas me laissent pantois». (Louis Scutenaire, *Mes Inscriptions*, 1945-1963, rééd. Allia, 1984, p. 249.)

L'incompréhensible imbitable

L'image qui a présidé à la formation du mot «imbitable» n'est pas, je crois, le deviner, du meilleur goût. Ce mot est typique de l'argot des étudiants, et ceux-ci, travaillés par «la chose», la mettent à toutes les sauces, y compris la caractérisation des cours abscons, que nul ne parvient à pénétrer.

A force d'être utilisé dans le contexte scolaire puis, par extension, dans le domaine intellectuel, le mot imbitable est en train de faire oublier son origine vulgaire. Pour un peu, il deviendrait plus distingué que «incompréhensible». En tous cas, ces deux termes ne sont pas interchangeables. On peut dire d'une conférence qu'elle est imbitable ou qu'elle est

incompréhensible – c'est au choix. Mais on ne peut guère dire que, dans la vie, tel individu se comporte de façon imbitable. Là, le mot incompréhensible convient mieux. Je crois même percevoir une nuance entre les expressions «une théorie imbitable» et «une théorie incompréhensible». La condamnation contenue dans la première me semble plus sévère, sans appel.

Une légère extrapolation de la tendance actuelle permet de prévoir qu'en l'an 2000 le mot imbitable sera officiel. Les prudes et les victoriens l'utiliseront sans hésiter, seuls de rares érudits sauront encore d'où il provient. Les auteurs brillants pondront des théories sur l'imbitable, dont on causera dans les salons. Quant au mot incompréhensible, tombé en désuétude, il sera devenu lui-même incompréhensible.

Spatio, astro ou cosmo ?

Certaines professions rehaussent leur prestige : on fut paysan, cultivateur, agriculteur, aujourd'hui exploitant agricole. Demain, sans doute, on sera gestionnaire territorial spécialisé.

Il existe d'autres métiers qui multiplient les façons dont on peut les désigner. Ainsi, comment s'appellent ceux qui explorent l'espace intersidéral ? Des astronautes ? Des spationautes ? Des cosmonautes ? L'usage hésite. Trois termes différents, donc, tous ronflants, pour désigner une profession comptant à peine quelques centaines de membres de par le monde : quel luxe ! Quand on est trop remuant pour rester sur terre comme tout le monde, on est trop remuant pour rester attaché à une dénomination fixe.

Pour un parfumeur, quelle enseigne...

π ... Ce symbole vous dit quelque chose ? À moi aussi, mais quoi ?... Ah, ça y est, cela me revient : π est le nom d'une eau de toilette récemment lancée par un parfumeur. Voilà que me revient aussi le slogan publicitaire qui l'accompagne : «Un peu plus loin que l'infini.» Là, arrêtons-nous pour rêver à un endroit que même des gens aussi valeureux que les mathématiciens ne peuvent visiter. Les mathématiciens savent construire des infinis de plus en plus grands ; je garde un souvenir ému de les avoir vus faire. Mais aller juste «un peu plus loin que l'infini», contempler le paysage qui se présente aux environs de l'infini plus epsilon, cela dépasse leurs possibilités. Ainsi les parfums sont-ils plus puissants que les mathématiques.

Or ces dernières sont incapables d'éclaircir certains mystères des décimales de π . Les parfumeurs devraient voler au secours des mathématiciens : qu'ils leur fournissent autant de flacons d'eau de toilette que π a de chiffres après la virgule ! Les mathématiciens les humeront un à un, et l'inspiration finira bien par venir. Les Grecs, incontournables comme toujours, avaient prévu la situation : «Si le monde était fumée, nous le connaîtrions par les narines» (Héraclite).

N'étant pas parfumeur, je n'imagine pas quelles subtiles considérations ont bien pu conduire à déterminer le sexe de π . Mais le fait est là : π désigne une eau de toilette pour hommes. Or π a des rivaux au sein des mathématiques, en particulier la constante e , presque aussi célèbre, et qui pose elle aussi des difficultés théoriques. Par chance, e se trouve marquer le féminin en français. Vite, alors, qu'un parfumeur rival du premier crée un parfum de femme baptisé e . Il suffira ensuite de se pencher sur l'épaule d'une femme et d'en respirer l'effluve tendre pour connaître tous les secrets... du nombre e .

Le complexe de Crésus

Un nommé Wendel Williamson tue deux personnes, puis exige 500 000 dollars. Est-ce un tueur à gages ? Nullement. C'est un étudiant en droit qui, lors d'une bouffée de folie, a tiré sur deux personnes au hasard dans la rue. Cela se passait en Caroline du Nord, en janvier 1995. Actuellement interné, W. Williamson s'est retourné contre son ancien psychiatre. Reconnu responsable, celui-ci a été condamné à verser 500 000 dollars de dédommagement au malheureux fou. Le psychiatre a fait appel : il n'a donc pas perdu confiance en la justice de son pays !

Amateurs et autodidactes

Dans son éditorial intitulé *Comment apprécier les autodidactes?* (voir *Pour la Science*, septembre 1998), Philippe Boulanger semble confondre «autodidacte» et «amateur». Ces termes ne sont pourtant pas synonymes. L'autodidacte acquiert tout ou partie de son bagage culturel ou professionnel seul, en dehors des circuits pédagogiques classiques. Dans de rares cas, le fait d'être autodidacte n'empêche pas une brillante carrière (Pierre Bérégovoy en était un parfait exemple). Les habitudes sociales rendent toutefois ces parcours difficiles, d'autant que les autodidactes sont souvent issus d'une classe sociale faible. En France, compte surtout le type d'école dont on est issu.

Ceci est vrai dans le domaine technique et industriel. Et dans le domaine scientifique? Du fait des modalités d'accès aux organismes de recherche, les vrais autodidactes n'ont presque aucune chance de devenir des scientifiques professionnels, même si le système se libéralise peu à peu, en particulier pour le recrutement de nombreux DESS, voire de DEA. Des autodidactes diplômés peuvent éventuellement prétendre à des postes scientifiques. Mais ce cas de figure est rarissime.

Si l'autodidacte en science ne désire pas ou ne peut pas obtenir une place dans un organisme de recherche, il lui reste la possibilité de faire de la recherche en amateur. Mais tous les scientifiques amateurs ne sont pas de vrais autodidactes : tel médecin passionné par la botanique ou tel ingénieur informaticien s'adonnant à l'astronomie ont acquis l'essentiel de leur bagage intellectuel en suivant une formation classique ; ces personnes ne sont autodidactes que pour un petit fragment de leurs connaissances. De plus, leur formation initiale leur assure une bonne connaissance des différentes techniques de la recherche scientifique.

La pratique scientifique réclame des équipements de plus en plus coûteux. Les amateurs ne peuvent espérer avoir une activité significative que dans les domaines où ils peuvent financer leur propre équipement. C'est pourquoi certaines disciplines, comme la physique nucléaire ou la biologie moléculaire, ne possèdent pas d'amateurs. En revanche aujourd'hui, à l'heure où les budgets de recherche dans le domaine de l'environnement et de la connaissance de la biodiversité sont dérisoires, surtout compte tenu de la vitesse de destruction des milieux naturels, les amateurs sont plus que jamais

nécessaires. Ils peuvent réaliser des études de terrain, tels des suivis de population, que les scientifiques ne peuvent pas toujours assurer.

Valérie CHANSIGAUD, Orléans

Conscience invisible

Pour Georges Chapouthier, les travaux de visualisation de l'activité cérébrale «apportent clairement de l'eau au moulin de la thèse moniste matérialiste», pour laquelle l'esprit est une propriété du cerveau (voir *Analyse de livres*, *Pour la Science*, octobre 1998). Or, on peut aller aussi loin que l'on veut dans l'étude des aspects matériels de l'activité cérébrale, on butera toujours sur le fait que la conscience, même reliée à une activité matérielle, n'est pas elle-même matérielle. Lorsque le matérialiste pense qu'il a raison, ce sentiment intense de certitude, intérieur, subjectif, est-il de la matière?

Comme le souligne le physicien anglais Roger Penrose : «La conscience fait partie de notre Univers. Toute théorie physique qui ne lui réserve pas une place appropriée est donc fondamentalement incapable de fournir une description valable du monde.» On ne la tiendrait donc pour négligeable qu'en vertu d'un préjugé métaphysique : on tiendrait pour rien ce qui n'est pas matière, cette matière qui, comme le souligne malicieusement Lucien Israël, ne reçoit son statut de matière que par une opération de l'esprit.

Pierre JANIN, Charbonnières

Monnaie et richesse

Dans *Le levier de la politique monétaire*, Bernard Guerrien et Sophie Jallais émettent l'idée que les banques «créent de la monnaie lorsqu'elles acceptent les demandes de crédit» (voir *Pour la Science*, novembre 1998). Cette idée est choquante : le demandeur de crédit n'a encore créé aucune richesse au moment où il fait sa demande auprès de la banque, puisqu'il compte sur le crédit pour créer cette richesse. Il y aurait donc création de monnaie à partir d'une richesse qui n'existe pas encore. Cette prise de risque paraît inconcevable et totalement affolante si l'on est attaché à la vieille idée selon laquelle il n'y a création de monnaie que quand il y a une richesse déjà présente sous une forme concrète.

Une conséquence «philosophique» de cette conception de la monnaie est qu'un

pays, une ville ou même un individu peut s'enrichir et prospérer même s'il ne dispose pas initialement de richesses «dures» (matières premières...). Son développement économique dépend ainsi grandement de ses capacités à prendre des risques, à innover et à parier sur les richesses qui seront créées dans l'avenir.

Marouane BERRADA, Créteil

Réponse de Bernard Guerrien et Sophie Jallais

La création de monnaie par une banque suite à une demande de crédit semble choquante : la banque donne un carnet de chèques. Pourquoi n'est-ce pas aussi choquant quand la banque centrale donne ces morceaux de papier sans valeur intrinsèque que sont les billets de banque? Avec le temps, la monnaie s'est dématérialisée : on est passé du sel, ou des têtes de bétail, à l'or ou l'argent, puis aux billets, aux chèques et, enfin, aux cartes de paiement. Le point essentiel, c'est que la monnaie n'est pas de la richesse, mais qu'elle en facilite la création.

Celui qui demande un crédit le fait pour une production nouvelle : avec le crédit, il pourra acheter des matières premières existantes (ou dont il suscitera la production), et il récupérera sa mise avec sa nouvelle production qui représente, elle, une richesse créée effectivement, et dont le banquier prélèvera une part, par exemple en faisant payer un taux d'intérêt. Finalement, le crédit permet la mise en relation implicite des entreprises et des hommes qui s'échangeront des chèques, bouts de papier gagés par la production future qui résultera de ces relations.

Contraintes fertiles

Jean Paul Delahaye demande s'il existe des programmes informatiques qui soient des palindromes (voir *Écritures sous contraintes*, *Pour la Science*, novembre 1998). Quelques astuces permettent l'écriture de programmes palindromiques. Les choses sont faciles avec les langages interprétés et se compliquent avec les langages compilés. Il est cependant plus difficile d'écrire des programmes que des textes palindromiques, ceci à cause de règles syntaxiques plus fortes.

Le programme palindromique le plus court est un programme vide, qui ne contient aucune instruction ! Ce programme a de plus les propriétés d'être un programme qui se reproduit lui-même et d'être multi-langage.

Un moyen simple de faire un programme qui soit un palindrome est d'utiliser judicieu-

sement les commentaires. Voici un exemple en perl :

```
print 'coucou';#;'uocuo' tnrp.
Un exemple en C :
```

```
/**/main(){exit(0);/*/;}0(tixe){niam/**/
Les commentaires sont plus intéressants s'ils peuvent se poursuivre sur plusieurs lignes.
Un autre exemple en C (commence et finit par une ligne vide pour qu'il soit accepté par tous les compilateurs) :
```

```
/* */
#include <stdio.h>
int main() { printf("Hello world\n"); return
0; }
```

```
/* */
;0 nruter ;>>n\dlrow olleH>)ftnrp { }(niam
tni
```

```
>h.oidts< edulcni#
/* */
```

Avec un langage interprété ligne par ligne sans vérification syntaxique préalable, l'utilisation de l'instruction de sortie permet simplement l'écriture de programmes palindromiques. Un exemple en Bourne-Shell (de plus ce programme se reproduit lui-même) :

```
#!/bin/sh
cat $0
exit 0
0 tixe
0$ tac
hs/nib/!#
```

Avec les langages compilés, une contrainte supplémentaire est la nécessité de la correction syntaxique. Cependant certains langages permettent de marquer une fin et d'ignorer ce qui suit cette fin. Les programmes qui se reproduisent eux-mêmes génèrent leur code source quand on les exécute. Avec les remarques précédentes, il est facile de transformer en un palindrome un programme interprété qui se génère lui-même. Il suffit de rajouter une instruction de sortie puis une copie à l'envers du programme.

Christian JOBIC, Paris

Aux lecteurs qui souhaiteraient initier leurs jeunes enfants aux joies de l'écriture sous contrainte, je signale les ouvrages de Yak Rivais, publiés par l'École des loisirs. Dans *Les contes du miroir*, il réécrit des contes classiques sous des contraintes variées. *Le métro méPASTro* rassemble des exercices de style à la Queneau sur un voyage dans le métro. Dans *La MarmitEnchantée*, chaque phrase commence par la dernière lettre de la phrase précédente. *Moi pas grand, mais moi malin* ne contient pas la lettre e. *Le rhinocérossignol* et *Le coca-koala*, dictionnaire sympathique et *Petit homme et les princesses*, où chaque per-

sonnage a une façon particulière de parler (y compris un oiseau qui parle en notes de musique, bien entendu), ont ma préférence. Souvent, l'histoire est suivie d'un supplément expliquant aux enfants les règles d'écriture choisies et les invitant à jouer à suivre ces règles.

Claire RAR de MAZANCOURT, Paris

Mesure du réchauffement

Certains indices incitent à penser que la Terre se réchauffe. Néanmoins, les variations autour des «températures normales pour la saison» sont souvent importantes, à tel point que le commun des mortels peut-être tenté de douter. Pourrait-on lever ce doute en lissant les effets des variations ponctuelles ? Il suffirait pour cela de placer des détecteurs de température dans le sol, à une profondeur telle que l'inertie thermique du sol absorbe les variations parasites.

Roland LOQUET, Seynod

Réponse de Jérôme Chappellaz

Votre idée a été considérée par la communauté scientifique depuis de nombreuses années. Quand il s'agit de déterminer si oui ou non il y a une tendance dans la température de la Terre, on se sert effectivement d'une batterie de méthodes, et pas seulement des enregistrements de température de surface sur les continents et les océans. Pour en reprendre les grandes lignes, de nombreuses équipes ont utilisé des trous de forage dans différents points du Globe pour mesurer le profil de température, et à partir d'un modèle de diffusion thermique, de remonter à l'historique de la température en surface. Cette méthode permet de lisser énormément le signal d'entrée, au point que les signaux saisonniers disparaissent. Les mesures réalisées au Canada sont en excellent accord avec les mesures de surface, et montrent un réchauffement depuis le début du siècle. Il en est de même en Australie, en France, en Nouvelle-Zélande et en Sibérie, mais dans ce dernier cas la mesure est entachée d'une incertitude liée à l'évolution du couvert végétal en surface (changement d'albedo et de caractéristiques thermiques du sol).

On dispose d'autres méthodes comme les radiosondages et les mesures satellitaires de température dans la haute troposphère et la basse stratosphère, deux régions où une augmentation des teneurs en gaz à effet de serre devrait entraîner un refroidissement

important. C'est effectivement ce qui est observé, mais les séries de mesures sont nécessairement courtes. Il a été proposé aussi de déterminer l'évolution de la température moyenne des océans en émettant un signal sonore par exemple en Nouvelle-Zélande, et en l'enregistrant par exemple en Angleterre, après que l'onde ait traversé le Pacifique et l'Atlantique. Mais, à ma connaissance, cette expérience n'a pas encore été tentée.

J. C. Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement du CNRS

Vitraux visqueux, ou élastiques ?

L'article *Vitraux visqueux* (voir *Pour la Science*, octobre 1998) évoque l'aptitude du verre à se déformer en phase élastique et à reprendre sa forme originelle. Mais une plaque de verre disposée verticalement devrait s'épaissir dans sa partie inférieure, sous le seul effet de son propre poids, toute considération d'écoulement étant exclue. Par ailleurs, le comportement d'un corps ne dépend-t-il pas aussi de l'échelle de temps auquel on l'observe ?

Michel THALY, Saint-Malo

Réponse de René Gy

Certes, une plaque de verre posée verticalement devrait s'épaissir de manière irréversible dans sa partie inférieure sous l'effet de son propre poids, mais cet épaississement est si faible qu'on ne peut le mesurer. Donc tout est élastique, mais à des degrés divers. De même, le caractère solide ou liquide d'un corps n'est pas une propriété intrinsèque, mais dépend de l'échelle de temps : selon que l'observateur est patient ou pressé, le caractère solide ou liquide apparaît. Comme le dit Deborah dans la Bible : «Les montagnes s'écoulent devant la face de l'éternel.» À des échelles de temps comparables à l'âge de l'Univers, le verre s'écoule (ou flue). À l'échelle de temps de quelques siècles, les glaciers s'écoulent comme un liquide. Inversement, dans un liquide, des ondes de cisaillement très brèves se propagent comme dans un solide.

R.G., Société Saint-Gobain Recherche

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

JEU-CONCOURS N° 55

PIERRE TOUGNE

Problème bruxellois

On a posé la question suivante à un technocrate de Bruxelles : si un paysan nourrit 25 vaches pendant 4 jours sur un pré de 20 ares et 27 vaches pendant 5 jours sur un pré de 24 ares, quelle doit être la surface minimum du pré pour nourrir 100 vaches pendant 16 jours ? On précise que l'herbe est partout à la même hauteur au moment où le paysan amène le troupeau dans les prés, et qu'elle croît partout à la même vitesse. Des mauvaises langues racontent qu'il a répondu très (trop) vite une bêtise !

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les auteurs des réponses exactes, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

REPONSE AU JEU-CONCOURS N° 53

Deux solutions ont été proposées par les lecteurs presque à égalité. La première part de la remarque que $1/3 = 1/4 + 1/16 + 1/64 + \dots + 1/4^n + \dots$. D'où $a^{1/3} = a^{1/4} \times a^{1/64} \times a^{1/16} \dots$ qui conduit à l'algorithme : on extrait deux fois la racine du nombre que l'on met en mémoire puis à nouveau deux extractions de racine, le résultat étant multiplié à la mémoire et ainsi de suite jusqu'à ce que la mémoire atteigne la précision désirée.

La deuxième part de l'égalité $x^3 = a$, où x est la racine cubique recherchée que l'on réécrit $x^4 = ax$ ou encore $x = \sqrt[4]{ax}$ d'où l'idée d'itérer la relation $x_n = \sqrt[4]{ax_{n-1}}$ dont il n'est pas difficile (mais un peu long) de montrer qu'elle converge vers la racine cubique cherchée. L'algorithme est alors le suivant : on part d'une valeur initiale de x (1 par exemple) que l'on multiplie par a , puis on extrait deux fois la racine, le résultat est de nouveau multiplié par a , puis on extrait deux fois la racine et ainsi de suite jusqu'à ce que la précision désirée soit atteinte.

Les deux méthodes ont la même vitesse de convergence, ainsi la racine cubique de 10 avec 8 décimales exactes est obtenue en 13 itérations. Cependant la seconde a ma préférence, car elle évite une multiplication en mémoire. D'autre part, la première ne se généralise simplement que pour les racines $2^k - 1$ ième, alors que la seconde est plus versatile.



Accouchement et justice

DOMINIQUE CABROL

La crainte des poursuites pénales crée une pénurie de gynécologues-obstétriciens.

« Si un médecin a guéri une tumeur à l'œil d'un homme libre, il recevra dix shékels d'argent. Si le médecin a ouvert une tumeur à l'œil d'un homme et que celui-ci a perdu son œil, les mains du médecin seront tranchées. » Cet extrait du Code d'Hammourabi montre que, depuis Babylone au moins, la médecine est prise entre l'argent et la justice. Aujourd'hui, la dérive judiciaire crée une crise en gynécologie-obstétrique. Les statistiques sont alarmantes : les postes d'internes en gynécologie et obstétrique ne sont pas tous pourvus, alors que le nombre de nouveaux spécialistes formés chaque année est le plus faible de toutes les spécialités médicales. On sait qu'à partir de 2003, les départs seront deux fois plus nombreux que les installations.

Une enquête récente du Syndicat des gynécologues-obstétriciens demandait aux praticiens s'ils étaient satisfaits de leur exercice : 47 pour cent des personnes interrogées se déclaraient insatisfaites. Ceux qui pratiquent l'obstétrique sont plus insatisfaits que ceux qui pratiquent la gynécologie, et ce d'autant plus que le nombre d'accouchements effectués augmente.

Pourquoi cette crise ? Certes, les gynécologues-obstétriciens sont les seuls dont les revenus aient baissé, entre 1990 et 1995, et les spécialistes qui exercent une activité libérale à plein temps ont des frais que nombre de leurs confrères d'autres spécialités n'ont pas, mais l'enquête effectuée révèle que les véritables causes sont que cette profession est beaucoup plus fatigante que bien d'autres spécialités médicales (gardes de nuit, astreintes...) ; qu'elle est stressante (un accouchement peut, très rapidement, devenir dramatique) ; que les relations avec l'administration et les organismes sociaux sont tendues ; et, surtout, que la crainte de poursuites médico-légales prédomine.

Quel est cette crainte ? Pourquoi s'accroît-elle ? En moyenne, un gynécologue-obstétricien fait face à trois plaintes en justice, au cours de sa carrière. De toutes les spécialités chirurgicales, c'est dans

les maternités (publiques ou privées) que surviennent les accidents déclarés de cause médicale les plus nombreux et les plus graves. À mesure que les plaintes s'accumulent, les primes d'assurance augmentent. Pis encore, l'immense majorité des praticiens poursuivis n'a pas fauté et se considère injustement accusée : beaucoup le supportent mal.

Le public, toutefois, perçoit mal le risque associé à un accouchement, et il tolère bien moins les accidents en maternité que dans les services de chirurgie générale : quand une personne entre dans un service de chirurgie parce qu'elle souffre d'une plaie de l'abdomen, le malade et ses proches admettent que le malade est dans un état grave, et ils sont reconnaissants qu'on le sauve ; en revanche, une femme qui perd son enfant à l'accouchement ou un mari qui perd sa femme supportent mal ces décès, qui frappent parfois des individus en bonne santé.

Les gynécologues-obstétriciens qui encourent les risques médico-légaux les plus importants sont les praticiens des petites structures, qui souffrent de plus en plus de la baisse de la démographie médicale. Aujourd'hui les grandes maternités ressentent moins la pression médico-légale, mais la situation se dégradera si les postes d'internes ne sont plus pourvus : les praticiens subiront une charge de travail croissante, excessive, qui les conduira à davantage d'accidents (une étude récente, sur des simulateurs opératoires, vient de montrer que les chirurgiens fatigués font plus de fautes opératoires).

Quelles solutions envisager ? On ne peut pas simplement augmenter le nombre de postes d'internes, puisqu'ils ne sont pas pourvus. Augmenter les honoraires et les salaires ? C'est la solution retenue aux États-Unis, où la profession de gynécologue-obstétricien est extrêmement bien rémunérée, parce que les honoraires tiennent maintenant compte des risques de plaintes légales, mais en France, cette évolution n'est sans doute pas envisageable.

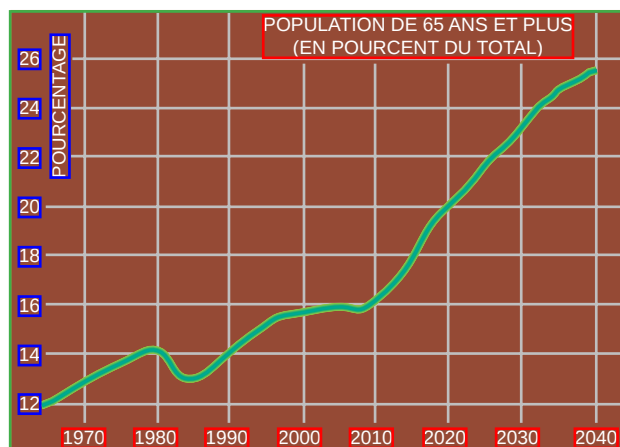
J'imagine trois groupes de solutions plus réalistes ou mieux adaptées à notre contexte sociologique. Premièrement, je suis en faveur d'une loi qui permettrait l'indemnisation de l'aléa thérapeutique. Aujourd'hui, une femme ou sa famille ne sont indemnisés que si la faute du médecin est prouvée ; d'où des enquêtes pénibles et âpres. Ne serait-il pas judicieux que les patients victimes d'une complication soient automatiquement indemnisés par la collectivité, pourvu que l'administration, et non la justice, ait constaté qu'il n'y a pas eu de faute médicale ? Cette mesure aurait également l'avantage de montrer au public que le risque zéro n'existe pas.

Deuxièmement, nous devons améliorer le cadre des expertises. Aujourd'hui les magistrats saisis de plainte choisissent un spécialiste, qui fait une enquête et produit une conclusion. La procédure a ses faiblesses, l'expert n'ayant pas toujours l'expérience pratique du domaine concerné. Ne serait-il pas préférable que les magistrats disposent d'une liste d'experts accrédités par leurs pairs, c'est-à-dire reconnus par le Collège national des gynécologues-obstétriciens ? Une autre possibilité serait l'obligation, pour les magistrats, de demander l'avis d'un collège d'experts ; on éviterait ainsi les contre-expertises et on améliorerait la qualité des avis.

Troisièmement, je crois que nous devons faire mieux connaître aux magistrats les contraintes de la gynécologie-obstétrique, tout en informant les médecins des méthodes de la magistrature.

Les gynécologues-obstétriciens sont aujourd'hui coincés entre le juge, d'un côté, et les caisses sociales, qui ont en vue les économies de santé, de l'autre. Prenons garde à ne pas restreindre excessivement les crédits, à ne pas étrangler la profession : les accidents seraient une sanction rapide.

Dominique CABROL est professeur des Universités, praticien hospitalier à la Maternité de Port-Royal, à Paris.



Qui va payer nos retraites ?

BERNARD GUERRIEN • SOPHIE JALLAIS

Capitalisation ou répartition, ce sont toujours les actifs d'«aujourd'hui» qui font vivre les retraités d'«aujourd'hui».

Le débat sur les vertus et les défauts des deux systèmes de retraite les plus répandus – celui dit «de répartition» (dominant en France) et celui dit de «capitalisation» (plus important aux États-Unis, avec les fonds de pension) – est renforcé par l'évolution démographique : baisse de la natalité et allongement de la durée de vie.

La diminution du nombre d'actifs par retraité suscite l'inquiétude : le système par répartition, où les actifs paient pour les retraités, ne serait-il plus viable ? Faudrait-il adopter le principe de la capitalisation où, comme l'écureuil, chacun épargne pour sa retraite et organise son propre avenir. L'argument semble imparable, mais il est trompeur, car il ne règle en rien un problème patent : si la tendance démographique se maintient, il y aura plus de retraités pour chaque actif, ceux-ci faisant vivre ceux-là.

LES ACTIFS FONT VIVRE LES RETRAITÉS

Que les actifs cotisent ou capitalisent en vue de leur retraite, ils ne consomment pas une partie de leur revenu. Cette partie est soit consommée par quelqu'un d'autre, soit investie (achat de machines, etc.) et elle servira à une production future (croissante ou pas). Si l'on ne prend pas en compte, pour le moment, l'investissement, la situation est simple : la production est le fait des actifs, et elle est consommée par les actifs et par les inactifs. Supposons que ceux-ci se réduisent aux retraités (ce qui est loin d'être le cas : enfants et chômeurs ne sont pas une fraction négligeable de la population !) et que tout le monde ait le même niveau de consommation. Aujourd'hui, avec 7 actifs pour 3 inactifs, les actifs donnent 30 pour cent de ce qu'ils produisent aux inactifs. Si, demain, il y a seulement 5 actifs pour 5 inactifs, alors chaque actif donnera la moitié de ce qu'il produit.

On peut s'interroger alors sur le partage du produit entre actifs et inactifs : la répartition n'est pas nécessairement égalitaire. On peut imaginer que les actifs d'une période gardent tout le produit pour eux (et laissent donc les inactifs mourir de faim), puis modifient la règle du jeu lorsqu'ils deviennent eux-mêmes inactifs (devenus majoritaires, ils peuvent exiger une part conséquente du produit).

RÉPARTITION OU CAPITALISATION ?

En France, le partage se fait par répartition, en prélevant sur le revenu des actifs. Ce pourcentage augmente lorsque la part des actifs diminue dans la population ; dans l'exemple donné plus haut, il passe de 30 pour cent à 50 pour cent. Ce qui est présenté comme «tout à fait insupportable». Peut-être. Cependant, et c'est là que le bât blesse, on voudrait nous faire croire que le problème est dû au mode de partage adopté, la faute étant au système par répartition et aux cotisations de plus en plus exorbitantes que vont devoir payer les actifs. D'où la «solution» : passer à un système par capitalisation où chacun épargnerait pour sa propre retraite.

Absurde ! Capitalisation ou pas capitalisation, s'il y a (relativement) moins d'actifs dans le futur, ils devront produire pour tous et donner une part plus grande du produit aux inactifs, et donc aux retraités. Ce «don» peut avoir lieu à travers une cotisation obligatoire ou par un versement «volontaire» à un fonds de pension. La seule différence réside dans le caractère volontaire du versement.

SELON QUE VOUS SEREZ PUISSANTS OU MISÉRABLES

Supposons que quelqu'un dispose de revenus confortables qui lui permettent d'épargner. Il ne va pas constituer des stocks de noisettes, comme l'écureuil symbolique,

mais soit investir en achetant, par exemple, des actions, c'est-à-dire des parts d'entreprises, soit placer son argent dans un «fonds de pension», qui, lui-même, investira. Plus tard, quand il deviendra inactif, il utilisera les droits de propriété qu'il a ainsi acquis sur les entreprises pour exiger sa part du produit, fruit du travail des actifs. Le fonds de pension, qui n'est qu'un intermédiaire, fera de même.

Celui qui a des revenus plus faibles et qui ne peut épargner n'a droit à rien du tout. C'est pour éviter d'avoir à prendre complètement en charge ces personnes, même si elles sont considérées comme «irresponsables», que tous les pays ont une législation qui impose, sous une forme ou une autre, une cotisation obligatoire pour la retraite (quitte à ce qu'elle passe par un fonds de pension).

Qu'apporte de plus la capitalisation ? Plus d'épargne ? Ce n'est pas sûr, car rien n'interdit à celui qui, après avoir consommé et avoir cotisé pour la retraite, dispose encore de quelque chose, de le placer d'une façon ou d'une autre (et donc d'acquiescer des droits de propriété sur le produit futur). Ce peut être dans un fonds de pension ou en achetant directement des titres : la différence n'est pas essentielle. Peut-être les fonds de pension draineront-ils plus cette épargne vers la Bourse, au détriment des banques et des institutions comme les caisses d'épargne – qui permettent de financer à un coût relativement faible les investissements «sociaux», tels les HLM. Mais cela ne modifie pas ce qui se passe dans l'économie «réelle» (par exemple, les entreprises emprunteront aux banques, au lieu d'émettre des actions).

Un fait est certain : le système par capitalisation reporte les inégalités présentes dans le futur. Le système par répartition aussi, mais il peut les réduire en modulant cotisations et versements selon le niveau de richesse : tout est question de volonté politique. Comme toujours.



Les physiciens japonais pendant la guerre

LAURIE BROWN • YOICHIRO NAMBU

Pendant les pires heures de la guerre, les physiciens japonais se réfugient dans la théorie et deux écoles de physique prospèrent.

Entre 1935 et 1955, les contributions à la physique des théoriciens japonais sont d'autant plus étonnantes que ces physiciens travaillaient dans des conditions moralement difficiles et physiquement éprouvantes. Ils n'en élaborent pas moins la théorie quantique de l'électromagnétisme et postulent l'existence de nouvelles particules élémentaires dont l'existence ne sera vérifiée expérimentalement que plus tard.

Cette fécondité sera récompensée : juste après la guerre, alors que le Japon est encore en ruines, le prix Nobel est décerné à deux de ses physiciens.

Les résultats sont d'autant plus remarquables que l'intérêt pour les sciences est, au pays du Soleil levant, beaucoup plus récent qu'en Europe. En 1639, le Japon avait coupé tout contact avec le monde extérieur, et il fallut attendre deux siècles pour qu'en 1854 l'isolement soit rompu par l'escadre américaine du Commandant Perry qui ouvre le Japon au commerce international et aux valeurs occidentales. En 1868, un groupe de samouraïs oblige le shogun (un dictateur militaire) à démissionner, et l'empereur, qui n'avait plus aucun pouvoir, revient sur le trône. C'est le début de l'ère japonaise moderne : le nouveau régime envoie des étudiants en France, en Allemagne, en Grande-Bretagne et aux États-Unis, pour qu'ils y étudient les langues, les sciences, les techniques et la médecine ; il crée, dans les grandes villes japonaises, des universités calquées sur le modèle occidental.

Hantoro Nagaoka est l'un des premiers physiciens japonais. Son père, un ancien samouraï, lui avait enseigné la calligraphie et le chinois. Après un voyage à l'étranger, il revient au Japon avec des monceaux de livres de science, s'excuse auprès de son fils de ne pas lui avoir enseigné un savoir plus utile, et l'encourage à étudier les disciplines scientifiques. À l'Université, Nagaoka s'interroge sur les dons des Asiatiques pour les

sciences. Après avoir étudié l'histoire des sciences chinoises pendant une année, il décide que les Japonais ne souffrent pas de handicap majeur.

En 1903, ses études portent leur fruit et il propose un modèle atomique où un petit noyau est entouré d'anneaux d'électrons. Ce modèle «saturnien», le premier où un noyau concentre la masse de l'atome, est révolutionnaire : ce noyau ne sera découvert qu'en 1911 par Ernest Rutherford, à Cambridge.

Parallèlement, les succès de la technologie militaire japonaise sont illustrés par leurs victoires dans les guerres contre la Chine (1895), la Russie (1905) et leurs succès lors de la Première Guerre mondiale. Plusieurs laboratoires de recherche privés sont créés et, en 1917, un institut de physique et de chimie gouvernemental, nommé Riken, est inauguré à Tokyo : il associe recherche fondamentale et recherches appliquées.

Un jeune physicien prometteur, Yoshio Nishina, est envoyé à l'étranger en 1919 ; il se rend en Grande-Bretagne, en Allemagne, puis réside pendant six ans à l'Institut Niels Bohr de Copenhague. Avec Oskar Klein, il calcule la probabilité pour qu'un photon – un quantum de lumière – «rebondisse» sur un électron. Cette interaction est essentielle pour la toute nouvelle théorie quantique de l'électromagnétisme, l'électrodynamique quantique.

Quand il revient au Japon, en 1928, Nishina y insufflé les méthodes et les problèmes modernes, et «l'esprit de Copenhague», c'est-à-dire un style de recherche démocratique où, contrairement aux normes qui règnent encore dans les universités japonaises, chacun s'exprime librement sans souci des préséances hiérarchiques. De grands physiciens, notamment Werner Heisenberg et Paul Dirac, lui rendent visite et donnent des cours à des amphithéâtres d'étudiants subjugués.

À ces cours assiste Shinichiro Tomonaga, un des rares étudiants qui comprennent l'enseignement de Heisenberg. Tomonaga, comme son collègue Hideki

Yukawa, enseignent bénévolement la mécanique quantique depuis un an et demi : à cause de la crise internationale, ils n'ont pas de travail rémunéré. Ils avouent tous deux en plaisantant que la crise économique les avait obligés à une vie universitaire...

Ils sont aussi rivaux : en 1932, Tomonaga devient membre de l'équipe de Nishina à l'Institut Riken, tandis que Yukawa va à l'Université de Osaka et, à la stupeur envieuse de Tomonaga, s'intéresse à des questions fondamentales, notamment au problème des divergences. Les physiciens avaient mis en évidence une «maladie grave» de l'électrodynamique quantique, les infinities qui résultaient des modèles quantiques. Ainsi l'électron interagissait, semblait-il, avec les photons de son propre champ électromagnétique de telle sorte que sa masse (ou son énergie propre) augmentait indéfiniment. Yukawa progresse peu sur cette question, qui devait occuper les plus brillants physiciens pendant deux décennies. «Chaque soir, je détruisais les idées que j'avais élaborées dans la journée. C'était désespérant», confiera-t-il plus tard.

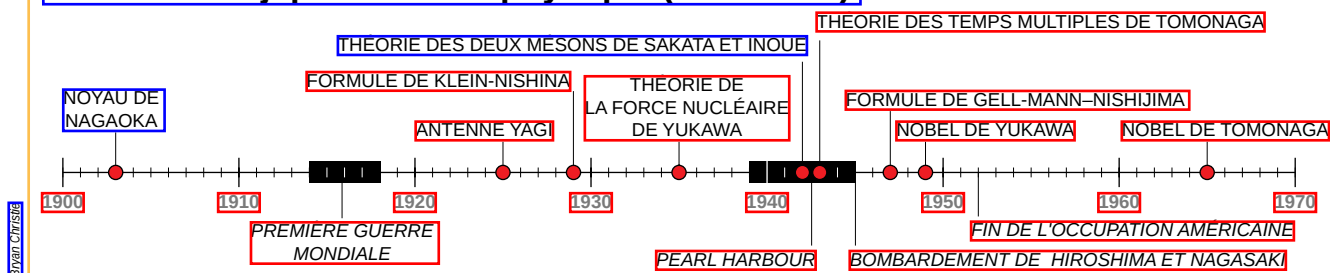
L'INTERACTION DU PROTON ET DU NEUTRON

Yukawa se penche alors sur un problème apparemment plus simple : la nature de la force d'interaction d'un proton et d'un neutron. Heisenberg avait proposé une théorie où cette force résultait de l'échange d'un électron entre le proton et le neutron. Comme l'électron a un moment angulaire intrinsèque, nommé spin, égal à un demi, cette idée était en contradiction avec la conservation du moment angulaire, un principe fondamental de la

YOICHIRO NAMBU (*ci-contre*), en janvier 1942, dans une pièce du département de physique de l'Université de Tokyo. En haut, Y. Nambu (*au premier plan*) et deux étudiants ont été photographiés, en 1953, avec le physicien Richard Feynman (*au deuxième rang, à gauche*).



Découvertes japonaises en physique (1900-1970)



mécanique quantique (proton et neutron ont un spin entier).

Toutefois, les physiciens quantiques avaient remplacé les lois classiques par les lois quantiques pour expliquer le comportement des électrons et des photons, et Heisenberg, Bohr et les autres n'étaient pas à une révolution près : ils étaient près à renoncer aux lois qu'ils venaient d'établir et à en énoncer de nouvelles pour les protons et les neutrons. Toutefois, dans son modèle, Heisenberg prévoyait un rayon d'action de la force nucléaire 200 fois trop grand et il semblait inadapté de détruire certaines lois pour aboutir à un modèle faux.

Yukawa comprend que le rayon d'action d'une force est inversement proportionnel à la masse de la particule qui la transmet. Ainsi la force électromagnétique a un rayon d'action infini, car elle est transmise par des photons dont la masse est nulle. Au contraire, la force nucléaire, confinée à l'intérieur du noyau, devrait avoir pour véhicule une particule 200 fois plus lourde que l'électron, et dont le spin devait être entier.

En 1935, Yukawa publie ses résultats dans les Comptes rendus de la Société japonaise de mathématiques et de physique. Bien qu'elle ait été écrite en anglais, la publication reste ignorée de la communauté scientifique internationale pendant deux ans. En 1937, Carl Anderson et Seth Neddermeyer,

de l'Institut de technologie de Californie, découvrent, sur des traces laissées par les rayons cosmiques, des particules chargées qui ont à peu près la masse des particules de Yukawa. Était-ce la même particule ? Les physiciens étaient en proie au doute, car de telles particules, détectées au niveau de la mer, auraient dû être absorbées par l'atmosphère : leur durée de vie était 100 fois plus longue que Yukawa ne l'avait prévu.

Ignorant ces mesures, Tomonaga travaille avec Nishina sur l'électrodynamique quantique. En 1937, il rend visite à Heisenberg, à l'Université de Leipzig, et collabore pendant deux ans à la théorie des forces nucléaires. Yukawa passe également dans ce laboratoire, sur le chemin d'un Congrès Solvay qui se tient à Bruxelles. Toutefois, le congrès est annulé et les deux Japonais quittent l'Europe précipitamment.

La guerre marque la fin de l'âge d'or de la physique quantique. Les fondateurs de la nouvelle physique, jusqu'alors réunis dans des centres européens, tel Göttingen, se dispersent, beaucoup émigrant aux États-Unis. Heisenberg est le seul grand nom de la physique à rester en Allemagne ; il continue, du moins au début, à travailler sur la théorie des champs – une généralisation de l'électrodynamique quantique – et entretient une correspondance avec Tomonaga.

LA PHYSIQUE PENDANT LA GUERRE

En 1941, quand le Japon entre à son tour en guerre, Yukawa est professeur à Kyoto. La philosophie marxiste est alors en vogue chez les intellectuels qui voient une façon de s'opposer au militarisme du gouvernement impérial. Parmi les étudiants et les collègues de Yukawa figurent deux étudiants communistes, Mitsuo Taketani et Shoichi Sakata. Ceux-ci ont une théorie du progrès scientifique fondée sur l'opposition thèse, antithèse, amenant une synthèse, et une progression spiralée de la recherche. Taketani publie imprudemment dans un journal marxiste des articles qui attirent l'attention de la police : il est arrêté et emprisonné pendant six mois en 1938 avant d'être libéré grâce à l'intervention de Yukawa et de Nishina. Totalement immergé dans la physique, Yukawa ne s'engage dans aucun combat politique, mais protège les opposants qui travaillent dans son laboratoire.

Pendant que la guerre fait rage dans le Pacifique, les physiciens continuent leurs recherches. En 1942, Sakata et Takeshi Inoue proposent que la particule découverte par Anderson et Neddermeyer n'est pas la particule de Yukawa, mais une particule plus légère, un muon, issu de la désintégration de la « vraie » particule de Yukawa, le pion. Ils publient leur hypothèse dans un journal japonais.

Yukawa fait, un jour par semaine, un travail lié à l'effort de guerre, mais il n'en a jamais précisé le détail. Tomonaga, devenu professeur à l'Université de Tokyo, participe davantage à l'effort de guerre. Avec Masao Kotani, il élabore, pour la marine, une théorie des magnétons, des dispositifs utilisés dans les systèmes radar pour produire des ondes électromagnétiques (ce sont aujourd'hui les sources de rayonnement des appareils micro-ondes). Par l'intermédiaire d'un de ses amis, capitaine dans la marine impériale, Heisenberg fait parvenir à Tomonaga un article qui préconise une description des interactions des particules quantiques. C'est une



SORTIE DE CLASSE AU MONT FUJI, en 1936, des physiciens de l'Institut Riken. Shinichiro Tomonaga est le troisième en partant de la gauche et Yoshio Nishina, le « patron », est le troisième en partant de la droite (au premier rang).

théorie ondulatoire que Tomonaga applique aussitôt pour concevoir des guides d'ondes de radar.

Durant cette période, Tomonaga s'attaque à l'augmentation infinie de l'énergie des particules, problème auquel Yukawa s'était déjà frotté et qu'il avait abandonné. Pour ce faire, il met au point une façon de décrire le comportement de diverses particules quantiques en interaction, tels les électrons, quand elles se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière. Généralisant une idée de Dirac, il définit, pour chaque particule, outre les coordonnées d'espace, une coordonnée de temps propre. Ce travail, qui allait devenir un cadre théorique puissant pour l'électrodynamique quantique, est publié en 1943, dans le journal de l'Institut Riken.

En 1943, la plupart des étudiants ont été mobilisés. L'un d'entre nous (Yochiro Nambu) fait partie des soldats affectés dans une unité de recherche de l'armée sur les radars. Une formidable guerre des services oppose l'armée de terre et la marine, lesquelles mènent séparément leurs recherches et refont souvent le travail de l'autre. Les moyens sont très limités et les techniques primitives : l'armée ne réussit pas à mettre au point des radars mobiles pour suivre les cibles ennemies. Les autorités donnent à Y. Nambu un petit morceau (huit centimètres sur huit) de Permalloy, un alliage de fer et de nickel d'une très grande perméabilité magnétique, et lui demandent de faire ce qu'il peut pour améliorer la détection des sous-marins. On lui demande aussi de dérober à la marine l'article de Tomonaga sur les guides d'ondes, classé secret défense, ce qu'il fait en rendant visite à un professeur qui ne se méfie pas.

Les physiciens les plus jeunes, dans la région de Tokyo, poursuivent leurs études tant bien que mal. Les professeurs de l'Université de Tokyo, ainsi que Tomonaga, leur font des cours le dimanche. En 1944, quelques étudiants sont libérés des recherches militaires qu'ils étaient contraints de faire et reviennent à l'Université. Toutefois les difficultés persistent : plusieurs bâtiments où logent les étudiants ont été incendiés. Tomonaga, de santé fragile, donne parfois ses cours de son lit.

Pendant ce temps, Nishina est chargé, par les militaires, de travailler sur la bombe atomique. En 1943, il conclut ses recherches préliminaires en disant qu'on peut faire une bombe atomique à condition d'avoir assez de temps et assez d'argent. Il charge un jeune physicien spécialiste des rayons cosmiques, Masa Takeuchi, de construire un dispositif pour



NIELS BOHR (à droite) est en grande discussion avec Nishina et Seishi Kikuchi (debout), lors de son voyage au Japon, en avril 1937. Au début des années 1920, Nishina avait rendu visite à Bohr, à Copenhague et, depuis, il était resté en contact avec plusieurs physiciens européens.

isoler l'uranium léger nécessaire à la fabrication d'une bombe. Taketani, à nouveau emprisonné, est également contraint de travailler sur ce projet, mais il est convaincu qu'il n'a aucune chance d'aboutir.

De l'autre côté du Pacifique, quelque 150 000 hommes et femmes participaient au projet Manhattan, parmi eux plusieurs génies qui disposaient de plus de deux milliards de dollars. Le contraste est fort : quand les étudiants japonais comprennent qu'il leur faut du sucre pour faire de l'hexafluorure d'uranium (dont ils pourraient extraire l'uranium), ils le prélèvent dans leurs maigres rations alimentaires. Quand les deux bombes américaines éclatent sur Hiroshima et sur Nagasaki, les Japonais n'ont réussi à produire qu'un morceau d'uranium de la taille d'un timbre poste et qui n'est même pas enrichi.

LA RECONSTRUCTION

Après la reddition des Japonais, en août 1945, le pays est occupé par les Américains pendant plusieurs années. L'administration du général Douglas MacArthur réforme et libéralise le système universitaire et crée de nouvelles universités. Toutefois, la recherche expérimentale dans le

domaine de l'énergie nucléaire est interdite. Tous les cyclotrons sont démantelés et jetés à la mer, de peur qu'ils ne servent aux recherches sur la bombe atomique. L'économie du pays n'offre pas les ressources nécessaires à la recherche expérimentale. Tomonaga vit avec sa famille dans un laboratoire dont la moitié a été bombardée. Y. Nambu arrive à l'Université de Tokyo comme assistant et vit pendant trois ans dans un laboratoire, dormant sur une natte de paille posée sur son bureau (et toujours vêtu d'habits militaires, faute d'autres vêtements). Beaucoup d'autres bureaux sont occupés par des universitaires et par leur famille.

La préoccupation de chacun est de trouver de la nourriture. Y. Nambu trouve parfois des sardines sur le marché aux poissons de Tokyo, mais l'odeur, faute de réfrigérateur, devient rapidement insupportable. Le dimanche, il part à la campagne, quémandant de la nourriture aux fermiers.

D'autres physiciens habitent dans le même bâtiment. Ziro Koba travaille, avec le groupe de Tomonaga, sur le problème de l'énergie propre infinie. Certains se spécialisent dans l'étude des solides et des liquides, aujourd'hui nommée la physique de la matière condensée, sous la



SHUNKO KINUGI

TOMONAGA, en 1960, cinq ans avant de recevoir le prix Nobel pour avoir résolu, pendant la Seconde Guerre mondiale, le problème des quantités infinies dans l'électrodynamique quantique.

coupe de Kotani et de son assistant Ryogo Kubo, dont les théorèmes de mécanique statistique deviendront célèbres. En 1946, Sakata propose une solution au problème de l'énergie propre infinie de l'électron en contrebalançant la force électromagnétique par une force inconnue, qui disparaît à la fin des calculs. À la même époque, Abraham Pais, à l'Université de Princeton, propose la même solution. La méthode n'est pas parfaite, mais elle permet au groupe de Tomonaga de manipuler des quantités infinies (elle est connue aujourd'hui sous le nom de renormalisation).

En septembre 1947, Tomonaga lit dans la revue *Newsweek* un résultat étonnant obtenu par Willis Lamb et Robert Retherford, de l'Université de Columbia. Dans un atome d'hydrogène, les électrons occupent l'un des états quantiques possibles ; deux de ces états, dont on pensait qu'ils avaient la même énergie ont, en fait, des énergies légèrement différentes. Juste après ce résultat, Hans Bethe, de l'Université Cornell, fait un calcul rapide et non relativiste de cet effet, lequel est une modification finie de l'énergie propre infinie d'un électron à l'intérieur d'un atome. Avec ses étudiants, Tomonaga obtient bientôt un calcul relativiste de cet effet.

Ce travail ressemble beaucoup à celui que Julian Schwinger, de l'Université de

Harvard, fait quasiment en même temps. Tomonaga et Schwinger partageront, en 1965, le prix Nobel avec Richard Feynman pour le développement de l'électrodynamique quantique (Feynman utilisa une méthode différente, mais Freeman Dyson montrera ultérieurement que la méthode de Feynman est équivalente à celle de Tomonaga et de Schwinger).

À la même époque, un groupe anglais découvre la désintégration d'un pion en un muon dans des plaques photographiques exposées aux rayons cosmiques, à haute altitude. Ce résultat confirmait l'hypothèse de Inoue, de Sakata et d'Yukawa. Ainsi Yukawa avait découvert que les forces sont transmises par des particules dont le spin est toujours un nombre entier, et dont la portée est déterminée par la masse. Il recevra le prix Nobel en 1949.

En 1947, de nouvelles particules sont découvertes, mais leur comportement étonnant leur vaut le qualificatif d'étranges. Bien qu'elles soient rares, elles apparaissent souvent par paires et leur durée de vie est anormalement longue. Dans les années qui suivent, Sakata et ses collègues élaborent un cadre mathématique pour une théorie des particules et des forces, dont le Modèle standard sera l'aboutissement.

Simultanément, les physiciens japonais renouent des liens avec les Américains, mais les sentiments sont ambigus.

Les bombes qui ont détruit Hiroshima et Nagasaki ont épouvanté tous les Japonais ; d'un autre côté, l'occupation américaine avec son programme de libéralisation a des conséquences positives. Le principal facteur de réconciliation est sans doute la fascination commune pour la physique.

LA RÉCONCILIATION

En 1948, Bethe reçoit un article de Tomonaga, qui expose l'idée maîtresse de la théorie de Schwinger. Contre vents et marées, malgré les troubles de la guerre, Tomonaga avait maintenu au Japon, une école de physique théorique qui, par certains aspects, était en avance sur tout ce qui se faisait dans le reste du monde. Tomonaga avait établi les fondements de l'électrodynamique quantique, cinq ans avant Schwinger et sans l'aide des expériences réalisées à l'Université de Columbia.

Au début des années 1950, des physiciens plus jeunes commencent à venir aux États-Unis. Certains, tel Y. Nambu, y restent. Atténuant un peu les conséquences de cette fuite de cerveaux, les expatriés maintiennent des relations épistolaires avec leurs collègues restés au Japon.

En 1959, Leo Esaki, à l'Université de Tokyo, présente une thèse sur le comportement quantique des semi-conducteurs, travail qui aboutit à la mise au point des transistors. En 1973, il rapportera au Japon un troisième prix Nobel de physique qu'il partagera avec Ivar Giaever et Brian Josephson.

Pourquoi les années les plus noires du xx^e siècle pour le Japon furent-elles aussi les plus créatives pour ses physiciens théoriciens ? Peut-être les esprits troublés cherchaient-ils à échapper aux horreurs de la guerre en se réfugiant dans la théorie ? Peut-être la guerre a-t-elle renforcé une isolation dont le fruit fut l'originalité ? Les physiciens, enfin libérés des allégeances traditionnelles vis-à-vis de leurs professeurs, ont-ils enfin exprimé leurs propres idées ? Ou peut-être, n'y a-t-il aucune explication à cette période si extraordinaire ?

Laurie BROWN est professeur émérite de physique à l'Université Northwestern. Yoichiro NAMBU est professeur émérite à l'Université de Chicago.

H. YUKAWA, *Autobiographie*, collection Un savant, une époque, éditions Belin, 1984.

***Proceedings of the Japan-USA Collaborative Workshops on the History of Particle Theory in Japan, 1935-1960*, sous la direction de L. Brown et al., Université de Kyoto, mai 1988.**

Recettes de Noël

HERVE THIS

Quelques pistes pour moderniser les réveillons.

Les fêtes sont là, il faut passer en cuisine. Nous contenterons-nous d'une dinde, comme au Moyen Âge, alors que l'an 2000 approche ? Non, inventons des plats nouveaux. Mais comment ? Pour le cuisinier inspiré par la chimie et la physique, la chose n'est pas difficile !

Commençons par un nouveau mode de cuisson, fondé sur une remarque de François Pérégó, restaurateur de tableaux, féru de chimie, à Bécherel : utilisant de l'œuf pour ses toiles, il m'a signalé l'effet de l'alcool éthylique sur le blanc d'œuf. D'où un nouveau mode de cuisson que je vous propose d'étudier par l'expérience suivante : dans un bol, placez un blanc d'œuf, puis versez une rasade d'alcool à 90 degrés. Aussitôt, le blanc coagule.

Comment expliquer le phénomène ? Le blanc d'œuf est composé d'environ 90 pour cent d'eau, et de dix pour cent de protéines. Ces molécules sont des enchaînements d'acides aminés (il en existe 20 types dans les aliments), qui se distinguent par leur chaîne latérale, laquelle est, selon les cas, hydrophile (soluble dans l'eau) ou hydrophobe. Dans l'eau, les parties hydrophiles se replient sur les parties hydrophobes, minimisant le contact des parties hydrophobes avec l'eau.

L'ajout d'alcool à 90 degrés, qui change l'environnement des protéines, déclenche le déroulement des protéines ; la réaction de deux groupes thiols ($-SH$) de protéines voisines conduit à un pont disulfure, qui lie les protéines. Ainsi se forme un gel : le blanc d'œuf cuit. Ce procédé chimique ne peut naturellement pas être utilisé tel quel en cuisine : le blanc d'œuf est fade, et l'alcool à 90 degrés a de bien pauvres vertus gustatives, mais si l'on remplaçait l'al-

cool à 90 degrés par de l'eau de vie de mirabelle ?

Après l'entrée, le plat principal : utilisons les données scientifiques sur les transformations de la viande chauffée. À 40 °C, les protéines se dénaturent (elles se «déroutent»), et la viande perd sa transparence ; à 50 °C, les fibres de collagène (le tissu de soutien des cellules musculaires) se contractent ; à 55 °C, la myosine (une des principales protéines des cellules musculaires) coagule et le collagène commence à se dissoudre ; à 66 °C, des protéines «sarcoplasmiques», le collagène, coagulent ; à 79 °C, l'actine (une autre protéine importante des muscles) coagule.

Que faire de telles données ? Au lieu de cuire votre dinde au four, prélevez les blancs, et cuisez-en certains morceaux à une température comprise entre 40 et 50 degrés, d'autres entre 50 et 55 degrés, d'autres encore entre 55 et 66 degrés, etc. : vos convives auront le plaisir d'apprécier des textures différentes pour une même viande, puisque des composés différents de la viande auront réagi.

Le fromage, maintenant. Nous avons présenté dans cette rubrique, il y a deux ans, le «chocolat Chantilly», qui est une mousse de chocolat, plutôt qu'une mousse au chocolat. Nous vous proposons cette fois de répéter la chose avec du fromage. Dans une casserole, versons un verre d'eau ou de vinaigre, puis ajoutons une feuille de gélatine, un bon morceau de fromage (du roquefort, par exemple) et chauffons doucement en agitant. Ainsi le fromage qui fond forme des gouttelettes de matière grasse qui se dispersent dans l'eau, s'entourant des molécules dites tensioactives apportées par la

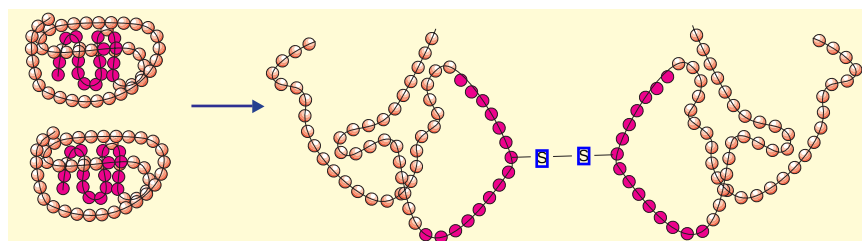
gélatine. Cette «béarnaise de fromage» est une cousine de bien d'autres émulsions culinaires, telles la mayonnaise, la sauce béarnaise (d'où le nom), la fondue au fromage... et la crème. Or qu'obtient-on quand on fouette de la crème fraîche en la refroidissant ? De la crème Chantilly. De même, quand on fouette la béarnaise au fromage en posant la casserole sur un lit de glaçons, on obtient un «fromage Chantilly».

Les artistes culinaires sauront tirer parti de cette innovation : Didier Clément, chef du Lion d'or, à Romorantin, a ainsi exécuté un «crottin de Chavignol Chantilly», qu'il a accompagné d'échalotes caramélisées. Innovation oblige, le caramel n'était pas un caramel habituel, confectionné par chauffage de sucre de table, ou saccharose, avec un peu d'eau. Non, cette fois, la chimie lui avait conseillé un «caramel de fructose». Ce dernier avait un goût original, de raisins confits.

Finissons par la véritable crème Chantilly, que vous ne manquerez pas de préparer pour accompagner le dessert. Sa préparation est simple, puisqu'il suffit de fouetter de la crème bien fraîche : le fouet introduit des bulles d'air dans l'émulsion, et les gouttelettes de matière grasse viennent cristalliser à la périphérie de ces bulles, ce qui les stabilise. Hélas, le fouet manuel a souvent été remplacé par le batteur électrique, avec lequel s'est accru le risque de voir la crème tourner en beurre (les gouttelettes de matière grasse fusionnent, et l'air est perdu lors du processus).

Pourtant tous les ingrédients d'une bonne crème Chantilly subsistent alors. Il suffit donc de les réorganiser : formons à nouveau une émulsion analogue à la crème en chauffant, dans une casserole, une cuillerée à soupe d'eau, à laquelle on ajoute la crème tournée en beurre. Quand toute la crème a été ainsi réintroduite, on pose la casserole sur de la glace et l'on fouette à nouveau : la crème remonte. Joyeuses fêtes !

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 22 janvier 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Le déroulement de deux protéines conduit à leur liaison, par formation d'un pont disulfure, entre deux atomes de soufre. Ainsi l'alcool gélifie le blanc d'œuf.

Mes mains ont la parole

L'usage des mains est un comportement inné et complémentaire de la parole.

Quels que soient sa fonction et son rang, un homme public est secondé par un conseiller en communication qui lui indique comment utiliser ses mains pour appuyer son discours de campagne électorale. Par ailleurs, certains peuples méditerranéens sont connus pour leur propension naturelle à utiliser une communication manuelle. Plus généralement, nous utilisons tous nos mains lorsque nous parlons. Perpétuons-nous ainsi une convention culturelle ? Illustrons-nous notre discours afin d'être mieux compris ? Jana Iverson et Susan Goldin-Meadow, psychologues à l'Université de Chicago, ont montré que la gestuelle est une communication supplémentaire qui complète la parole articulée. Les mains sont un auxiliaire de la voix.

Nos psychologues ont tout d'abord étudié l'hypothèse selon laquelle l'emploi des mains résulterait d'un apprentissage visuel. Elles ont étudié douze enfants âgés de 8 à 18 ans, dont la moitié était aveugle de naissance. Dans une expérience, un manipulateur transvasait un liquide d'un verre long et mince dans un récipient plus trapu. Les aveugles ont auparavant manipulé les

récipients avec leurs mains qu'ils gardaient posées sur les récipients pendant l'opération, les enfants voyants observaient. Puis, à la demande des psychologues, les enfants ont commenté les variations de quantité d'eau durant l'opération. Les réponses des sujets étaient enregistrées, puis les paroles et les gestes codés pour une analyse quantitative des rapports entre leur paroles et leur comportements manuels. Quand les enfants voyants ont répondu, ils ont utilisé leurs mains pour expliciter leur raisonnement. Par exemple, ils écartaient leurs mains, préalablement incurvées en forme de C, représentant le récipient. Ils montraient ainsi la variation de largeur. Contre toute attente, les enfants aveugles ont utilisé les mêmes gestes, dans les mêmes circonstances et avec les mêmes significations. Ces résultats contredisent l'hypothèse selon laquelle les enfants apprendraient l'usage des mains en observant leurs parents ou leur entourage.

Dans un deuxième temps, à l'aide d'une méthode identique, quatre jeunes aveugles ont répondu aux mêmes questions, mais posées cette fois par d'autres aveugles. Là encore, des gestes ont appuyé leurs paroles, alors qu'ils avaient connaissance

du handicap de leurs interlocuteurs. Les psychologues en ont conclu que l'emploi des mains est une aide au discours : ce n'est pas un moyen d'expression parallèle et redondant. Une étude en cours confirme cette théorie. Des sujets regardent un dessin animé, puis ils sont interrogés. Certains

ont les mains libres, tandis que d'autres ne peuvent les utiliser. Les souvenirs des premiers apparaissent plus précis, mieux ordonnés et mieux exprimés que ceux des seconds.

Les gestes favoriseraient ainsi l'élocution et la cohérence du discours. Ils sont indissociables du langage. J. Iverson et S. Goldin-Meadow étudient également l'influence de la culture sur les mouvements des mains. Les gestes d'un Finlandais sont-ils différents de ceux d'un Italien ? Dans l'affirmative, comment la culture gestuelle se transmet-elle ? Le langage articulé est un caractère apparu tardivement dans l'évolution ; selon certains psychologues, il s'est peut-être superposé à une forme primitive de communication manuelle. À quand un dictionnaire traduisant les signes manuels d'une langue à l'autre ?



Le titanosaure ovipare

Les embryons découverts en Argentine dans des œufs montrent que les sauropodes étaient ovipares.

Contrairement à ce que l'on croit souvent, les œufs de dinosaures ne sont pas des raretés ; on les trouve par centaines dans certaines formations géologiques. Au grand dam des paléontologues, beaucoup plus rare est la découverte d'embryons à l'intérieur de ces œufs, embryons qui sont le seul moyen pour identifier avec

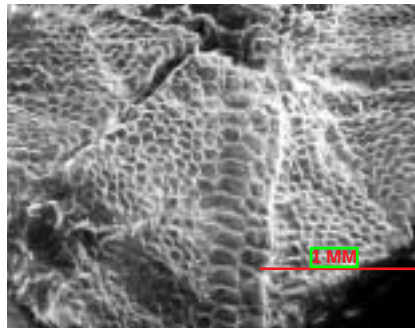
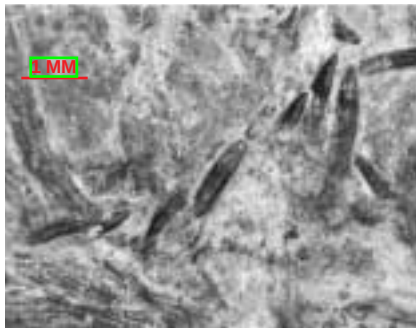
précision quel animal les a pondus. Quelques sites en Asie centrale et en Amérique du Nord ont déjà livré des œufs contenant des embryons de dinosaures, mais une récente découverte en Amérique du Sud, due au chercheur argentin Luis Chiappe et à son équipe, est d'un intérêt exceptionnel à cause du type de dinosaure concerné et de la préservation exceptionnelle des embryons.

Les œufs ont été découverts à Auca Mahuevo, dans la province

de Neuquen (Nord-Ouest de la Patagonie), dans des roches du Crétacé supérieur appartenant à la Formation Rio Colorado, datée d'environ 89 à 71 millions d'années. Le gisement contenait une douzaine d'œufs en place ainsi qu'une quarantaine de fragments de coquilles incluant des restes d'embryons. Ces restes sont de minuscules ossements, des dents, et, trouvaille plus inattendue, des empreintes de la peau (*Nature*, 19 novembre 1998).

Les dents, qui ne dépassent pas deux millimètres de longueur, ont la forme d'un cylindre. La face d'usure de l'une d'elle prouve, qu'avant la naissance, ces dinosaures usaient déjà leurs dents en





A gauche, les dents de l'embryon de titanosaure et à droite l'empreinte de la peau.

les frottant l'une contre l'autre. Ces dents ressemblent tout à fait à celles des sauropodes de la famille des Titanosauridae, qui sont très abondants dans le Crétacé supérieur d'Amérique du Sud, et les restes osseux identifiables confirment qu'il appartient à des sauropodes : ces embryons, les premiers embryons de dinosaures sauropodes jamais signalés, sont bien ceux de titanosaures et cela suffit à conférer à cette découverte une importance considérable. On dispose enfin d'informations concrètes sur les tout premiers stades de la vie de ces animaux au long cou et à la longue queue, les plus grands de tous les dinosaures.

La surface de la peau, telle qu'elle est révélée par ces empreintes d'une grande finesse, montre une mosaïque de petits tubercules, parfois disposés en rosettes, sillonnée de rangées d'écailles plus grandes. La mosaïque d'écailles ou de tubercules présente chez ces embryons rappelle l'arrangement des plaques osseuses qui couvraient le corps de *Saltasaurus loricatus*, un titanosaure provenant aussi du Crétacé supérieur d'Argentine (des plaques osseuses dermiques sont fréquentes chez les titanosaures ; on en connaît par exemple chez *Ampelosaurus atacis*, un dinosaure fréquent dans le Crétacé supérieur du Sud de la France). Chez les embryons de Patagonie, on n'a trouvé aucune trace d'ossification de ces écailles et tubercules, ce qui ne signifie pas que les adultes n'en possèdent pas : les embryons et les nouveau-nés du lézard actuel *Cordylus*, ainsi que le crocodile du Nil ne présentent pas non plus d'os bien formés dans leur peau, les plaques osseuses ne se développant qu'au cours de la croissance. Tout porte à croire que la cuirasse de plaques osseuses des titanosaures ne se développait qu'après la naissance.

Les œufs, de volume égal à 800 centimètres cubes, ne sont pas particulièrement grands, puisqu'on trouve couramment dans le Crétacé supérieur du Sud de la France des œufs de trois litres. La microstructure de la coquille de ces œufs, dont l'épaisseur est en moyenne de 1,4 millimètre, a été étudiée en détail. La rareté

des œufs fossiles contenant des embryons a contraint les paléontologues à classer les œufs selon les seuls caractères de la coquille et, en particulier, selon la forme et la disposition des prismes de calcite qui la composent. De nombreux noms de «familles», de «genres» et d'«espèces» désignant des types de coquilles ont ainsi été proposés, mais leur attribution à des types précis d'animaux ovipares est souvent incertaine, en l'absence d'association indiscutable avec des restes d'embryons identifiables. C'est le cas notamment des innombrables œufs trouvés dans le Crétacé supérieur du Sud de la France, qui jusqu'à maintenant n'ont pas livré d'ossements embryonnaires. Les œufs d'Auca Mahuevo correspondent bien, par la taille, la forme, l'ornementation et la microstructure de la coquille, au type d'œuf appelé Megaloolithidae, connu dans le Jurassique des États-Unis et du Portugal, et dans le Crétacé de France, d'Espagne, d'Inde, de Roumanie et d'Argentine. Certains paléontologues avaient supposé que des œufs de ce type avaient été pondus par des sauropodes, mais en l'absence d'association claire avec des embryons de ces dinosaures, la supposition manquait de fondement. L'exemple de certains œufs fossiles du Désert de Gobi, attribués pendant 70 ans au dinosaure *Protoceratops* avant la découverte à l'intérieur de l'un d'entre eux d'un embryon d'Oviraptor, un dinosaure tout à fait différent, incite à la plus grande prudence en cette matière. Un des grands intérêts des œufs d'Auca Mahuevo est de montrer enfin que certains au moins des œufs de type mégaloolithidé ont bien été pondus par des sauropodes.

Il y a quelques années, le paléontologue américain Robert Bakker avait supposé que les sauropodes étaient vivipares, son argument principal étant que les nouveau-nés auraient été trop gros pour tenir à l'intérieur d'un œuf. La découverte de ces embryons de sauropodes de Patagonie démontre la fausseté de cette hypothèse. Comme les autres dinosaures, les sauropodes naissaient très petits par rapport à leur taille adulte.

ÉRIC BUFFETAUT

BRÈVES

Ancêtre complet

Un squelette d'australopithèque de 3,2 à 3,6 millions d'années vient d'être présenté par Ron Clarke et ses collègues de l'Université de Witwatersrand à Johannesburg. L'individu, dont on a trouvé des os des pieds, deux tibias, un fragment de bras et une bonne partie du crâne, mesurait 1,2 mètre et pouvait grimper aux arbres. C'est l'un des hominidés fossiles les plus complets que nous connaissions, et le plus ancien mis au jour en Afrique du Sud. Il est probable que d'autres os de cet australopithèque seront bientôt dégagés.

Rats et peuplement

Les Polynésiens qui colonisèrent les archipels du Pacifique il y a environ 5 000 ans transportèrent avec eux des animaux, en particulier des rats, peut-être pour les manger. L'analyse de l'ADN des descendants de ces rats a permis à E. Matissso-Smith et à ses collègues, de l'Université d'Auckland, de retracer les itinéraires maritimes empruntés lors du peuplement de cette région. Ils notent en particulier qu'à l'exception des îles Chatam, en Nouvelle-Zélande, et des Marquises, deux archipels relativement isolés, des relations existaient entre les différents archipels pendant la période préhistorique.



Enfants battus

Lorsqu'un enfant a un traumatisme crânien, les parents prétendent toujours qu'il s'agit d'un accident. Comment le médecin distingue-t-il un accident d'un sévice? Une équipe américaine vient de montrer que des enfants maltraités ont, dans leur liquide céphalo-rachidien, une concentration en acide quinolinique supérieure à la concentration détectée chez les enfants victimes d'un accident. Cette substance est produite par les cellules du système immunitaire après une blessure et diffuse lentement dans le cerveau : chez un accidenté rapidement hospitalisé, il n'a pas le temps de pénétrer dans le système nerveux central. Chez un enfant maltraité, il s'accumule au fil des jours. Un seul élément ne suffit pas à établir une maltraitance, mais devrait aider les médecins à la dépister.

Suite page 24

Altitude et population

Comment les hommes se répartissent-ils à la surface de la Terre? L'«individu moyen» vit à 194 mètres d'altitude ; 33,5 pour cent de la population mondiale vivent à moins de 100 mètres au-dessus du niveau de la mer, près du littoral ou dans des plaines fluviales, soit une superficie correspondant à seulement 17 pour cent des terres émergées.

Coquillages et céphalées

De petites protéines analogues aux toxines produites par des coquillages venimeux tels que les cônes des mers tropicales seront peut-être utilisées dans le traitement de la douleur. B. Olivera, de l'Université de l'Utah, a isolé une substance issue de *Conus magus*, qui a de puissantes propriétés antalgiques. Dans le liquide céphalo-rachidien baignant la moelle épinière, cette protéine bloque l'entrée du calcium dans les cellules nerveuses, empêchant ainsi la propagation du signal de la douleur.



Chimie et moteur

On connaissait le moteur électrique. Depuis peu, les revues scientifiques présentent les nanomoteurs, déposés à la surface de silicium. Jean-Pierre Sauvage et ses collègues de Strasbourg ont fait mieux : ils ont confectionné une molécule composée de deux anneaux entrelacés, qui peuvent se lier en deux points. Quand on éclaire la solution qui contient ces molécules, les deux anneaux tournent l'un par rapport à l'autre, et changent de point d'attache. Ainsi un signal (lumineux) déclenche le mouvement de ce moteur moléculaire.

Le mâle qui répand la terreur

Une femme enceinte sur 200, environ, souffre, au cours du troisième trimestre de grossesse, d'éruptions cutanées. Ces manifestations disparaissent après l'accouchement. Sélim Aractingi et ses collègues de l'Hôpital Tenon et de l'Hôpital Saint-Louis ont montré que le trouble est dû à des cellules fœtales qui envahissent la peau de la mère : ils ont trouvé de l'ADN masculin dans les lésions des femmes enceintes qui portaient un fœtus mâle (ils n'en ont pas trouvé dans la peau de femmes témoins indemnes de toute lésion cutanée et qui attendaient aussi un garçon).

Suite page 26

La puce et l'aveugle

Une puce électronique a permis à des aveugles de voir pendant quelques minutes.

La rétine est une couche de cellules qui tapisse l'intérieur du globe oculaire. L'extrémité (en forme de cônes ou de bâtonnets) de chacune de ces cellules contient des pigments qui convertissent l'énergie lumineuse des images en signaux électrochimiques que l'autre extrémité, nerveuse, véhicule vers le nerf optique. Les informations parviennent ainsi au cerveau, qui les analyse et construit l'image. Certains cas de cécité sont dus à une dégénérescence d'une partie de la rétine. Par exemple, la rétinite pigmentaire rend les parties cellulaires contenant les pigments inefficaces tout en laissant intacts les segments nerveux. La rétine conserve ses propriétés de transmission électrique, mais le codage du signal à l'entrée n'est plus effectué.

Le 31 mai 1996, un patient atteint de rétinite pigmentaire a vu, pour la première fois, pendant quelques minutes grâce à une puce électronique en silicium greffée sur sa rétine par Mark Humayun, de l'Hôpital Johns Hopkins de Baltimore.

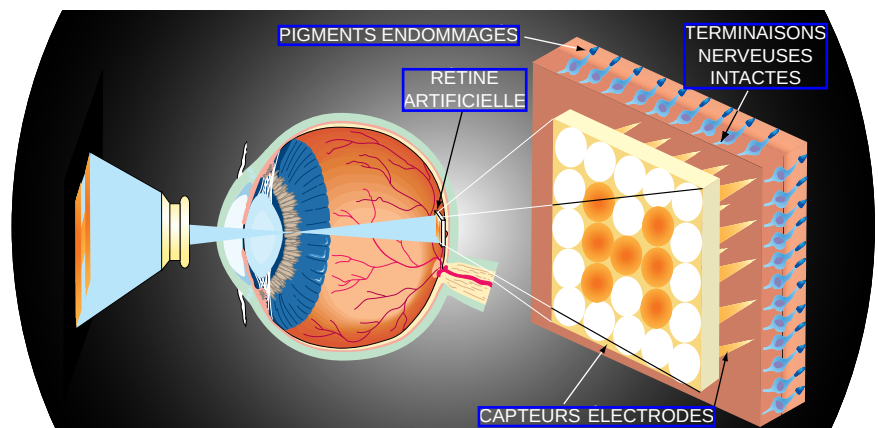
L'idée est née en 1988 lorsque le chirurgien a démontré que des aveugles «voient» des points lumineux quand les parties nerveuses des cellules rétiniennees endommagées sont stimulées par des impulsions électriques : les organes véhiculant les informations sensorielles sont fonctionnels. Les images peuvent-elles être artificiellement traduites?

En collaboration avec l'équipe de Wentai Liu, professeur à l'Université de Caroline du Nord, M. Humayun a construit et

mis au point une rétine artificielle. Ce système est composé d'une surface mince de quatre millimètres carrés, tapissée de capteurs sensibles à la lumière, qui convertissent une image en 25 points, ou pixels, chacun émettant une impulsion électrique. Ces impulsions sont transmises aux terminaisons nerveuses par l'intermédiaire de 25 électrodes. L'information est véhiculée par le nerf optique jusqu'au cerveau. Le dispositif reçoit son énergie d'une pile photovoltaïque, qui transforme l'énergie d'un faisceau laser en énergie électrique.

Ainsi, quinze patients opérés ont aujourd'hui, pendant deux heures, retrouvé une vue imparfaite, très floue, grâce à ces implants. Des images simples telles que des lettres ou des figures géométriques étaient enregistrées par une caméra placée sur une paire de lunettes. Cette caméra projetait ensuite vers l'implant les images réduites. Cependant, la puce n'a été laissée sur la rétine que deux heures, car le dispositif n'est pas encore assez fiable et trop de questions restent posées. Résiste-t-il à l'humidité et à la salinité de l'humeur vitrée, le liquide qui emplit la cavité du globe oculaire? L'œil supportera-t-il la chaleur dégagée par l'implant? Bien que l'œil soit un organe tolérant, acceptera-t-il une puce plus grande, sans la rejeter? L'opération est un succès, mais elle ne représente que le stade expérimental d'un traitement des cas de cécité où la rétine a conservé ses propriétés conductrices.

Selon Jean-Philippe Nordmann, à l'Hôpital Tenon à Paris, cette première d'un œil bionique représente un espoir pour les aveugles. Grâce aux progrès techniques, la résolution des images sera sans doute améliorée. Les greffés ne verront jamais parfaitement, mais ils pourraient détecter des mouvements, des formes simples ou des éclairages différents.



Une caméra projette une image réduite sur une puce de quatre millimètres carrés. Cette puce est implantée dans une rétine dont les pigments, détériorés, ne sont plus sensibles à la lumière. Les capteurs électroniques traduisent l'information lumineuse en impulsions électriques que 25 électrodes transmettent aux terminaisons intactes des cellules rétiniennees. Le cerveau reçoit ainsi des signaux électriques qu'il interprète comme une image.

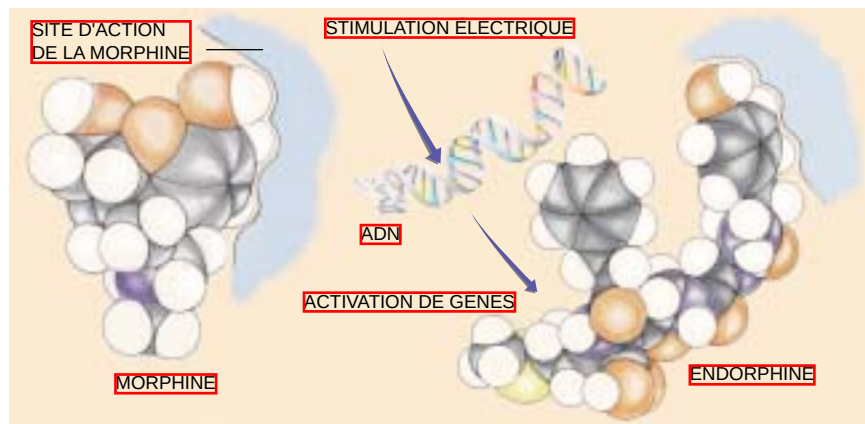
Électricité contre douleurs

Certaines douleurs rebelles cèdent à la stimulation électrique.

Les douleurs chroniques, associées notamment aux cancers, finissent par devenir insupportables et, à terme, seuls les opiacés les soulagent. Malheureusement, ces substances ont des effets secondaires désagréables, tels des vomissements, et on doit souvent augmenter les doses, car l'effet de tolérance diminue leur efficacité. Or, l'électrostimulation cérébrale, par des courants de haute fréquence, potentialise l'action analgésique de la morphine.

L'électrostimulation cérébrale transcutanée a été découverte en 1972 par Aymé Limoge, à l'Université Paris v. On place une électrode (le pôle négatif) au-dessus du nez et deux autres derrière les oreilles (pôles positifs). Le courant appliqué a une fréquence égale à 166 kilohertz (d'après des calculs théoriques, cette fréquence serait la plus efficace pour les tissus biologiques), et correspond à des courants de 100 milliampères délivrés 100 fois par seconde. Cette stimulation est parfaitement indolore ; elle peut être appliquée en continu pendant plusieurs jours (cinq en moyenne).

La méthode est utilisée depuis plusieurs années, notamment dans les services de psychiatrie de l'Hôpital Charles Perrens de Bordeaux, pour éviter le syndrome de sevrage, lors des cures de



L'ÉLECTROSTIMULATION activerait certains gènes, vraisemblablement ceux qui codent les endorphines, des substances analgésiques naturellement synthétisées par l'organisme et qui, pour agir, se fixent sur le site d'action de la morphine.

désintoxication des personnes dépendantes de l'héroïne ou de la morphine. Plus de 6 000 sevrages ont ainsi été réalisés sous électrostimulation. On a également constaté que la méthode renforce les effets des substances anesthésiques et les effets analgésiques de la morphine.

Quel sont les mécanismes de cette action ? Si l'effet est prouvé, les mécanismes restent à démontrer. Luis Stinus, de l'unité CNRS UMR 5541, à Bordeaux, a reçu le prix 1998 de l'Institut électricité santé, pour poursuivre l'étude des mécanismes neurobiologiques responsables de l'action de l'électricité contre les douleurs chroniques rebelles. Aujourd'hui, quelques hypothèses sont à l'étude. Il semble que la stimulation électrique déclenche la production des substances analgésiques que le système nerveux produit naturellement, les endorphines. Les premières expériences ont montré, sur l'animal, qu'une stimulation électrique active certains gènes : c'est le cas du

gène *c-fos*, un gène précoce, c'est-à-dire parmi les premiers à s'exprimer au cours d'une cascade d'activation génique. Un tel marqueur d'activation indique que des gènes sont activés par une stimulation électrique. Puisque cette stimulation calme la douleur, des médiateurs de l'analgésie, notamment des endorphines, sont vraisemblablement produits. Outre la libération d'endorphines, d'autres mécanismes interviennent peut être, telle l'inhibition des systèmes anti-opiacés : certains neurones s'opposent à l'action des morphiniques, et la stimulation électrique les inactiverait.

Cette méthode ne suffit pas, à elle seule à inhiber une douleur rebelle, mais, associée à la morphine, elle en potentialise l'effet analgésique, ce qui permet de diminuer les doses et, par conséquent, les effets secondaires. La stimulation électrique n'engendre aucune accoutumance ni aucun syndrome de sevrage. Reste à préciser son mode d'action.

Du mou au dur

On comprend la fossilisation des tissus mous.

Que reste-t-il des animaux fossiles ? Bien trop souvent, les paléontologues se contentent de reconstituer la forme, la biologie et l'aspect de l'animal à partir de fragments d'os ou de coquille. Ils ont trop rarement la chance de découvrir des gisements fossilifères où les parties molles des organismes vivants sont conservées, minéralisées avec de nombreux détails, comme dans les schistes de Burgess, au Canada, et dans les schistes de Soom, récemment découverts en Afrique du Sud. Plusieurs équipes britanniques ont étudié le

mécanisme de fossilisation dans ces gisements.

Les schistes de Soom contiennent des fossiles de l'Ordovicien (il y a 510 à 440 millions d'années), parmi lesquels des animaux sans squelette, que l'on ne sait rattacher à aucun groupe connu, vivant ou éteint. Les détails d'autres fossiles précisent la structure d'animaux déjà connus, tels les conodontes, ancêtres possibles des vertébrés. Les restes du conodonte géant *Promissum*, dont la longueur totale est estimée à 40 centimètres, permettent ainsi de localiser son œil, au-dessus et en avant de l'appareil buccal, réseau de 19 éléments denticulés avec lesquels l'animal saisissait et écrasait ses proies, et d'identifier les muscles oculaires et les muscles du corps. La musculature de l'œil, indique que ces animaux primitifs possè-

dent déjà une ébauche de tête, qui contient une partie du système nerveux central.

L'étude au microscope électronique des fibres musculaires de ce conodonte révèle des ressemblances avec des muscles de poissons conservés dans la Formation Santana, au Brésil. La précision des détails anatomiques va jusqu'au niveau macromoléculaire : les fibres du muscle strié sont conservées, montrant les fibrilles et même les noyaux cellulaires le long des fibres musculaires.

Dans la Formation Santana, comme dans les gisements de Holzmaden, en Allemagne, et de Voltzia, dans les Vosges, les tissus mous ont été remplacés par du phosphate de calcium. Après la mort d'un organisme, celui-ci est recouvert d'un voile bactérien, qui, en particulier, maintient une acidité favorable à la minéralisation. Les

Un nouvel antiviral.

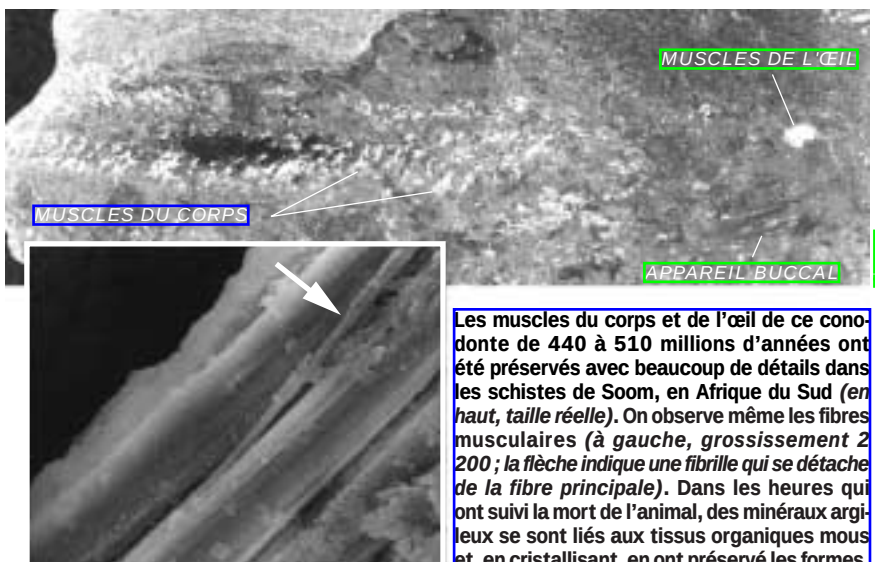
Pour empêcher le VIH, le virus du SIDA, de se multiplier, on dispose de substances qui inhibent des enzymes indispensables à la réplication : la transcriptase inverse et la protéase. Une nouvelle cible possible serait la protéine Tat qui participe à la régulation de l'expression de certains gènes du virus. Une cellule saine en fabrique peu, mais une cellule infectée par le VIH en synthétise une quantité telle, qu'une partie sort de la cellule. La fraction extracellulaire perturbe alors les réactions immunitaires des cellules non infectées. Des chercheurs marseillais et nantais ont étudié la structure de la protéine Tat, puis ils ont modélisé et synthétisé une famille de petites molécules nommées TDS : ces dernières se fixent, *in vitro*, sur la protéine Tat et bloquent son activité en modifiant sa conformation.

La générosité paye

Si l'on s'interroge toujours sur l'influence de l'attention parentale sur le devenir des enfants, il semblerait que l'on ne puisse douter de l'effet bénéfique sur les parents des soins apportés aux enfants. John Allman, de l'Institut de Technologie de Californie, a montré que chez 10 espèces différentes de primates, les parents qui élèvent leurs enfants vivent plus vieux, quelque soit leur sexe, que ceux qui s'en désintéressent. Ainsi les singes mâles titi, qui s'occupent de leur petits, vivent-ils 20 pour cent plus longtemps que les femelles.

Pôle chaud

À la fin du Crétacé, il y a entre 92 à 86 millions d'années, le climat de l'Arctique était plus clément qu'aujourd'hui : la température moyenne annuelle était d'environ 14 °C. C'est la conclusion à laquelle sont parvenus J. Tarduno, de l'Université de Rochester, et ses collègues. Ils ont en effet constaté la présence, dans l'île Axel Heiberg, alors à une latitude voisine de 72 degrés Nord (plus au Nord que le Nord de la Norvège actuelle), de fossiles de champsoaures, reptiles semi-aquatiques ressemblant aux crocodiles et qui n'auraient pas prospéré à des températures plus froides.



Les muscles du corps et de l'œil de ce conodont de 440 à 510 millions d'années ont été préservés avec beaucoup de détails dans les schistes de Soom, en Afrique du Sud (en haut, taille réelle). On observe même les fibres musculaires (à gauche, grossissement 2 200 ; la flèche indique une fibrille qui se détache de la fibre principale). Dans les heures qui ont suivi la mort de l'animal, des minéraux argileux se sont liés aux tissus organiques mous et, en cristallisant, en ont préservé les formes.

tissus mous (la peau, les muscles, les branchies et les organes internes) se décomposent sous l'action des bactéries, libérant du phosphate de calcium, qui cristallise en place. Cette cristallisation semble favorisée par la présence des mêmes bactéries. L'environnement fournit aussi du phosphate, qui permet la minéralisation complète des tissus. Ce mécanisme ressemble aux processus de biominéralisation qui interviennent, chez les vertébrés, dans la formation des os, constitués d'apatite, un phosphate de calcium.

Dans les schistes de Soom, comme dans ceux de Burgess, l'empreinte des structures organiques est conservée dans des minéraux argileux (des silicates hydratés). Des paléontologues ont pensé que l'argile avait remplacé des cristaux de phosphate de calcium déposés, comme dans la Formation Santana, lors d'une première étape de fossilisation. Toutefois, selon Sarah Gabbott, de l'Université de Leicester, lors du dépôt, l'environnement géochimique du bas-

sin sédimentaire, notamment la forte acidité, était défavorable à la concentration et à la précipitation des phosphates. Par ailleurs, un remplacement du phosphate par de l'argile aurait conduit à une perte des détails, avec des particules plus grosses. Or, la taille des particules argileuses, de un nanomètre à un micromètre, est du même ordre que celle des cristaux de phosphate de calcium dans la Formation Santana. Comme, en milieu acide et en présence d'ions chargés positivement, les silicates se fixent sur les substrats organiques, les tissus mous des organismes des schistes de Soom ont certainement été remplacés directement par des minéraux argileux.

Une légende juive rapporte que l'on peut insuffler la vie à un golem, créature modelée dans l'argile, à l'aide d'un verset de la Bible. Aujourd'hui, ce sont au contraire les «golems» inanimés de Soom et de Burgess qui apportent de précieuses connaissances sur l'origine de la vie animale.

Valérie MARTIN-ROLLAND

Cent millions de débris sous la mer

On compte les déchets solides le long des côtes.

L'activité humaine produit des déchets, dont une partie est déversée dans la mer, directement, par des navires, ou indirectement, par des rejets côtiers. La répartition et l'abondance des déchets flottants, et leur accumulation sur les plages, sont assez bien connues. Cependant, depuis quelques

années, l'utilisation massive de matières plastiques a augmenté le nombre des déchets solides, qui tombent au fond de la mer. Que deviennent ces déchets «invisibles»? L'IFREMER a entrepris leur comptage au large des côtes européennes : ils sont importants et inégalement répartis.

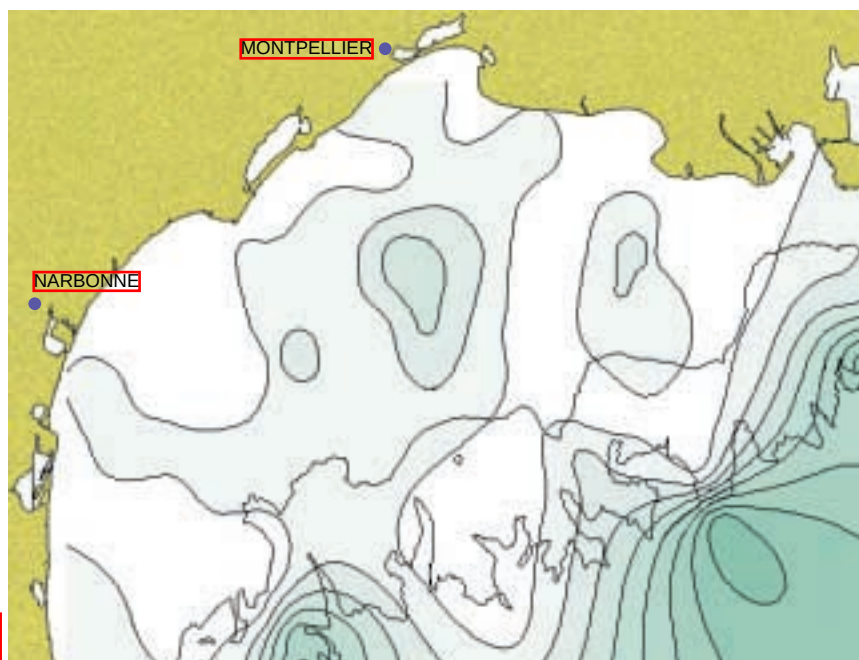
Entre 1992 et 1998, nous avons mené plus de 25 campagnes de mesure des déchets. Nous avons surtout utilisé le chalutage : les déchets ramassés au fond sont remontés et comptés. Dans les zones où le fond marin est trop irrégulier et profond, nous avons aussi compté directement les objets visibles sur le fond, avec les submersibles CYANA et NAUTILE.

Les quantités de déchets ainsi répertoriés varient selon les bassins : ils sont très abondants en Méditerranée et moins nombreux en Europe du Nord et dans la Manche. Au total, il y en aurait plus de 300 millions, 85 millions et 100 millions respectivement pour le bassin Nord-Ouest de la Méditerranée, et pour les plateaux continentaux de la mer Celtique et de la mer du Nord, soit des densités moyennes de 19,35, 0,18 et 1,55 débris à l'hectare.

Les répartitions sont toutefois hétérogènes. Ainsi, on trouve de grandes zones d'accumulation au large, notamment en mer du Nord (à 370 kilomètres à l'Ouest du Danemark), dans le Sud de la mer Celte, à 50 kilomètres au large de la Gironde et dans le lit profond de certains fleuves méditerranéens, le Rhône par exemple. Ces accumulations sont dues principalement à l'apport des courants marins et à celui des grands fleuves côtiers (pour la Gironde et le Rhône). L'homme contribue aussi à leur formation par des rejets directs, sur des zones de pêche ou sur des routes de navires très fréquentées.

A une échelle de quelques dizaines de kilomètres, des différences de répartition existent aussi. Des concentrations urbaines et des fleuves régionaux, tels que le Var ou l'Adour, sont à l'origine d'accumulations. Des structures géomorphologiques, des îles ou des canyons littoraux par exemple, rassemblent aussi les déchets dans des zones de faible turbulence et de grande profondeur. Nous avons ainsi mesuré des densités supérieures à 500 débris à l'hectare dans la plaine abyssale méditerranéenne, et les densités les plus importantes (plus de 1 000 débris à l'hectare) sont trouvées sur la côte française Sud-Est.

Comme nous le présentons, les objets et les fragments de matières plastiques sont largement majoritaires parmi ces débris : plus de 80 pour cent.



Dans le golfe du Lion, en Méditerranée, les déchets solides des activités humaines (du plastique pour 80 pour cent des objets), rejetés le long des côtes, par les fleuves, ou directement par les navires, s'accumulent dans des canyons littoraux (la couleur verte est d'autant plus intense que la densité de déchets est grande).

Les emballages (bouteilles, sacs...) en fournissent la plus grande part. Toutefois, localement, les débris issus de l'activité de pêche – fils, cordages ou morceaux de filets – peuvent être majoritaires.

Nous ne mesurons pas encore toutes les conséquences de la présence de ces déchets. Nous savons toutefois que les déchets flottants menacent les grands animaux marins, cétacés, thons et tortues, qui s'étranglent ou s'étouffent lorsqu'ils les absorbent. L'équilibre de la faune qui vit dans les premières couches de sédiments a aussi été modifié, localement, sous des accumulations de débris. Dans les zones profondes, ces modifications seront durables : dans l'obscurité et avec de faibles concentrations en oxygène, les plastiques se dégradent lentement. Ailleurs, en raison de leur abondance et de leur constitution chimique, les plastiques pourraient modifier le cycle du carbone.

Peut-être les conséquences plus immédiates de ces déchets sur la navigation permettront-elles de prendre en compte ce risque écologique à moyen et long terme : les pêcheurs voient leurs filets colmatés par des débris solides, et les organismes de sécurité maritime secourent de plus en plus d'embarcations dont l'hélice est bloquée ou dont les prises d'eau sont obstruées par des déchets.

François GALGANI, IFREMER

État de veille prolongé

Une substance extraite d'algues stimule la protection des plantes contre les agents pathogènes.

La question de la dégradation de l'environnement par l'utilisation massive de pesticides est récurrente. Comment peut-on préserver la qualité des sols et des réserves d'eau sans diminuer les rendements ? Les Laboratoires Goëmar, à Saint-Malo, proposent une solution : un extrait d'algue stimule les réactions naturelles de défense des plantes.

Les plantes sans cesse soumises aux agressions de divers agents pathogènes, tels les insectes ou les champignons, ont élaboré des moyens de défense. Le déclenchement des réactions de défense, très efficaces, est spécifique de l'agent infectieux. La reconnaissance est immédiate et les réactions sont alors si violentes que, localement, les cellules infectées meurent ; de vigoureuses réactions de défense se mettent en place dans les cellules voisines, qui sont bien protégées. En plus des réactions locales, violentes, se met en place, dans toute la plante, un « état de veille » qui prépare la plante à mieux réagir à toute nouvelle agression.

Dès qu'un agent pathogène est détecté, les barrières de résistance mécanique des cellules sont renforcées : la paroi cellulaire s'épaissit, et des mécanismes de polymérisation la rendent plus résistante aux enzymes des micro-organismes pathogènes qui, sinon, la digèrent et pénètrent dans les cellules. Cette réaction, immédiate, s'accompagne de la production de substances oxydantes très réactives (telle l'eau oxygénée, H_2O_2). Elle est suivie, plusieurs dizaines de minutes à quelques heures plus tard, d'autres réactions, telle la stimulation de certaines voies métaboliques secondaires (par exemple la libération d'acide salicylique) et, enfin, de la production de substances qui ont



Les laminaires sont des algues contenant une substance, la laminarine, qui stimule les défenses naturelles des plantes cultivées.

une activité antimicrobienne. Lorsque les réactions de défense sont déclenchées, la panoplie est suffisante pour venir à bout de l'attaquant. Pourquoi toutes les plantes ne parviennent-elles pas à se défendre seules? Parce qu'elles ne reconnaissent pas toujours qu'elles sont menacées. On peut améliorer cette reconnaissance grâce à des substances nommées éliciteurs, qui déclenchent le système d'alarme.

Parmi les composés excrétés par les micro-organismes pathogènes et qui déclenchent les réactions de défense,

certaines ressemblent à des substances présentes dans les algues marines, notamment à la laminarine, extraite des laminaires. La laminarine améliore-t-elle la reconnaissance des agents pathogènes? Bernard Fritig et ses collègues de l'Institut de biologie moléculaire des plantes, à Strasbourg, ont montré que tous les stades de la cascade des réactions de défense sont effectivement activés : on constate, par exemple, la libération de substances oxydantes (H_2O_2), d'acide salicylique et de

protéines antimicrobiennes. La laminarine stimule les défenses naturelles de l'immunité générale des plantes.

Quelques jours après l'application de laminarine, même à très faible dose, la plante se met en état de veille : lors de l'attaque d'un micro-organisme pathogène, moins de cellules sont infectées et les sites infectés sont plus rapidement circonscrits. La résistance vis-à-vis des agents pathogènes est accrue. La stratégie de mise en veille permanente a l'intérêt de ne pas mobiliser sans cesse les défenses.

Des essais ont été conduits sur le blé atteint de septoriose, un champignon qui fait jaunir les feuilles et détruit une partie de la récolte. La pulvérisation de laminarine renforce l'action du fongicide, de sorte que les quantités nécessaires diminuent notablement. Trois jours sont nécessaires pour l'activation des réactions de défense et l'efficacité maximale est atteinte en sept jours. La laminarine donne à la plante la possibilité de s'autoprotéger contre les champignons pathogènes, elle potentialise l'efficacité des fongicides associés, elle n'est pas toxique et ne modifie pas les critères de qualité du blé traité, par exemple la qualité des graines ou de la farine. De surcroît, elle peut être purifiée en abondance à partir des algues.

D'Afrique en Asie

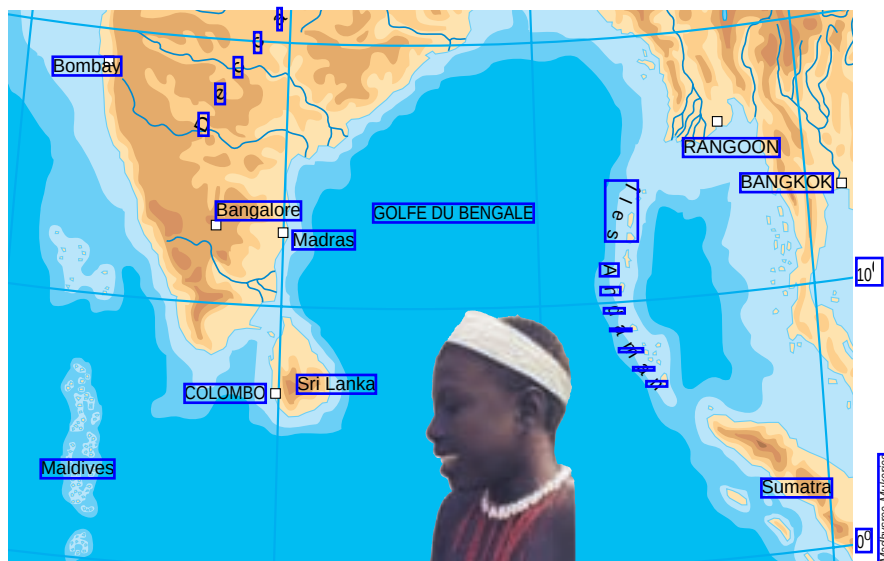
Des analyses génétiques relient des chasseurs-cueilleurs asiatiques aux pygmées africains.

La ressemblance des indigènes des îles Andaman, dans le golfe du Bengale, avec les pygmées africains a été notée depuis longtemps. Des environnements forestiers et tropicaux analogues auraient-ils favorisé l'émergence des mêmes caractéristiques physiques, telles que la pigmentation brune et la petite taille? Une étude génétique indique que les deux populations sont en fait très proches : les habitants des îles Andaman descendraient directement des premiers hommes qui ont migré d'Afrique en Asie.

Carlos Lalueza Fox, à l'Université de Cambridge, a extrait de l'ADN de 42 échantillons de cheveux d'indigènes des îles Andaman, collectés en 1907 par l'anthropologue britannique Alfred Radcliffe-Brown. Il en a isolé et analysé un petit segment provenant des mito-

chondries, organites responsables de la respiration cellulaire. L'ADN des mitochondries, moins directement responsable des caractéristiques physiques des individus que l'ADN des chromosomes, serait moins sensible aux pressions de

la sélection naturelle. La comparaison avec le segment d'ADN équivalent d'autres populations révèle une proximité plus grande avec les populations africaines, surtout avec les pygmées Sud-africains, qu'avec les populations asiatiques.



Les habitants des îles Andaman, dans le golfe du Bengale, ressemblent aux pygmées Sud-africains : ils descendent directement des premiers hommes qui ont peuplé l'Asie.

Ce résultat est un argument de plus en faveur de la théorie de l'origine africaine de l'homme : les premiers hommes seraient partis d'Afrique il y a 100 000 ans, entrant en Asie il y a 60 000 ans. Selon Peter Bellwood, de l'Université de Canberra, certains de ces chasseurs-cueilleurs ont migré vers le Sud, en Nouvelle-Guinée et en Australie, pendant la dernière glaciation, il y a 40 000 ans : une partie de l'eau des océans était prise dans les calottes polaires et dans des glaciers, et le niveau de la mer était plus bas qu'aujourd'hui. L'Asie était alors beaucoup plus étendue, et de nombreuses îles actuelles étaient accessibles à pied sec.

Les plus anciennes traces d'occupation humaine dans les îles Andaman n'ont que 2 200 ans. Toutefois, P. Bellwood pense qu'elles ont été peuplées dès la première vague de migration humaine, il y a au moins 35 000 ans. Puis la mer est

remontée et les a isolées. Le niveau de la mer a ensuite varié plusieurs fois : il a atteint sa position actuelle il y a 10 000 ans. La mythologie des îles Andaman décrit de violents orages et un déluge qui a noyé les îles, obligeant les survivants à se réfugier au sommet des collines.

Presque tous les premiers colonisateurs de l'Asie ont été supplantés par des migrants postérieurs ; seuls ont survécu ceux qui étaient dans des régions isolées et bien défendues. Les habitants des îles Andaman durent leur survie, au moins jusqu'à l'époque moderne, à leur opposition déterminée à tout débarquement d'étrangers. Aujourd'hui encore, les habitants de la petite île Sentinelle septentrionale attaquent à coups de flèches toute embarcation qui approche.

La théorie de l'origine africaine a reçu récemment un autre soutien d'une étude génétique de la population chinoise. La

diversité de l'ADN prélevé dans 28 groupes ethniques de Chine et de Taïwan est très faible : ces groupes auraient eu peu de temps pour se différencier, et ils descendraient tous de migrants africains.

La théorie adverse, l'évolution multirégionale, soutient que les hommes actuels sont issus de l'évolution simultanée dans différentes parties du monde de populations d'*Homo erectus*, espèce aussi originaire d'Afrique, mais qui en est sortie il y a un ou deux millions d'années. Ces groupes n'auraient constitué qu'une seule espèce grâce à des échanges de gènes entre eux. Pour certains paléoanthropologues, cette théorie serait confortée par une continuité des fossiles découvertes en Chine entre *Homo erectus* et les populations chinoises actuelles. L'étude de C. Lalueza Fox semble, une fois de plus, leur donner tort.

Cultures de cellules souches embryonnaires

On saura bientôt cultiver des lignées cellulaires dérivées de cellules souches humaines.

Les cellules souches embryonnaires dérivent de cellules totipotentes des embryons précoces de mammifères ; elles peuvent proliférer, *in vitro*, dans un milieu de culture approprié, sans se différencier. C'est ainsi que l'on sait maintenant, *in vitro*, des cellules non différenciées de souris et, en changeant les conditions de culture, déclencher la différenciation en divers types cellulaires.

Si l'on disposait de réserves de cellules humaines différenciées, peut-être

pourrait-on, un jour, transplanter des neurones détruits par la maladie de Parkinson, des cellules cardiaques endommagées par un infarctus, des cellules de Langerhans qui ne produisent plus d'insuline chez les diabétiques, ou encore des cellules de peau pour les grands brûlés. Or, James Thomson et ses collègues du Centre de recherche sur les primates de Madison, de l'Université du Wisconsin et du Centre médical de Haifa ont réussi à obtenir cinq lignées de cellules souches embryonnaires indépendantes à partir des cellules internes d'embryons humains de six jours, nommés blastocystes.

Ces lignées cellulaires non différenciées ont été cultivées pendant cinq à six mois sur des cellules épithéliales de souris qui fournissent les facteurs de croissance indispensables à la réplication cellulaire, et en présence d'un facteur inhibant la différenciation. Des clones de cellules totipotentes ont ainsi été obtenus. On constate une intense activité de la télomérase : cette enzyme assure que le télomère (l'extrémité des chromosomes empêchant qu'ils ne « s'effilochent ») conserve une longueur correcte. Dans les cellules dépourvues de télomérase, les télomères raccourcissent avec l'âge et les cellules entrent en sénescence après un nombre limité de réplifications. Au contraire, une lignée qui synthétise assez de télomérase est quasi immortelle. Le génome des lignées de cellules totipotentes obtenues est normal, et ces cellules expriment les marqueurs spécifiques des cellules souches.

Pour s'assurer que les cellules cultivées ne perdent pas leurs propriétés de totipotence, J. Thomson et ses collègues

ont injecté quelques cellules dans des souris immunodéficientes, c'est-à-dire qui ne rejettent pas les tissus greffés. Ces cellules se sont différenciées en donnant naissance à tous les tissus embryonnaires.

Après s'être multipliées pendant plusieurs mois sans se différencier, les cellules souches embryonnaires conservent la possibilité de se différencier en cellules épithéliales, en cellules musculaires, osseuses ou cartilagineuses, ou en neurones. Pour disposer de telles cellules, encore faudra-t-il imposer la différenciation des cellules totipotentes c'est-à-dire trouver comment produire, « à la demande » tel ou tel type de cellules. Si on les obtient, on pourrait éviter le rejet de ces cellules en disposant de banques de cellules ayant des complexes majeurs d'histocompatibilité bien établis ; on pourrait même créer des lignées de cellules souches qui seraient modifiées pour contenir le génome du receveur (l'organisme les considérerait alors comme faisant partie du soi, et ne les rejetterait pas).

Ces recherches soulèvent la question éthique des recherches sur les embryons humains : peut-on prélever des cellules embryonnaires ? Quels sont les risques de clonage humain ? Quels sont les risques de modification des lignées germinales (les cellules qui se différencient en cellules sexuelles) ? Aux États-Unis, les recherches sur les cellules souches sont autorisées à condition que l'embryon ne soit pas créé à des fins de recherches. Dans le cas présent, les embryons utilisés ont été produits par fécondation *in vitro* et les couples concernés ont donné leur consentement pour que des recherches soient entreprises sur les embryons surnuméraires.



CNR

On sait désormais maintenir en vie des lignées de cellules embryonnaires humaines dérivées de tels embryons, au stade de quelques cellules.

Les nouveaux Noé

Les animaux de la Bible reviennent en Israël.

Connais-tu le moment où les bouquetins font leurs petits ? As-tu déjà observé leurs femelles quand elles enfantent ?

Ces questions de zoologie, c'est le Créateur lui-même qui les pose, dans le *Livre de Job*. Les scientifiques israéliens ont ainsi trouvé dans la Bible des évocations précises de la faune et de la flore palestiniennes d'il y a 2 000 ans et plus. Depuis 30 ans, le projet d'Haï Bar ramène en Israël des animaux « bibliques », en s'appuyant aussi sur des fouilles archéologiques et sur des récits postérieurs. Récemment, quelques autruches, mentionnées dans le *Livre de Job*, et une vingtaine d'antilopes oryx d'Arabie, appelées « licornes » dans le *Livre des Nombres*, ont ainsi été réintroduites dans le Sud du pays.

Les autruches sont venues d'Éthiopie, les antilopes du Sahara et de zoos du monde entier, et des ânes sauvages ont été importés d'Iran et de Mongolie. Avant de les relâcher, on regroupe ces animaux des milieux désertiques dans un enclos de 16 kilomètres carrés, dans le désert d'Arava, à l'extrême Sud d'Israël, où ils s'acclimatent et se reproduisent. Les autruches et les antilopes africaines ne sont pas dépayssées dans cette savane, la plus septentrionale du monde. Chaque matin, on leur fournit un surplus de nourriture pour qu'elles ne menacent pas les maigres pâturages ni les acacias. Une autre réserve, dans le Nord du pays, en milieu méditerranéen, accueille des daims de Mésopotamie, venus d'Iran, et des chevreuils d'origine française, tandis qu'un troisième espace protégé, dans le centre

du pays, est consacré à la réintroduction de la flore.

Les premiers relâchés ont été les ânes sauvages : en 1982, trois couples ont été remis en liberté dans le désert du Néguev ; ils sont aujourd'hui près d'une centaine. Dans le Nord, des daims de Mésopotamie ont été remis en liberté en Haute Galilée, et des vautours fauves sur le mont Carmel.

La réintroduction des oryx en Israël a été précédée d'expériences similaires, menées avec succès par des États arabes. Cette espèce avait totalement disparu à l'état sauvage et ne doit sa survie qu'à des spécimens détenus dans des zoos. Toutefois, de nouveaux lâchers ne sont pas prévus : il y a peu de place pour les grands herbivores dans le petit morceau de désert israélien, encadré par les frontières avec la Jordanie et avec l'Égypte, des zones militaires et les champs des kibboutz.

La nature « biblique » des animaux n'est pas indispensable à leur hébergement en Israël. Ainsi, l'antilope addax du Sahara, reconnaissable à ses cornes torsadées, n'y avait sans doute jamais vécu, bien que certains aient cru en trouver mention dans la Bible. Mais victime d'une chasse intensive, l'addax est l'une des espèces les plus menacées de la planète, et les Israéliens ont décidé d'en élever chez eux. Ils espèrent ensuite les remettre en liberté dans les pays dont ils ont disparu : Sénégal, Tunisie, Maroc. À condition que leur sécurité y soit garantie...

Aujourd'hui, Israël est en effet le seul pays de la région où les gazelles et les outardes ne sont pas pourchassées. Toutes les espèces sauvages existant encore dans le pays (bouquetins, gazelles, loups, léopards) sont protégées. La préservation des milieux naturels est malheureusement moins satisfaisante : seuls les espaces impropres à l'agriculture et à l'urbanisation ont survécu à 50 ans de colonisation.

Jérôme TUBIANA



De profil, l'oryx d'Arabie semble n'avoir qu'une seule corne : c'est la « licorne » de l'Ancien Testament. Il vient d'être réintroduit en Israël, d'où il avait disparu.

Le jour où le ciel s'enflamma

JEFFREY WYNN • EUGENE SHOEMAKER

***Une météorite
a creusé
trois cratères
au milieu du désert.***

Au milieu du désert Rub'al-Khali, en Arabie Saoudite, de vastes dunes de sable grisâtre, mouvantes, s'étendent à perte de vue : pas un seul rocher à l'horizon. Au crépuscule, bien que le soleil soit couché, la température de l'air est encore de 50 °C, et le vent souffle du Sud, au début du printemps.

Soudain, un point lumineux apparaît à l'horizon. Son éclat augmente et, en quelques secondes, quatre traînées fulgurantes au moins traversent le ciel. Des objets brillants filent silencieusement, puis heurtent le sol avec un bruit de tonnerre assourdissant. Le sol se soulève, et une onde de choc souffle tout à plus de 100 mètres. Un rideau de sable incandescent s'élève dans le ciel.

Des pierres blanches traversent les airs et sont absorbées par le sable fondu par la chaleur de l'impact. Quelques-unes retombent sur le sol, aspergées d'une pellicule visqueuse et luisante semblable à de la peinture blanche qui se solidifie en quelques secondes, virant au jaune, puis à l'orange, au rouge et, enfin, au noir. Les pierres totalement recouvertes de cette substance noire deviennent poreuses, vitreuses, et si légères qu'elles flotteraient sur l'eau s'il y en avait dans cet enfer.

La brise emporte alors un champignon incandescent aux couleurs de l'arc-en-ciel. Puis, il pleut du verre fondu. Tout est obscurci.

Quand cette scène s'est-elle produite ? Si elle a eu des témoins, ce qui



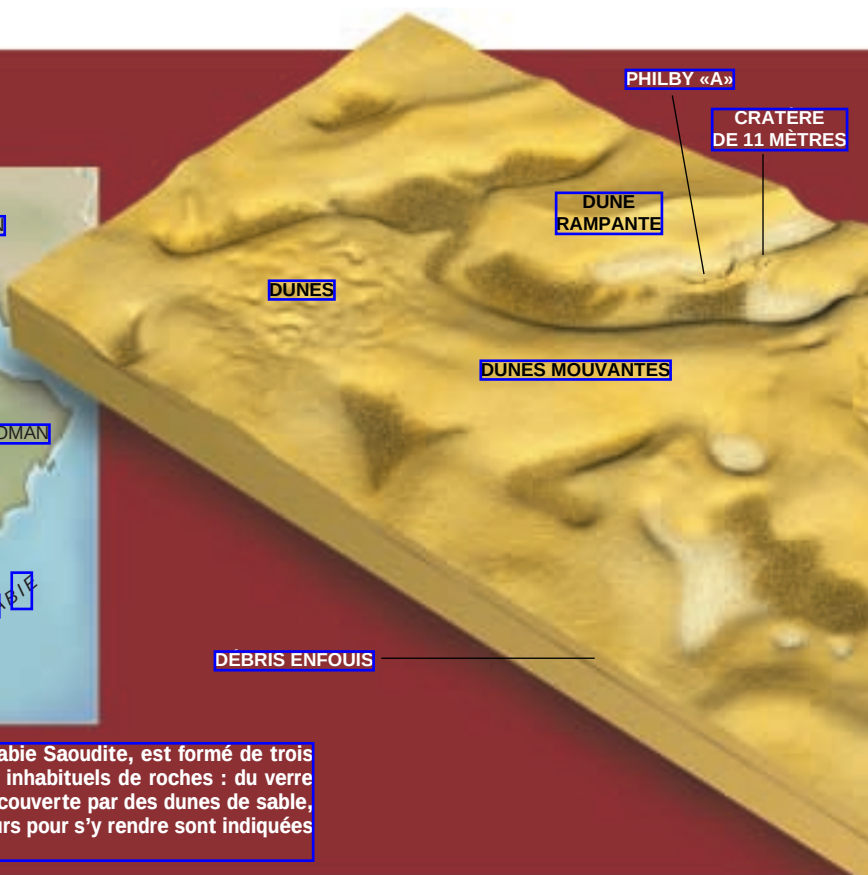
est peu probable, ils n'ont jamais pu la décrire. Depuis des générations, les bédouins al-Murra nomment al-Hadida, «les choses de fer», une région étrange, d'un demi-kilomètre carré, couverte de verre noir, de cailloux blancs et de scories de fer.

Le Coran et d'autres textes arabes relatent la destruction, par un nuage noir emmené sur les ailes d'un grand vent, de la ville d'Ubar, en punition de l'impiété de son roi, qui s'était moqué d'un prophète. En 1932, alors que l'explora-

teur britannique Harry Philby voyage dans le Rub'al-Khali, ses guides lui proposent de le conduire sur les ruines de cette cité perdue. Philby, qui nomme le site Wabar, n'y découvre aucun vestige humain (le site d'Ubar a été repéré en 1992 environ 400 kilomètres plus au Sud grâce à des photographies prises par un satellite), mais il observe les restes d'un cataclysme entièrement minéral : la chute d'une météorite. L'énergie dégagée par la collision aurait été proche de celle qui fut libérée à Hiroshima.

L'impact de Wabar n'a pas été le plus violent qu'ait subi notre planète. C'est toutefois l'un de ceux dont on a le plus de traces et, peut-être, le plus simple géologiquement : alors que les météorites heurtent le plus souvent des roches dures ou des roches couvertes d'une mince pellicule de sol ou d'eau, celle de Wabar est tombée dans un environnement très uniforme, la plus grande mer de sable du Globe. En outre, c'est l'un des 17 sites d'impact, sur près de 160 connus, où l'on retrouve





1. LE SITE DE WABAR, dans le désert Rub'al-Khali, en Arabie Saoudite, est formé de trois cratères et recouvert d'une mince couche de deux types inhabituels de roches : du verre noir et de l'«impactite». La majeure partie du site a été recouverte par des dunes de sable, en constant déplacement. Les routes suivies par les auteurs pour s'y rendre sont indiquées sur la carte.

des morceaux de la météorite. Trois expéditions sur place nous ont permis de décrire les étapes de la collision.

De nombreuses météorites ont heurté la Terre depuis sa formation, et le Système solaire ressemble toujours à un stand de tir : des objets tels que celui qui est tombé à Wabar menacent

les installations humaines. L'étude de Wabar et de sites semblables permet d'évaluer la fréquence des collisions : à défaut d'éviter le bombardement, nous pouvons au moins en connaître la fréquence.

À son arrivée à Wabar, Philby cherche des objets archéologiques et des

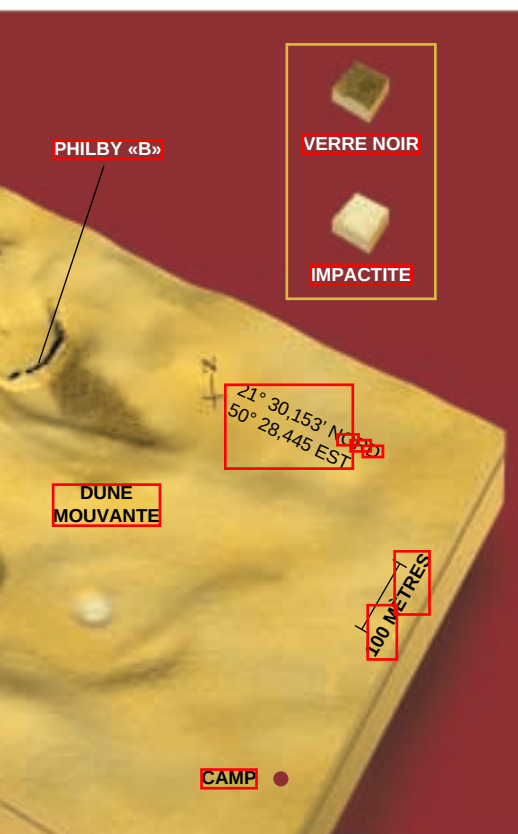
ruines. Il est vite déçu : il ne voit que des scories noires, des blocs de grès blanc et deux dépressions circulaires partiellement ensevelies, qui ressemblaient à des cratères volcaniques. Ces perles noires qui jonchent le sol ont-elles été portées par les femmes de la cité détruite ? Ce morceau de fer de 30 centimètres de long a-t-il été forgé par une civilisation ancienne ? Philby en vient à penser que ce fragment de métal oxydé n'est pas d'origine terrestre. Il a raison : cette roche contient 90 pour cent de fer, 3,5 à 5 pour cent de nickel et quatre à six parties par million d'iridium, élément plus rare sur la Terre, mais que l'on trouve fréquemment à de telles concentrations dans les météorites.

Trois cratères

Le site de Wabar mesure environ 500 mètres sur 1 000 mètres. On y trouve au moins trois cratères, de 116, 64 et 11 mètres de diamètre, presque entièrement remplis de sable. Leurs bords visibles sont formés de sable soulevé, consolidé dans un grès grossier et découlé, l'«impactite», et de grandes quantités de scories et de pelotes vitreuses noires. Ces bordures sablonneuses sont fragiles et facilement entamées par des traces de pneumatiques. On y trouve aussi quelques fragments d'un alliage



2. UN CRATÈRE PLEIN DE SABLE, de onze mètres de diamètre, a été découvert à Wabar en décembre 1994. Sous le sable, le cratère est tapissé d'impactite, un grès qui se forme lorsque des pressions et des températures énormes soudent les grains de sable ensemble. Juste à l'extérieur du cratère, on trouve des fragments de fer et de nickel de taille centimétrique. Ce cratère se serait formé quand une météorite métallique de un mètre de diamètre a percuté le sable. Cette météorite était le plus petit fragment des trois qui ont creusé des cratères à Wabar.



Carte : Laurie Grace / Illustration : S. M. H. R.

de fer et de nickel.

Comment savons-nous que ces cratères sont formés lors d'un impact météoritique plutôt que sous l'action de l'érosion ou du volcanisme ? L'impactite de Wabar est grossièrement stratifiée, comme d'autres grès, mais elle contient une alternance de couches de sable soudé et de vides. En outre, l'impactite contient de la coésite, une variété de quartz qui se forme à très haute pression. Ce minéral est rare à la surface de la Terre et a été observé sur les sites d'explosion nucléaire ou d'impact météoritique.

L'impactite est concentrée sur les bords Sud-Est et Est des cratères, mais presque absente des bords Nord et Ouest. Cette asymétrie proviendrait d'un impact oblique : les projectiles sont arrivés du Nord-Ouest, sur une trajectoire inclinée de 22 à 45 degrés par rapport à l'horizontale.

Les déchets de fer et de nickel, quasi absents du reste du désert, sont probablement des fragments de la météorite elle-même. On en trouve deux types. Dans le sable, ce sont des billes oxydées et friables, de diamètre inférieur à dix centimètres, semblables à celles que l'on trouve sur plusieurs sites

d'impact de météorites ferreuses. À la surface du sol, les fragments de fer et de nickel sont plutôt lisses et couverts d'une mince patine de vernis noir, comme de nombreuses roches du désert. Le plus gros bloc, nommé Bosse de chameau pèse 2 200 kilogrammes. Conique et aplati, il a été rapporté en 1965 à l'Université de Riyad. Il s'est probablement détaché de la météorite principale avant l'impact. Comme la surface d'un objet est proportionnelle au carré de son rayon, tandis que sa masse est proportionnelle au cube de son rayon, un objet plus petit a une surface proportionnellement plus grande et est donc proportionnellement plus freiné par l'air. Donc, un fragment est plus freiné que l'objet principal, et il peut rebondir sur le sol au lieu d'y creuser un cratère.

On trouve à Wabar un dernier type de roche caractéristique de la collision : un verre noir. Les sites d'impacts contiennent souvent des roches vitreuses qui se seraient formées à partir de poches de matière fondue, éjectée du cratère. Près des bords des cratères de Wabar, le verre noir ressemble superficiellement au pahoehoe hawaïen, une roche d'aspect cordé, plissée, qui se forme par refroidissement de coulées de lave épaisses. Plus loin, on trouve des gouttes solidifiées, de plus en plus petites à mesure que l'on s'éloigne des cratères. À 850 mètres au Nord-Ouest du cratère situé dans cette direction, le diamètre

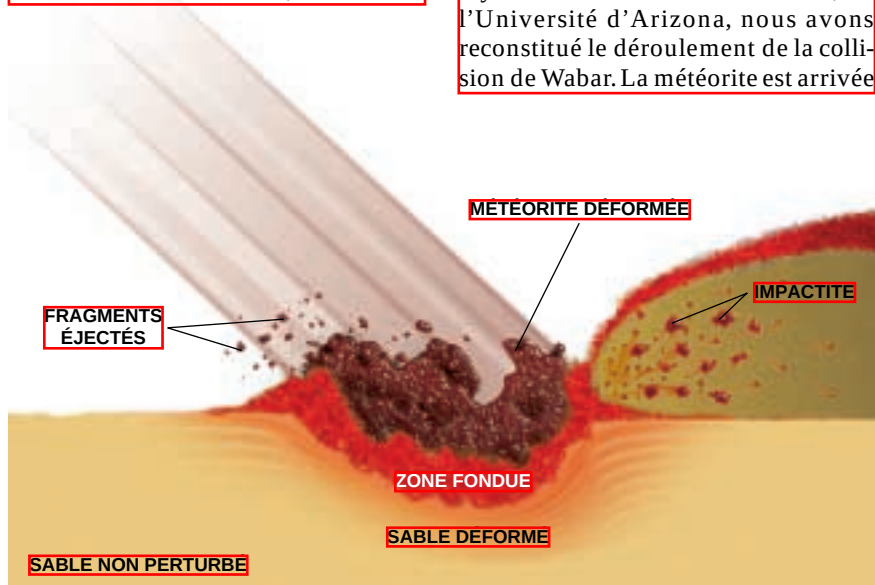
de ces gouttes n'est plus que de quelques millimètres et, s'il y en a au-delà, elles sont enfouies dans les dunes de sable. Ce verre est homogène : il contient 90 pour cent de sable local, qui en forme la matrice, et 10 pour cent de fer et de nickel, concentrés dans des inclusions. Certaines éclaboussures vitreuses sont si fines et si fragiles qu'elles se sont brisées pendant le transport, malgré toutes les précautions que nous avons prises.

La répartition du verre indique que le vent soufflait du Sud-Est au moment de l'impact. Au Nord du Rub'al-Khali, le vent souffle du Nord dix mois par an, mais il vire au Sud-Est au début du printemps, saison des tempêtes de sable et de la mousson dans la mer d'Arabie. Toute l'année, l'air est immobile au lever du soleil, mais le vent se lève au début de l'après-midi : au crépuscule, le vent souffle si fort que le sable fouette le visage du voyageur ; il ne cesse que vers minuit.

La faible diversité des roches que l'on trouve à Wabar indique que la météorite n'a pénétré que dans le sable et n'a pas atteint la roche sous-jacente. Nous n'avons d'ailleurs trouvé aucun affleurement de cette roche dans un rayon de 30 kilomètres.

Un freinage puissant

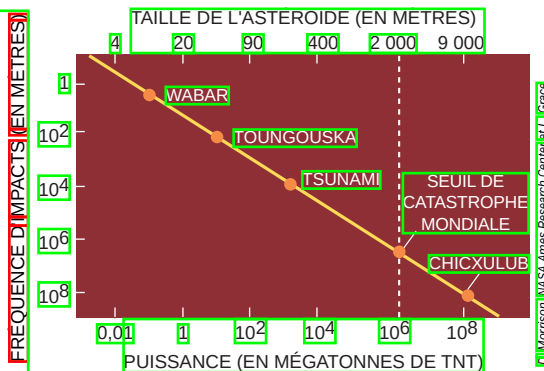
Grâce à nos relevés de terrain et aux simulations d'impacts effectuées par Jay Melosh et Elisabetta Pierazzo, de l'Université d'Arizona, nous avons reconstitué le déroulement de la collision de Wabar. La météorite est arrivée



3. CETTE COUPE D'UN IMPACT MÉTÉORITIQUE, réalisée à partir de simulations numériques, montre comment les cratères de Wabar se sont formés. La météorite s'est aplatie en touchant le sol ; une onde de choc l'a parcourue d'avant en arrière et en a éjecté des fragments ; le reste de la météorite a fondu et s'est amalgamé au sable sous-jacent ; le sable environnant a été comprimé en impactite. Cette dernière a alors été projetée en l'air avec une partie de la météorite fondue. Les couches de sable plus profondes ont été peu perturbées.

du Nord-Ouest en fin d'après-midi ou en début de soirée, probablement au début du printemps. Comme la plupart des météorites, elle a pénétré l'atmosphère à une vitesse de 11 à 17 kilomètres par seconde. Sa trajectoire, assez rasante, a été assez longue dans l'atmosphère : l'objet a été fortement freiné, parce qu'il arrivait dans les couches denses de l'atmosphère, près du sol. Ce freinage atmosphérique brise la majorité des météorites, qui explosent entre 8 et 12 kilomètres d'altitude, mais le projectile de Wabar, constitué de fer, a résisté plus longtemps. Toutefois, il s'est finalement disloqué en quatre fragments au moins et a ralenti jusqu'à la moitié de sa vitesse initiale : selon nos calculs, la vitesse d'impact a été de cinq à sept kilomètres par seconde, environ 20 fois plus grande que celle d'une balle de pistolet automatique.

Une relation générale entre la taille des météorites, celle des cratères et les vitesses d'impact a été déduite de calculs, d'expériences balistiques et d'observations d'explosions nucléaires. Dans une roche dure, le cratère est environ 20 fois plus grand que le projectile ; dans le sable, qui absorbe plus efficacement l'énergie de la collision, ce rapport est plutôt de 12. Ainsi, si le



4. LA FRÉQUENCE MOYENNE DES IMPACTS météoritiques sur la Terre est évaluée à partir de la quantité de débris présents dans le Système solaire et du nombre de cratères sur la Lune. Une météorite de deux kilomètres de diamètre, dont l'impact a des conséquences dans le monde entier, tombe en moyenne une fois tous les millions d'années. Dans ce graphique, la relation entre la taille et l'énergie dégagée par l'explosion est donnée pour des astéroïdes pierreux qui se déplacent à la vitesse de 20 kilomètres par seconde.

plus gros fragment est tombé à Wabar à cinq kilomètres par seconde, il avait un diamètre d'environ 9,5 mètres de diamètre. La météorite initiale avait une masse supérieure à 3 500 tonnes, et elle est entrée dans l'atmosphère avec une énergie cinétique équivalant à environ 100 kilotonnes de TNT. Lors de la collision, l'énergie cinétique du plus gros fragment était comprise entre 9 et 13 kilotonnes de TNT.

Autour du point d'impact, un rideau conique de fluide brûlant, mélange de

matériau météoritique et de sable, a jailli dans l'air et s'est dilaté à mesure que la météorite s'enfonçait dans le sol. Ce fluide, en refroidissant, est devenu le verre noir. Le projectile lui-même a été comprimé et aplati en quelques millisecondes.

Une onde de choc s'est propagée vers l'arrière de la météorite, éjectant lentement de petits fragments. Certains de ces débris ont été absorbés par le rideau incandescent, mais la plupart sont retombés dans le sable, jusqu'à 200 mètres de là : ce sont les vestiges inaltérés de la météorite. Le même phénomène arrache parfois des morceaux de la surface d'une planète sans les chauffer ni les comprimer beaucoup : on trouve des microstructures fragiles dans des météorites martiennes projetées dans l'espace, puis retombées sur Terre.

Une onde de choc s'est aussi propagée dans le sol, chauffant et mélangeant le sable. Les proportions de fer et de sable dans les billes vitreuses indiquent que la météorite s'est mélangée avec dix fois son volume de sable, soit un hémisphère de sable d'environ 27 mètres de diamètre pour le plus gros fragment. En dehors de ce volume, l'onde de choc, affaiblie par sa progression, n'a pas mélangé le sable mais l'a au contraire compacté en impactite.

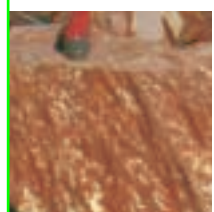
Repérer les cratères d'impact

Comment reconnaître les cratères d'impact ? La Lune, où il ne pleut pas et où il n'y a pas de dérive des continents, est couverte de cratères qui restent où ils sont pendant des temps très longs. Sur la Terre, au contraire, la surface est remodelée et lissée en permanence. En outre, d'autres phénomènes, tels le volcanisme ou l'érosion, creusent aussi des trous circulaires. Les géologues n'ont reconnu l'origine météoritique de certains cratères qu'au début du xx^e siècle, et on ne connaît aujourd'hui qu'environ 160 structures d'impact.

Deux pour cent des astéroïdes qui circulent dans le Système solaire interne sont constitués de fer et de nickel : l'origine extra-

terrestre de leurs fragments est facile à établir quand ils arrivent sur la Terre. D'autres types de météorites se camouflent parmi les roches terrestres. C'est dans l'Antarctique qu'on les repère le plus facilement, parce que l'on trouve peu d'autres roches au milieu des champs de glace. Ailleurs, la reconnaissance d'un cratère météoritique nécessite une cartographie minutieuse et un travail de laboratoire. Les géologues cherchent plusieurs caractéristiques distinctives des roches, qui résultent des vitesses et des pressions énormes mises en jeu lors de la collision. Même une éruption volcanique ne soumet pas les roches à des conditions si extrêmes.

Cônes d'éclat. Les roches que l'on trouve



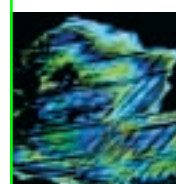
autour d'un cratère d'impact ont souvent un aspect qui évoque des cornets de glace ou des chevrons si les cônes sont fracturés longitudinalement. Aucun cône d'éclat n'apparaît à Wabar, parce que le site s'est formé dans du sable meuble.

Roches formées à haute température.

Des blocs de sable laminés et soudés ont été observés à Wabar et sur des sites d'essais nucléaires. En outre, des tectites (roches vitreuses qui se formeraient lorsque la roche fondue est éjectée dans l'atmosphère et se solidifie en retombant) sont présentes autour de nombreux sites d'impact.



Déformation microscopique des roches.



La structure cristalline de certains minéraux est transformée par les ondes de choc pendant l'impact. Le quartz, par exemple, est parcouru de fractures à différentes échelles, des clivages et des dislocations. Il peut aussi recrystalliser en d'autres minéraux, comme la coésite et la stishovite.

L'onde de choc a par ailleurs soulevé le sol : une partie de l'impactite a été projetée dans le verre fondu et choquée à nouveau. Dans certains échantillons de roche, ce mélange apparaît comme une épaisse peinture noire, plaquée sur l'impactite. D'autres morceaux d'impactite ont été complètement plongés dans le verre à des températures supérieures à de 1 000 °C : l'impactite a subi une seconde transition et s'est transformée en perles de verre. Tout le sable qui se trouvait là a été soufflé à plusieurs milliers de mètres d'altitude. La brise crépusculaire, sans doute assez faible, a transporté le verre fondu sur une distance de 850 mètres.

Le cratère le plus grand s'est formé en un peu plus de deux secondes, le plus petit en quatre cinquièmes de seconde à peine. Ils ont d'abord été plus grands, peut-être 120 mètres de diamètre pour le plus grand, mais en quelques minutes ils ont été partiellement remplis par des matériaux qui retombaient du ciel et qui glissaient le long des bords.

Une date controversée

Quand ces événements ont-ils eu lieu ? Au début des années 1970, des échantillons de verre ont été datés d'environ 6 400 ans par l'analyse de la décomposition d'éléments radioactifs. Les études des vitesses de remplissage des cratères indiquent toutefois que l'impact de Wabar est plus récent : la profondeur du plus grand cratère était de douze mètres en 1932 et de huit mètres en 1961 ; ce cratère était presque totalement plein de sable en 1982, et son bord Sud-Est ne s'élevait que de trois mètres environ lors de nos visites en 1994 et 1995. Or, des spécialistes des dunes pensent que le remplissage d'un cratère n'est pas un phénomène réversible.

Le site de Wabar aurait sans doute déjà disparu si l'impactite et le verre n'avaient pas fixé le sable. Deux cratères au moins ont une assise rocheuse en impactite : la surface originelle de la cuvette avant le remplissage par le sable. Nous avons prélevé plusieurs échantillons de sable sous ce revêtement d'impactite et nous les avons datés par thermoluminescence (la thermoluminescence mesure depuis combien de temps des grains de quartz sont enfouis à l'abri du rayonnement solaire) : l'impactite s'est formée il y a moins de 450 ans.

Le cataclysme de Wabar n'a même peut-être pas plus de 135 ans : différentes sources rapportent qu'en 1863, ou en 1891, un bolide incandescent est passé au-dessus de Ryad, dans la direction de Wabar, et les météorites qui ont été retrouvées à Nedj après ce passage ont une composition identique aux échantillons de Wabar. Or, les météorites métalliques sont rares, et il est probable que les fragments de Wabar et ceux de Nedj ont la même origine. Les grands-parents des guides de Philby avaient peut-être assisté, de loin, à l'explosion.

Pourquoi nous intéressons-nous tant à la date de cet impact ? Parce que, avec celles des autres chutes de météorites connues, elle permet d'évaluer la fréquence de telles collisions : environ tous les dix ans. Plus généralement, la fréquence des impacts de météorites sur la Terre est inversement proportionnelle à la taille de celles-ci.

On trouve des cratères de météorites métalliques semblables à Odessa, au Texas ; à Henbury, en Australie ; à Sikhote-Alin, en Sibérie, et ailleurs.



5. LE SECOND GROS CRATÈRE du site de Wabar, «Philby A», a été presque totalement recouvert par une dune rampante. Seul son bord Sud-Est, préservé par un mélange gravillonneux de roches formées durant l'impact, émerge encore du sable. Ce cratère de 64 mètres de diamètre est dû à une météorite de cinq mètres de diamètre, issue d'une météorite plus grosse qui s'est disloquée en vol. Les fragments ont percuté le sol à des vitesses de 25 000 kilomètres par heure.



6. LA COUVERTURE D'EJECTA qui entoure le cratère «Philby A» est composée de trois types de roches déposées lors de l'impact : l'impactite blanche (semblable au grès et formée par la compression du sable), un verre noir (produit par la fusion du sable) et des fragments de la météorite (du fer presque pur, avec un peu de nickel). Sur cette image, les auteurs utilisent des magnétomètres pour rechercher les débris météoritiques.

Un verre témoin d'impact

Le verre libyque est probablement le plus étonnant verre naturel que nous connaissions : il est formé de silice presque pure. C'est un verre massif, transparent et limpide, de couleur jaune ou vert pâle la plupart du temps. Quelques échantillons sont blancs et laiteux, ou parcourus par des traînées brunes ; un morceau découvert récemment est même bleuté. Plus de 10 000 tonnes de fragments, du grain de sable au bloc de 20 kilogrammes, seraient dispersés dans le désert libyque, une région de 3 500 kilomètres carrés, entre les cordons de dunes de la Grande Mer de sable, à l'Ouest de l'Égypte, près de la frontière libyenne. Comment ce verre s'est-il formé ? Des hypothèses variées ont été proposées depuis 60 ans, mais l'énigme vient seulement d'être résolue : le verre libyque résulte de la fusion d'un grès très pur lors d'un impact météoritique.

Dans les années 1930, les premiers curieux qui se sont intéressés au verre libyque ont attribué sa fabrication à des verriers antiques. Toutefois, toutes les mesures géochronologiques confirment qu'il s'est formé il y a environ 29 millions d'années, bien avant l'apparition de l'homme : l'origine naturelle de ce verre est incontestable.

Des analogies ont alors été recherchées avec d'autres roches terrestres. Ainsi, le refroidissement de laves produit parfois des verres, tels que les obsidiennes ou les macusanites (verres volcaniques transparents) d'Amérique du Sud. Mais aucune roche volcanique terrestre n'a une composition proche de celle du verre libyque. La chaleur dégagée par des feux de forêt peut aussi fondre, très localement, des roches du sol, mais la silice ne fond qu'à plus de 1 700 °C : où trouver assez d'arbres à brûler pour produire les milliers de tonnes de ce verre ? On trouve enfin dans le désert des fulgurites, longues tiges creuses de verre qui résultent de la fusion du sable au passage de la foudre, mais ils n'ont ni l'aspect, ni la structure, ni la masse des plus gros morceaux de verre libyque.

Puisque aucun mécanisme terrestre ne semble expliquer la présence d'une telle quantité de morceaux de verre dans le désert, il faut envisager une origine extraterrestre. S'agirait-il de débris d'une météorite très inhabituelle ? Impossible : le verre libyque contient des bulles de gaz qui ont des caractéristiques de l'atmosphère, et il s'est donc bien formé sur Terre.

Au début des années 1980, une équipe allemande a annoncé que des traces d'hydrocarbures et, même, de fossiles végétaux avaient été trouvés dans le verre libyque : ce verre ne serait qu'un gel de silice précipité au fond d'un

grand lac. Cette hypothèse apparaît aujourd'hui, elle aussi, fantaisiste. D'abord, les traces organiques proviendraient d'une contamination des échantillons : elles n'ont jamais été retrouvées par d'autres laboratoires. En outre, au contraire du verre libyque, les gels de silice contiennent des quantités appréciables d'eau, et leur structure moléculaire est différente.

Le verre libyque contient des minéraux tels que la lechatelierite (de la silice fondue), la cristobalite (de même composition chimique que le quartz, mais de structure cristalline différente) et la baddeleyite (oxyde de zirconium) qui ne se forment qu'à haute température : le verre a donc été chauffé à plus de 1 700 °C. Une telle température peut être atteinte lors de l'impact d'une grosse météorite : le verre libyque est un verre d'impact, comme celui trouvé dans les cratères de Wabar, en Arabie Saoudite, ou d'Aouelloul, en Mauritanie.

Quelles autres preuves de cette origine avons-nous ? D'abord, le verre libyque présente de nombreuses analogies pétrographiques et géochimiques avec d'autres

verres d'impact bien identifiés : mêmes minéraux formés à hautes températures, mêmes formes et mêmes compositions des inclusions gazeuses, même pauvreté en eau comparée aux verres produits par d'autres processus. Ensuite, et surtout, le verre libyque porte la signature de la météorite responsable de l'impact : dans des échantillons contenant des traînées brunâtres, de l'iridium et d'autres éléments du groupe du platine ont été trouvés en quantités notables et en proportions quasi iden-

tiques à celles d'un type de météorites pierreuses. Les métaux du groupe du platine, en particulier l'iridium, sont presque absents des roches terrestres, mais présents, bien qu'en faibles quantités, dans la plupart des météorites.

Le mécanisme de l'impact explique aussi pourquoi le verre libyque est si riche en silice. Dans la région du Sahara où on le trouve, affleurent des roches sédimentaires presque exclusivement composées de grains de quartz et de composition très proche de celle du verre : les grès de Nubie. Ces roches, en fondant lors de l'impact, ont produit le verre il y a 29 millions d'années.

Le verre libyque n'a toutefois pas livré tous ses secrets : nous ne savons toujours pas où est le cratère d'impact. A-t-il été effacé par l'érosion ou est-il masqué par les sables du désert ?

Jean-Alix BARRAT, Université d'Angers, et Robert ROCCHIA, L.S.C.E., Gif-sur-Yvette



Le verre libyque, produit lors d'un impact météoritique, a été taillé par les hommes préhistoriques, qui l'ont aussi transporté parfois loin de l'endroit où ils l'avaient ramassé.

Cependant, 98 pour cent des météorites de la taille de celle qui est tombée à Wabar ne laissent aucun cratère, même temporaire. Elles se désagrègent dans l'atmosphère, qui semble constituer un écran efficace contre les impacts directs d'astéroïdes pierreux de moins de 100 mètres de diamètre : la Terre porte peu de cratères de diamètre inférieur à cinq kilomètres. Toutefois, les explosions en altitude sont parfois dévastatrices : dans la Toungouska, en Sibérie, en 1908, c'est probablement l'explosion d'une météorite pierreuse qui a abattu 2 200 kilomètres carrés de forêts et qui en a incendié la plus grande partie, bien qu'on n'en ait retrouvé presque aucune trace au sol. Un jour ou l'autre, une telle explosion détruira une ville.

Nous devons sans doute plus redouter ces impacts relativement faibles que ceux qui ont des répercussions sur tout le Globe : on connaît plusieurs sites d'impact beaucoup plus grands que Wabar, telle la structure annulaire de Manicouagan, au Québec, ou le site de Chicxulub, au Nord du Yucatán, au Mexique. Cependant, des impacts de cette importance ne se produisent en moyenne que tous les 100 millions d'années. L'astéroïde de dix kilomètres de diamètre qui a creusé Chicxulub et qui a peut-être fait disparaître les dinosaures est tombé il y a 65 millions d'années, et même si deux objets de taille comparable errent déjà sur des orbites coupant celle de la Terre, ils ne la percuteront pas dans un avenir proche.

Jeffrey WYNN et Eugene SHOEMAKER ont travaillé ensemble au Service géologique américain jusqu'à la mort du second, en 1997.

Harry St. John B. PHILBY, *An Account of Exploration in the Great South Desert of Arabia*, in *Geographical Journal*, vol. 81, n° 1, pp. 1-26, janvier 1933.

H.J. MELOSH, *Impact Cratering : A Geologic Process*, Oxford University Press, 1989.

J. Kelly BEATTY, «Secret» Impacts Revealed, in *Sky & Telescope*, vol. 87, n° 2, pp. 26-27, février 1994.

Hazards Due to Comets and Asteroids, sous la direction de Tom Gehrels, University of Arizona Press, 1995.

John S. LEWIS, *Rain of Iron and Ice : The Very Real Threat of Comet and Asteroid Bombardment*, Addison-Wesley Publishing, 1996.

Une mystérieuse météorite groenlandaise

WAYT GIBBS

Comment on chasse la météorite au Groenland.



1. UNE TONNE DE NEIGE, fondue dans une bâche de plastique noir, a été filtrée : elle contenait peut-être des poussières disséminées par l'explosion d'une météorite au-dessus du Groenland en décembre 1997.



Le téléphone par satellite apporta l'information vers 20 heures, alors que Lars Christensen et les six autres membres de l'expédition venaient de finir leur repas et patientaient sous la tente. Depuis sept jours, ils attendaient de reprendre leurs recherches des débris de la météorite de Kangilia : l'hélicoptère était bloqué par le brouillard et par les chutes de neige, et la fonte de la neige sur laquelle le camp était installé transformait les alentours en un marécage impraticable.

Le téléphone apportait enfin une bonne nouvelle : selon une station de télévision de Nuuk, la capitale du Groenland, un garde-chasse avait découvert la météorite. En naviguant dans le labyrinthe d'îles et de baies près de Qeqertarsuatsiaat, à environ 60 kilomètres à l'Ouest du camp, il avait vu quatre cratères, fraîchement creusés dans les piémonts côtiers et contenant des roches noires. Au bout d'une heure de communication, l'équipe réussit à joindre ce garde et à s'assurer qu'il les conduirait sur le site. Une autre bonne nouvelle arriva bientôt : les conditions météorologiques s'amélioraient. L'hélicoptère viendrait peu après l'aube pour les emmener inspecter les cratères.

Pendant deux semaines, ils avaient peiné sur des kilomètres de glace, ils avaient descendu et remonté des crevasses, ils avaient fondu la neige pour trouver des poussières, ils avaient cherché de toutes les manières possibles, mais toujours aux mauvais endroits. Seraient-ils enfin récompensés? Même pas : dès qu'il vit les cratères, L. Christensen sut qu'ils n'avaient pas été formés par des impacts de météorites. Des roches avaient simplement laissé des vides en tombant le long d'une pente érodée.

Cette expédition avait été préparée par Holger Pedersen et Torben Risbo, respectivement astronome et géophysicien à l'Université de Copenhague. Ils avaient choisi la zone de recherche : des

centaines de kilomètres carrés près de la source du Frederikshabs Isblink, un glacier géant au mouvement lent, et de 1 200 mètres d'épaisseur à l'endroit du camp.

Leur enquête de terrain et leurs calculs les avaient aussi convaincus que la météorite incandescente qui avait éclairé la côte Sud-Ouest du Groenland, le 9 décembre 1997, avait une origine extraordinaire : ce serait la première météorite connue provenant de l'extérieur du Système solaire. Ce résultat était étonnant : la masse de la météorite, avant qu'elle ne commence à se consumer dans l'atmosphère, avait été estimée à une centaine de tonnes. Il était inattendu que le premier objet interstellaire jamais détecté

soit aussi gros : statistiquement, on avait plus de chances d'en découvrir d'abord de petits. L'analyse d'un fragment, même minuscule, de la météorite permettrait de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse.

Retracer la chute

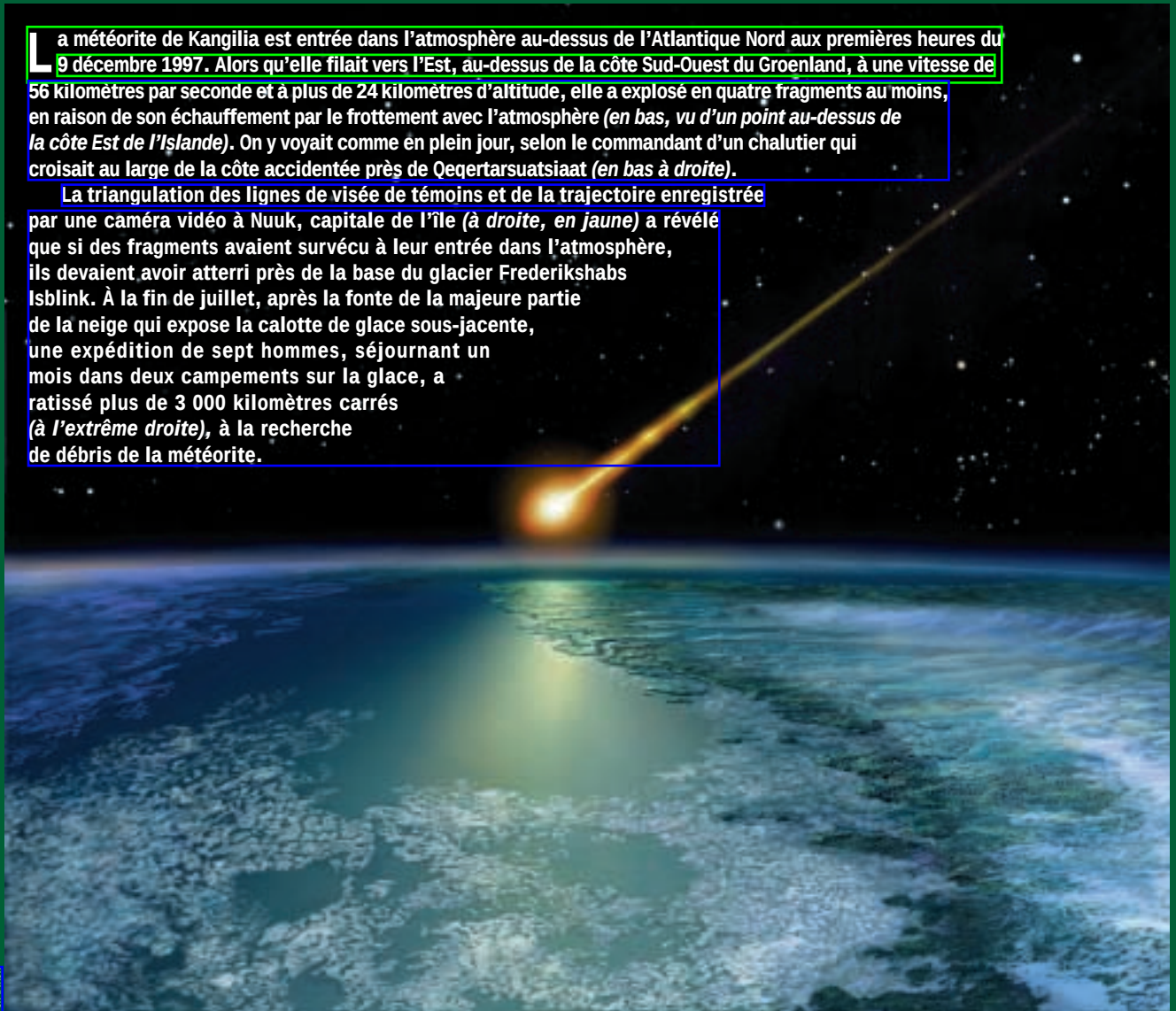
«Sunaana!», avait crié un enfant de trois ans à sa grand-mère : «Qu'est-ce que c'est?» C'est à cette question que H. Pedersen espérait répondre. Toutefois, il devait d'abord répondre à deux autres questions : dans quelle direction le bolide se déplaçait-il et à quelle vitesse? Il disposait pour cela d'un élément précieux : en enregistrant vidéo de trois secondes, qui

La météorite de Kangilia

La météorite de Kangilia est entrée dans l'atmosphère au-dessus de l'Atlantique Nord aux premières heures du 9 décembre 1997. Alors qu'elle filait vers l'Est, au-dessus de la côte Sud-Ouest du Groenland, à une vitesse de

56 kilomètres par seconde et à plus de 24 kilomètres d'altitude, elle a explosé en quatre fragments au moins, en raison de son échauffement par le frottement avec l'atmosphère (en bas, vu d'un point au-dessus de la côte Est de l'Islande). On y voyait comme en plein jour, selon le commandant d'un chalutier qui croisait au large de la côte accidentée près de Qeqertarsuatsiaat (en bas à droite).

La triangulation des lignes de visée de témoins et de la trajectoire enregistrée par une caméra vidéo à Nuuk, capitale de l'île (à droite, en jaune) a révélé que si des fragments avaient survécu à leur entrée dans l'atmosphère, ils devaient avoir atterri près de la base du glacier Frederikshabs Isblink. À la fin de juillet, après la fonte de la majeure partie de la neige qui expose la calotte de glace sous-jacente, une expédition de sept hommes, séjournant un mois dans deux campements sur la glace, a ratissé plus de 3 000 kilomètres carrés (à l'extrême droite), à la recherche de débris de la météorite.



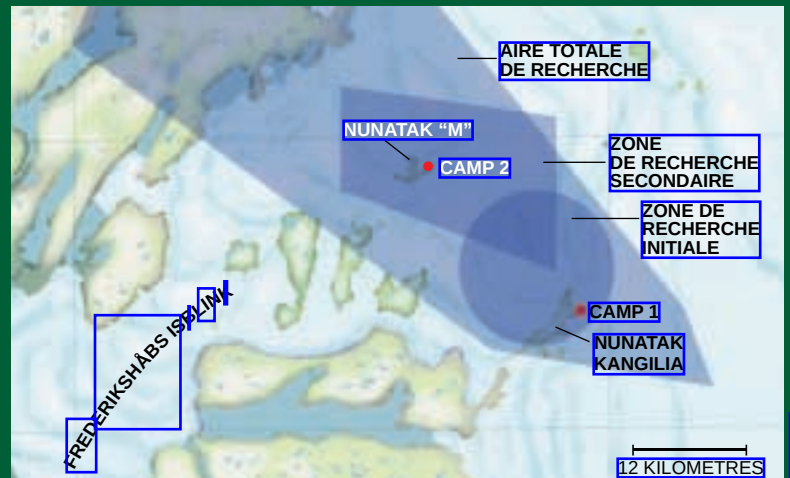
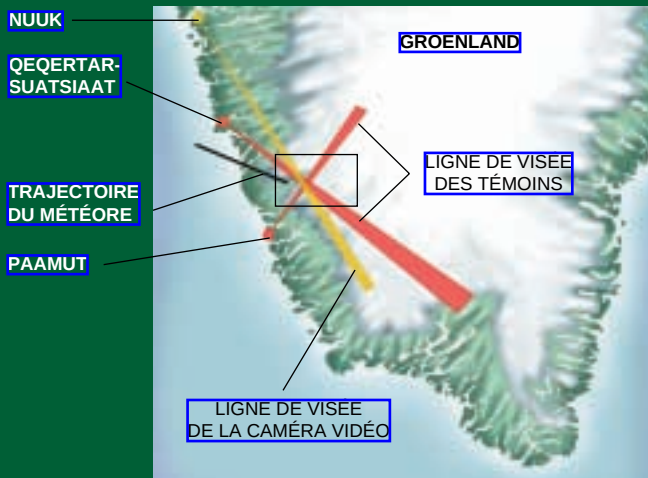
montrait la chute de la météorite et un éclair final juste sous l'horizon. Un habitant de Nuuk avait filmé l'événement par hasard, avec une caméra disposée pour la surveillance de son scooter des neiges. Si H. Pedersen pouvait reconstruire la trajectoire de la boule de feu quand elle avait traversé le champ de la caméra, alors il connaîtrait sa vitesse.

L'enregistrement montrait que la météorite se déplaçait dans un plan incliné de 53 degrés par rapport à la

2. CHERCHANT AU HASARD, l'équipe s'est écartée de la glace pour examiner des cratères observés sur la côte. Les alvéoles (taches blanches, en haut) n'étaient que des traces naturelles d'érosion.



André Riva



Laure Grace



André Riva

verticale, mais quelle était sa direction ? Pendant deux semaines sombres de janvier, H. Pedersen se déplaça de village en village avec un théodolite, instrument de mesure des angles. Interrogeant une trentaine de témoins, il couvrit son carnet de croquis et de témoignages : certains avaient vu de

grandes boules de feu de la taille de la Lune et aussi brillantes que le Soleil ; d'autres, des traînées incandescentes larges comme deux mains ouvertes. Surtout, il mesura l'angle sous lequel chaque observateur se souvenait avoir vu la boule de feu, à l'endroit d'où il l'avait aperçue.



FOTO HENRIK OSTER

3. DANS UNE CREVASSE, la glace lisse n'offre aucun point d'appui. Quand la neige couvre l'ouverture des fissures, les chutes sont imprévisibles et mortelles. Les membres de l'expédition marchent en file indienne et encordés.



FOTO PEDERSEN

4. L'ASTRONOME Holger Pedersen a fait du porte-à-porte pour recueillir des témoignages de Groenlandais qui avaient assisté à la chute de la météorite. En corrélant ces témoignages, un enregistrement vidéo réalisé à Nuuk et les données de satellites militaires américains, il est arrivé à la conclusion extraordinaire que l'objet était la première météorite interstellaire jamais observée.

Zdenek Ceplecha, spécialiste tchèque des météorites, avait appris l'existence de l'enregistrement vidéo. Il proposa alors son expérience et ses méthodes de travail à H. Pedersen. Le programme de calcul de trajectoires qu'il avait mis au point calcula la trajectoire la plus probable à partir des informations recueillies. Ce calcul fournissait toutefois une vitesse surprenante : environ 56 kilomètres par seconde, plus de deux fois la vitesse d'entrée dans la haute atmosphère de la plupart des météorites. C'était d'autant plus incroyable que la collision n'était pas frontale : l'objet avait quasiment embouti la Terre par-derrière à un peu plus de 200 000 kilomètres heure.

En calculant à rebours la trajectoire de l'objet dans l'espace extra-terrestre, Z. Ceplecha découvrit en outre que l'orbite ne passait pas près de la ceinture des astéroïdes, d'où proviennent la majorité des météorites, mais qu'elle sortait complètement de l'écliptique (le plan où gravitent les planètes et la majorité des corps du Système solaire). Elle ne pouvait même pas avoir été déviée par l'attraction gravitationnelle de Mars. Si les observations et les calculs étaient corrects, ce dont Z. Ceplecha doutait, alors ce qui avait brûlé au-dessus du Groenland provenait d'au-delà du nuage cométaire de Oort, qui contient les objets les plus lointains du Système solaire.

Si la météorite était arrivée si vite, il n'en restait probablement plus que de la poussière : les pressions considérables qu'elle avait subies à son entrée dans l'atmosphère l'avaient entièrement disloquée. Des grains, ensevelis sous le mètre de neige tombée dans l'année, contenaient alors la preuve d'une origine extrasolaire. Si, au contraire, l'expédition trouvait un gros fragment et si la composition de ce fragment s'approchait de celle de météorites connues, l'hypothèse interstellaire serait infirmée.

La recherche sur le terrain

Un grand cercle entourant le «nunatak Kangilia» (un nunatak est une pointe rocheuse qui émerge de la calotte glaciaire) délimitait la zone principale de recherche. Après une semaine d'exploration, l'expédition n'avait rien trouvé. Maintenant qu'ils disposaient d'un hélicoptère, ses

membres avaient déplacé leur camp vers une seconde zone, si éloignée de tout que l'amoncellement de roches près du centre ne portait pas de nom officiel. H. Pedersen le nomma nunatak M, comme météore.

Le lendemain du jour où ils avaient inspecté les cratères si décevants, René Sorensen et Tore Jørgensen jetèrent leurs traîneaux dans l'hélicoptère et partirent pour un camp avancé. Les trois jours suivants, ils pelletteraient une tonne de neige dure sur une grande bâche de plastique noir, puis ils filtreraient l'eau de fonte pour récupérer toute particule solide qui aurait été piégée dans la neige depuis le début de son accumulation, au mois d'août précédent.

La première semaine, ils avaient essayé d'observer les particules au microscope, pour se faire une première opinion, mais la tempête permanente les contraignait à travailler sous la tente : dès leur ouverture, les échantillons furent contaminés par la suie des réchauds au kérosène, par les poils de leurs peaux de renne et par des cheveux. Par la suite, tous les échantillons furent donc scellés pour analyse ultérieure à Copenhague.

Vers neuf heures du matin, six hommes montèrent dans l'hélicoptère pour une reconnaissance aérienne vers le Sud-Est où, selon Z. Ceplecha, T. Risbo et H. Pedersen, les plus gros fragments avaient pu tomber. L'engin quadrilla quelques centaines de kilomètres carrés en deux heures : dix kilomètres en avant, un kilomètre à droite, dix kilomètres en arrière, un kilomètre à gauche, et ainsi de suite. À 30 mètres d'altitude, les hommes scrutaient une étendue de glace de 900 mètres, à gauche et à droite de l'hélicoptère. Même à une vitesse de 90 kilomètres heure, ils devaient apercevoir toute roche placée à la surface de la neige.

À l'atterrissage, L. Christensen émergea avec un sac plein de sable gluant et noir. Ce n'était que de la cryoconite, dépôt noir formé par l'accumulation, dans des tourbillons et dans des flaques, de poussières et d'algues entraînées par les ruisseaux d'eau de fonte qui coulent sous et à travers la neige. Toutefois, la cryoconite contenait peut-être de la poussière météoritique.

L'après-midi, l'équipe partit pour une nouvelle reconnaissance de 90 minutes. Elle revint les mains vides.



ONDES ET ONDELETTES

B. Burke Hubbard

PRIX D'ALEMBERT 1996

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



XEROX PIRELLA

5. LA GLACE EST FRACTURÉE de crevasses qui atteignent 30 mètres de large et 100 mètres de profondeur. Malgré les dangers, l'équipe a parcouru près de 200 kilomètres à pied. La plus grande partie de la zone a été inspectée à partir d'un hélicoptère.

Lors de la troisième et dernière sortie de la journée, deux fois le pilote fit descendre l'appareil, mais chaque fois les espoirs de trouver une roche furent déçus : la couleur noire n'était due qu'à de la cryoconite.

Le 16 août, l'expédition finit comme elle avait commencé, contrariée par les caprices du climat groenlandais. Les membres de l'équipe avaient marché quelque 200 kilomètres sous la pluie, le vent et la neige sur une calotte de glace dangereuse.

Ils avaient volé sur plus de 1 000 kilomètres, fouillant en 25 jours une superficie de la taille du département du Rhône, à la recherche d'une pierre de la taille d'une balle de golf. Sans succès.

Pendant ce temps, Z. Ceplecha avait rencontré Richard Spalding, spécialiste en télédétection au Laboratoire Sandia, au Nouveau-Mexique, afin de comparer l'enregistrement vidéo de la météorite avec les données de deux satellites antimissiles

américains qui avaient aussi détecté l'explosion de la météorite. R. Spalding trouva, comme H. Pedersen, une corrélation entre deux éclairs sur la vidéo et deux pics très intenses sur les enregistrements des satellites.

De même, Edward Tagliaferri, consultant en télédétection, déduisit des données des satellites une vitesse de 46 à 52 kilomètres par seconde pour la météorite. Il proposa toutefois d'autres hypothèses. Deux gros blocs, distants de plusieurs kilomètres, avaient peut-être explosé à quelques millisecondes d'intervalle. Ou bien le passage de la météorite avait ionisé l'atmosphère et relié deux couches chargées, comme un fil : un plasma d'ions accélérés aurait alors circulé, dépassé l'objet et continué avec un bruit perçant jusqu'à ce que tous les ions libèrent d'un coup leur énergie en un éclair géant. La vidéo et les caméras des satellites auraient alors enregistré cette décharge de plasma qui fusait devant une météorite plus lente.

Aucune de ces explications n'était toutefois nécessaire. Un mois plus tard, H. Pedersen reçut une nouvelle copie numérique de la vidéo, beaucoup plus claire que la première. Il ajusta avec précision des images du film à des pics dans les enregistrements des satellites, puis il recalcule la trajectoire de la boule de feu : il obtint une vitesse de 29 kilomètres par seconde au lieu de 56, et une trajectoire originaire du Système solaire.

Une question subsiste toutefois. Si la météorite se déplaçait à une vitesse normale, elle aurait dû être visible très tôt après son entrée dans l'atmosphère : presque toutes les météorites commencent à briller entre 110 et 90 kilomètres d'altitude. Pourtant, cette boule de feu ne s'est apparemment pas échauffée avant d'atteindre 70 kilomètres.

Seuls des fragments de la météorite permettraient de répondre à cette question et de trancher quant à son origine. Les échantillons obtenus par la filtration de la neige fondue contiennent de petits grains minéraux rouges, bleus et bruns, qui semblent avoir été formés par une fragmentation explosive. Leur analyse dira s'ils proviennent ou non de l'espace interstellaire.

Wayt GIBBS est journaliste à *Scientific American*.

L'origine des maladies

RANDOLPH NESSE • GEORGE WILLIAMS

Les principes de l'évolution par la sélection naturelle expliquent les poussées de fièvre, les douleurs ou encore les nausées des femmes enceintes.

L'œil humain est admirable : il est constitué de la cornée, un tissu transparent, de l'iris, qui ajuste la luminosité, et du cristallin, qui se déforme de façon que la lumière soit focalisée juste sur la rétine. Toutefois, le système n'est pas parfait : les vaisseaux sanguins et les nerfs qui sillonnent la rétine convergent en un point, qui est aveugle.

En fait, l'organisme n'est pas dépourvu de défauts. Les valves cardiaques sont des merveilles, mais nous avons des dents de sagesse ! Les molécules d'ADN assurent le développement des quelque 10 000 milliards de cellules de l'organisme humain adulte, mais elles causent aussi leur dégradation incessante et leur mort. Notre système immunitaire identifie et détruit des millions de micro-organismes étrangers, mais certaines bactéries nous tuent. L'organisme aurait-il été façonné par une équipe d'ingénieurs ingénieux, mais qui auraient commis quelques erreurs ?

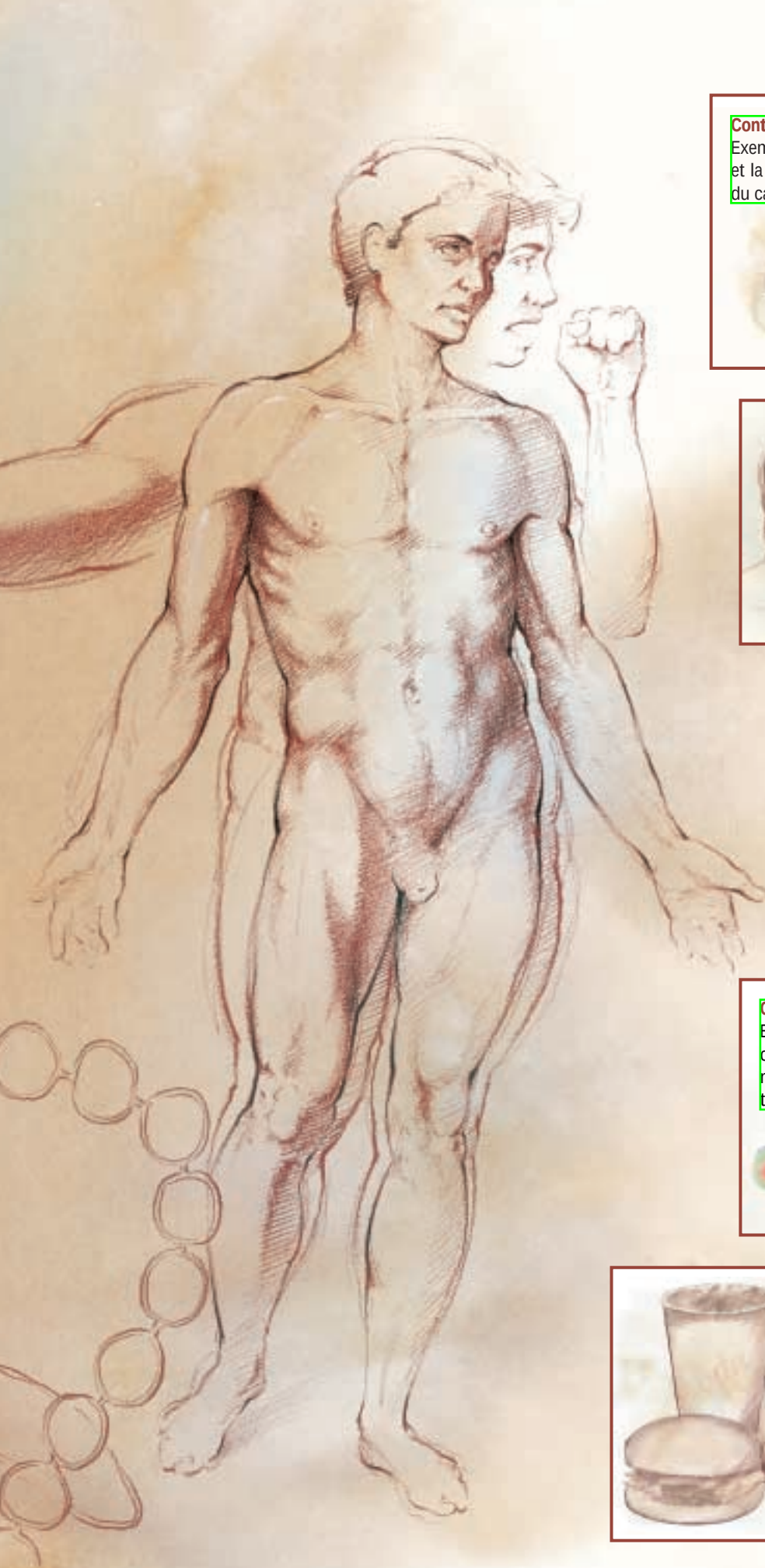
Ces erreurs apparentes trouvent un sens si l'on considère, comme le disait le biologiste Theodosius Dobzhansky, que « la biologie n'a de sens qu'à la lumière de l'évolution ». La biologie évolutionniste est le fondement de toute la biologie, sur laquelle repose toute la médecine. Pourtant, la biologie évolutionniste commence seulement à être reconnue comme une science médicale fondamentale. C'est sous le nom de médecine darwinienne qu'est désignée l'étude des questions médicales dans un contexte évolutif. Généralement, les médecins recherchent les causes d'une maladie et proposent des traitements pour guérir le malade ou soulager ses symptômes. Ils envisagent d'abord les causes les plus probables, se fondant sur l'anatomie et sur la physiologie. Au contraire, la médecine darwinienne se demande pourquoi l'organisme est vulnérable au cancer, à l'athérosclérose ou, encore, à la dépression, offrant ainsi une nouvelle façon d'aborder les recherches.

Les interprétations évolutionnistes des défauts de l'organisme sont regroupées en cinq catégories. Premièrement, certaines conditions désagréables

telles que la douleur, la fièvre, la toux, les vomissements, l'anxiété ne sont ni des maladies ni des défauts constitutifs, mais plutôt des modes de défense élaborés. Deuxièmement, les conflits avec d'autres organismes, par exemple avec les bactéries, font partie intégrante de la vie. Troisièmement, certaines conditions, par exemple l'accumulation des graisses alimentaires, sont trop récentes pour que la sélection naturelle ait déjà adapté l'organisme. Quatrièmement, certains avantages contrebalancent parfois des inconvénients, et l'organisme est alors l'otage de ces compromis : ainsi le gène de l'anémie falciforme, qui engendre une anémie parce que les globules rouges sont anormaux, protège contre le paludisme. Enfin, la sélection naturelle, faisant au mieux avec les éléments disponibles, ne nous a pas toujours dotés des caractéristiques optimales.

Des moyens de défense élaborés

La toux et la douleur sont peut-être les moyens de défense les plus utiles. Celui qui n'évacue pas les substances étrangères de ses poumons risque la mort par pneumonie, une inflammation aiguë du poumon due à la présence d'un corps étranger. La douleur, aussi, est utile : les rares personnes qui ne ressentent aucune douleur courent des risques ; si, par exemple, elles restent trop longtemps dans une position inconfortable, où une jambe ou un bras sont comprimés, le sang irrigue mal les articulations, qui risquent d'être endommagées. Ces personnes privées de toute sensation douloureuse décèdent jeunes de lésions tissulaires et d'infections. Ainsi, la toux et la douleur, souvent considérées comme un mal, ne sont pas responsables de conditions pathologiques, mais font partie des réactions de défense façonnées par la sélection naturelle et tenues en réserve jusqu'au moment opportun.



Contraintes

Exemple : l'œil humain présente une tache aveugle, et la rétine risque de se décoller. Au contraire, l'œil du calamar ne présente pas ces inconvénients.



Illustrations de Craig Keeler

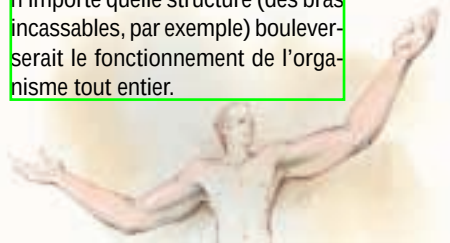
Défenses

Exemple : des symptômes, telles la toux ou la fièvre, ne sont pas des «défauts de fabrication», mais constituent des défenses de l'organisme.



Compromis

Exemple : le surdimensionnement de n'importe quelle structure (des bras incassables, par exemple) bouleverserait le fonctionnement de l'organisme tout entier.



Conflits

Exemple : les êtres humains sont en conflit permanent avec d'autres organismes qui se sont parfaitement adaptés au cours de l'évolution.



Bactérie du choléra

OW: JSP/Photo Researchers Inc

Environnements nouveaux

Exemple : l'environnement actuel de l'organisme humain est récent ; des substances qui avaient toujours été rares (par exemple, des aliments riches en graisses) y abondent.



Laure Grac

La fièvre, les nausées, les vomissements, la diarrhée, l'anxiété, la fatigue, les éternuements ou l'inflammation sont également des mécanismes de défense. La fièvre, par exemple, ne résulte pas d'une simple augmentation du métabolisme : c'est une élévation – parfaitement contrôlée – de la température corporelle, laquelle favorise la destruction des agents pathogènes. À l'Institut Lovelace d'Albuquerque, Matthew Kluger a observé que, quand les lézards (des animaux à sang froid) ont une infection, ils se déplacent vers des zones plus chaudes de leur cage, jusqu'à ce que leur température corporelle augmente de quelques degrés au-dessus de sa valeur normale. Quand on les en empêche, ils meurent davantage de l'infection. De même, des rats âgés et malades dont la température corporelle n'atteint plus celle des autres rats de laboratoire plus jeunes recherchent instinctivement les endroits les plus chauds.

Une faible concentration sanguine en fer est un autre mécanisme de défense mal connu. Les personnes souffrant d'infection chronique ont souvent des concentrations sanguines en fer inférieures à la normale, et cette anomalie est une réaction de défense : pendant l'infection, le fer est piégé dans

le foie, ce qui empêche les bactéries qui ont envahi l'organisme de se procurer, aux dépens du malade, cet élément qui leur est indispensable.

Les nausées matinales ont été longtemps considérées comme une conséquence désagréable de la grossesse, mais elles ont lieu au cours de la période de différenciation rapide des tissus fœtaux, lorsque le fœtus en développement est tout particulièrement sensible à d'éventuelles toxines. Les femmes ayant des nausées mangent peu de plats épicés, qui sont potentiellement dangereux. Les nausées seraient-elles alors une réaction adaptative évitant au fœtus d'être exposé aux toxines ingérées par la mère ? Une étude, aux États-Unis, a révélé que les femmes qui ont le plus de nausées sont celles pour lesquelles le nombre d'avortements spontanés est inférieur. Ce résultat devra être corroboré par d'autres études. Les femelles d'autres espèces que la nôtre modifient-elles également leurs préférences alimentaires lorsqu'elles sont gravides ? On devra également vérifier que les malformations sont plus fréquentes chez les enfants dont les mères ont eu peu de nausées matinales et ont conservé une alimentation très variée pendant leur grossesse.

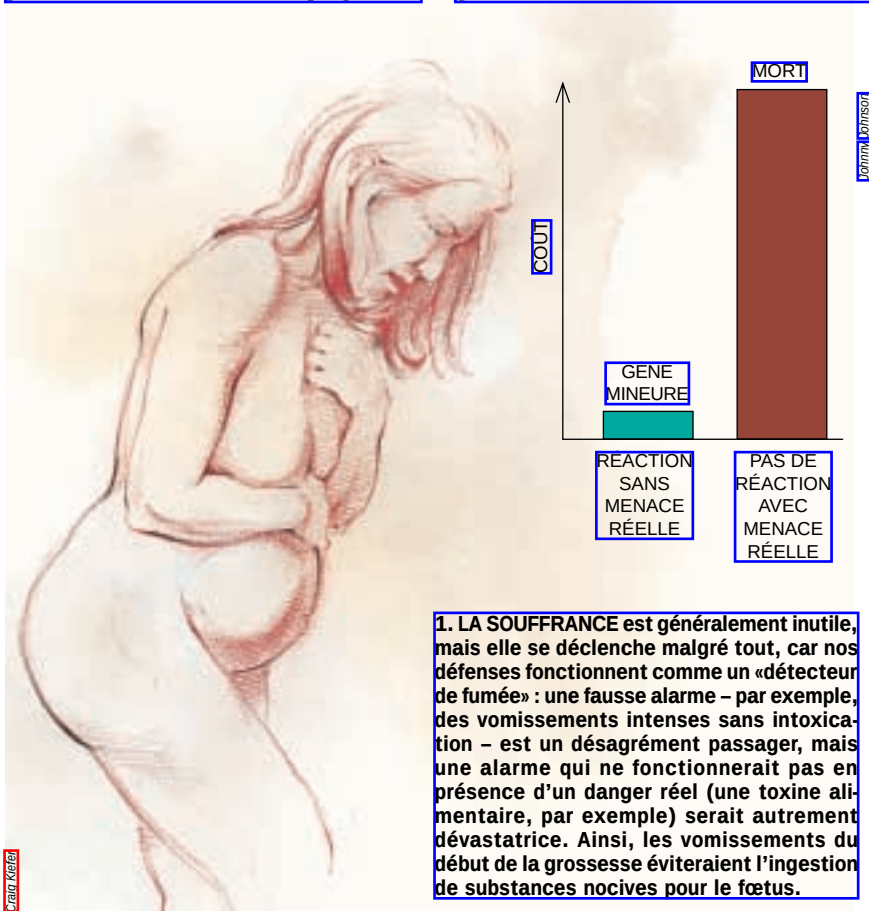
Un autre comportement, l'anxiété, semble être une réaction de défense face aux situations périlleuses, car elle augmente la vigilance et favorise la fuite. En 1992, à l'Université de Louisville, Lee Dugatkin a évalué les avantages de la peur chez des guppies (de petits poissons très colorés) face à un de leurs prédateurs, une perche. Les guppies sont de trois types : timides, normaux ou audacieux. En présence du prédateur, les timides se cachent, les normaux s'éloignent en nageant, et les audacieux restent sur place et font face à la perche. Chaque groupe de guppies a été isolé dans un aquarium avec une perche. Après 60 heures, 40 pour cent des guppies timides avaient survécu, contre seulement 15 pour cent des normaux. Quant au groupe des audacieux, il avait disparu et, avec eux, leurs gènes d'intrépidité.

Les gènes de l'anxiété ayant été sélectionnés par l'évolution, il doit exister des personnes excessivement anxieuses, ce qui est effectivement le cas, et aussi des personnes qui ne sont pas assez anxieuses, soit pour des raisons génétiques, soit parce qu'elles prennent des médicaments anxiolytiques. On ignore la nature exacte et la fréquence du syndrome de non-anxiété, car peu de personnes qui en sont atteintes consultent un psychiatre. Pourtant, si l'on recherchait ces personnes, on les trouverait certainement dans les salles des urgences, dans les prisons, parmi les chômeurs, etc.

Un détecteur d'incendie

Si la sélection naturelle a mis au point des mécanismes qui défendent l'organisme, pourquoi les médicaments qui inhibent les défenses ne sont-ils pas nuisibles ? En fait, nous nous faisons parfois du mal en inhibant ainsi nos défenses naturelles.

Herbert DuPont, de l'Université de Houston, et Richard Hornick, de l'Hôpital régional d'Orlando, ont étudié la diarrhée provoquée par la bactérie *Shigella* : ils ont constaté que les personnes qui absorbent des médicaments anti-diarrhéiques restent malades plus longtemps et ont plus de complications que celles qui prennent un placebo. De même, Eugène Weinberg, de l'Université d'Indiana, a constaté que, dans certaines régions d'Afrique, l'administration de fer contre les carences favorise les maladies infectieuses, notamment les amibiases. En effet, si



le fer administré par voie orale a peu de conséquences chez les personnes en bonne santé confrontées accidentellement à une infection, il risque d'être nuisible chez les personnes dénutries qui sont infectées : elles ne fabriquent pas assez de protéines pour fixer le fer, lequel reste libre et est utilisé par les micro-organismes infectieux.

Un médicament antinauséeux a récemment été rendu responsable de malformations de naissance. Apparemment, personne n'a pensé que le médicament était nocif, parce qu'il arrêtait les nausées «bienfaitrices» des femmes.

On mesure mal l'importance des mécanismes naturels de défense, parce que de nombreuses personnes subissent, en apparence inutilement, des épisodes d'anxiété, de douleur, de fièvre, de diarrhée ou de nausée. Pour l'expliquer, on doit analyser la régulation des réactions de défense d'après la théorie de la détection des signaux : une toxine libérée dans l'estomac par une substance que l'on a ingérée peut être évacuée par des vomissements. Une fausse alarme – des vomissements sans la présence de toxines – ne coûte que quelques calories, tandis qu'une absence de vomissements malgré la présence d'une toxine risque d'entraîner la mort.

La sélection naturelle semble mettre en place des mécanismes de régulation qui fonctionnent selon le principe des détecteurs de fumée : ces appareils sont inutiles quand ils ne sont pas assez sensibles, mais, s'ils le sont trop, ils risquent de provoquer de fausses alarmes. Les nombreux «détecteurs de fumée» de l'organisme humain engendrent des souffrances souvent notables, parfaitement normales, mais inutiles. Cette observation explique pourquoi l'inhibition des défenses naturelles n'a généralement pas de conséquences graves : comme la plupart des réactions de défense sont inutiles, leur inhibition est généralement sans danger. La majorité des alarmes ne sont que de fausses alertes, et l'on peut débrancher le détecteur de fumée... jusqu'au jour où un véritable incendie éclate !

La sélection naturelle ne nous a pas dotés d'une protection parfaite contre tous les agents pathogènes, car ces derniers évoluent beaucoup plus vite que nous. En une journée, les bactéries, qui se multiplient très rapidement, ont autant d'occasions de mutations et de sélections que l'homme en mille ans. Quant à nos défenses, naturelles ou

Évolution de la virulence

Les modifications de la virulence sont liées à l'histoire des agents infectieux et à leur mode de transmission. Les infections qui se propagent par contact direct sont généralement dues à des agents pathogènes peu virulents : les personnes infectées restent alors suffisamment valides pour interagir avec d'autres personnes, qu'elles contaminent à leur tour. Au contraire, lorsque

les agents pathogènes sont transmis même si les personnes restent alitées, la virulence se renforce. Des choix de comportement, par exemple l'utilisation de préservatifs, peuvent aussi modifier la stratégie de l'agent pathogène (si le VIH n'est plus transmis par voie sexuelle, il devra épargner plus longtemps les personnes contaminées, sinon il disparaîtra avec elles).



FACTEURS FAVORISANT UNE VIRULENCE ÉLEVÉE

Transmission de la maladie par des vecteurs intermédiaires (les moustiques, les mains du personnel soignant, les réserves d'eau insalubres)
Rapports sexuels non protégés et/ou partenaires multiples



FACTEURS FAVORISANT UNE VIRULENCE ATTÉNUÉE

Transmission de personne à personne (par les éternuements, la toux, ou les contacts)

Rapports sexuels protégés et/ou partenaire unique

artificielles, elles exercent une pression de sélection. Si les agents pathogènes n'évoluent pas rapidement pour adopter une stratégie défensive efficace, ils disparaissent.

L'adaptabilité des micro-organismes

Paul Ewald, du Collège Amherst, classe les phénomènes associés à une infection en plusieurs catégories selon qu'ils bénéficient à l'hôte, à l'agent pathogène, aux deux ou à aucun des deux. Par exemple, quand le nez coule pendant un rhume, les sécrétions de la muqueuse nasale servent-elles à évacuer les agents pathogènes ? Accélèrent-elles la transmission à d'autres hôtes ? Pour estimer l'importance de chaque effet, on pourrait faire l'expérience de bloquer l'écoulement des sécrétions nasales et observer si l'état pathologique du malade est plus court ou plus long.

Notre espèce a remporté plusieurs victoires contre les agents pathogènes grâce aux antibiotiques et aux vaccins. Ces victoires furent si rapides et

apparemment si complètes que l'on a cru vaincre définitivement les maladies infectieuses. C'était sous-estimer l'ennemi et la puissance de la sélection naturelle : les micro-organismes pathogènes semblent s'adapter à tous les progrès thérapeutiques.

La résistance des bactéries aux antibiotiques illustre la puissance de la sélection naturelle. Les bactéries ayant des gènes qui leur permettent de survivre malgré la présence d'un antibiotique se reproduisent plus rapidement que les autres, de sorte que les gènes qui confèrent cette résistance sont rapidement transmis dans les populations de survivants. À l'Institut Rockefeller, Joshua Lederberg a montré que ces gènes, portés par des morceaux d'ADN infectieux, se transmettent même entre bactéries d'espèces différentes. Aujourd'hui, certaines souches de l'agent de la tuberculose résistent aux trois principaux traitements antibiotiques disponibles, et les malades contaminés par ces souches n'ont guère plus d'espoir de survie que les tuberculeux qui vivaient il y a 100 ans.

Beaucoup de personnes admettent encore que les agents pathogènes deviennent nécessairement inoffensifs après avoir longtemps cohabité avec leurs hôtes. *A priori*, c'est une thèse plausible : un organisme qui tue son hôte trop rapidement n'a pas le temps d'infecter un nouvel hôte, et la sélection naturelle semble favoriser une faible virulence. La syphilis, par exemple, fut une maladie très virulente quand elle arriva en Europe, mais, au fil des siècles, elle devint moins grave. Plus généralement, la virulence des micro-organismes pathogènes évolue, de sorte que leurs gènes se transmettent plus efficacement.

Pour les agents infectieux transmis directement d'une personne à l'autre, une faible virulence semble avantageuse, puisqu'elle permet à l'hôte de rester actif et en contact avec d'autres hôtes potentiels. Au contraire, certaines maladies, tel le paludisme, sont aussi bien transmises, voire mieux, par les personnes alitées : pour de tels agents pathogènes, généralement transmis par des vecteurs (notamment des moustiques), une virulence élevée est un avantage sélectif. Dans le cas du choléra, ce sont les réserves d'eau publiques qui transmettent la maladie : comme l'eau de boisson et de toilette est contaminée par les excréments des malades, la sélection naturelle tend à augmenter la virulence, car la multiplication des diarrhées favorise la dispersion de l'organisme infectieux, même quand les malades meurent rapidement. En

revanche, lorsque les conditions sanitaires s'améliorent, la sélection agit au détriment des bactéries *Vibrio cholerae* et favorise la souche El Tor, moins virulente : les personnes contaminées ne meurent pas, sont moins malades, se déplacent plus, infectent beaucoup de personnes pendant longtemps, et deviennent ainsi d'excellents vecteurs d'agents pathogènes peu virulents. De même, l'amélioration de l'hygiène fait disparaître *Shigella flexneri*, très agressive, au profit de *Shigella sonnei*, plus bénigne.

De telles constatations doivent guider les politiques de santé. Selon la théorie évolutionniste, des aiguilles de seringue propres et des rapports sexuels protégés feront plus que de préserver de nombreuses personnes contre une infection par le VIH (le virus du SIDA) : si les comportements humains ralentissent la transmission du virus, les souches qui ne tuent pas trop vite leur hôte survivront plus longtemps que les souches virulentes qui, après avoir tué leur hôte, meurent avec lui. Nos choix sociaux et politiques pourront peut-être changer la nature même du VIH.

Les agents pathogènes ne sont pas les seules menaces. Si nous n'avons plus à craindre les grands carnivores, qui étaient naguère nos prédateurs, nous restons menacés par des organismes plus petits, par exemple par certaines araignées ou par des serpents venimeux. Toutefois, les phobies que nous avons parfois de ces petites créatures

nous font probablement plus de mal que les araignées elles-mêmes, et les autres membres de notre propre espèce sont plus dangereux que ces animaux venimeux, voire que les grands carnivores. Nous attaquons nos semblables non pas pour obtenir de la viande, mais pour obtenir des partenaires, des territoires et diverses ressources. Les conflits les plus violents ont généralement lieu entre jeunes gens qui sont en compétition, et qui s'organisent pour atteindre leurs objectifs.

Même dans les familles, certaines relations sont conflictuelles. Si l'intérêt d'une mère et celui de son enfant sont identiques lorsque l'enfant est tout jeune, ils finissent par diverger : lorsqu'un enfant a quelques années, sa mère a «génétiquement» intérêt à avoir un autre enfant, tandis que l'enfant aurait intérêt à ce qu'elle continue à s'occuper de lui. Même dans le ventre de la mère, les intérêts ne sont pas nécessairement identiques. Du point de vue de la mère, le fœtus devrait être un peu plus petit qu'il ne l'est quand il se développe au mieux. Un conflit se déclare parfois entre le fœtus et sa mère, dont la pression sanguine et la concentration sanguine en sucre augmentent trop : une hypertension ou un diabète surviennent parfois au cours d'une grossesse.

L'adaptation à la nouveauté

À côté des maladies «naturelles», l'homme doit supporter les maladies qu'il a lui-même créées. Les crises cardiaques, par exemple, sont principalement dues à l'athérosclérose, un mal qui s'est répandu au cours du XX^e siècle, mais qui reste exceptionnel dans les populations de chasseurs-cueilleurs. La recherche épidémiologique nous indique comment les éviter : en consommant moins de matières grasses, en mangeant beaucoup de légumes et en faisant régulièrement de l'exercice. Pourtant, on continue de manger des gâteaux, des graisses, et les appareils d'entraînement physique finissent souvent empoussiérés ; la proportion des personnes obèses augmente (un Américain sur trois).

Nos comportements sont laxistes, parce que le cerveau humain a été forgé par la sélection naturelle : l'espèce humaine a évolué dans un environnement profondément différent de celui que l'on connaît aujourd'hui.

Les nouveaux environnements qui menacent la santé

Menaces fréquentes depuis 20 000 ans :

- Accidents
- Famines
- Prédateurs
- Maladies infectieuses



Menaces fréquentes aujourd'hui (dans les pays industrialisés) :

- Crises cardiaques, accidents vasculaires cérébraux et complications liées à l'athérosclérose
- Cancer
- Autres maladies chroniques de la vieillesse
- Diabète non insulino-dépendant
- Obésité
- Nouvelles maladies infectieuses



Dans la savane africaine, où apparut l'homme moderne, les matières grasses, le sel et le sucre étaient rares et précieux. Les individus qui pouvaient consommer de grandes quantités de graisses, quand l'occasion – rare – se présentait, en tiraient un avantage sélectif : ils avaient plus de chances de survivre aux famines auxquelles leurs congénères chétifs ne résistaient pas. Nous, leurs descendants, sommes toujours attirés par ces substances nourrissantes, qui abondent aujourd'hui. Cette attirance vient facilement à bout de notre réflexion et de notre volonté, d'autant plus qu'elle est attisée par les publicités que diffusent des sociétés concurrentes qui, pour survivre, doivent nous vendre toujours plus de tout ce que nous voulons bien acheter. Les hommes n'auraient-ils travaillé pendant des siècles que pour nous offrir abondance de lait et de miel et, avec eux, bon nombre de maladies et une mort prématurée ?

De surcroît, la consommation de drogues, notamment d'alcool et de tabac, favorise certaines maladies. Bien que l'usage de drogues soit ancien, on ne disposait pas, naguère, de drogues concentrées ni de seringues pour les injections. La plupart de ces substances, dont la nicotine, la cocaïne et l'opium, sont des défenses naturelles des plantes contre les insectes. Comme les hommes et les insectes ont un lointain ancêtre commun, diverses substances qui agissent sur les insectes agissent aussi sur notre système nerveux. Chaque être humain (et pas seulement quelques personnes ou quelques sociétés déstabilisées) est vulnérable aux drogues, car notre système biochimique a coévolué avec elles. La compréhension de ces interactions – tant actuelles qu'ancestrales –, pourrait améliorer les traitements de la toxicomanie.

L'augmentation rapide, et relativement récente, des cancers du sein résulte vraisemblablement, en grande partie, des modifications de l'environnement et des modes de vie ; seul un petit nombre de cas est dû à des anomalies génétiques. Boyd Eaton et ses collègues de l'Université Emory ont constaté que la proportion de cancers du sein dans les sociétés traditionnelles est bien inférieure à celle des pays industrialisés. La durée séparant la puberté de la première grossesse et le nombre total de cycles



2. L'APPENDICE ne disparaîtra sans doute pas. La pression évolutionniste tend à sélectionner les gros appendices, car, dans les petits (ci-dessus), une inflammation ou une tuméfaction risquent d'interrompre la circulation sanguine ; une nécrose ou une déchirure de l'appendice résultant de la multiplication des agents infectieux risquent d'entraîner la mort.

menstruels au cours de la vie d'une femme seraient des facteurs de risque notables. Dans les sociétés de chasseurs-cueilleurs, les premières règles surviennent vers l'âge de 15 ans ; la première grossesse survient quelques années plus tard, suivie de deux ou trois années d'allaitement, puis d'une nouvelle grossesse. Entre la fin de l'allaitement et une nouvelle grossesse, les femmes n'ont que quelques cycles menstruels, périodes pendant lesquelles les concentrations en hormones, potentiellement nuisibles pour les cellules du sein, sont élevées.

Au contraire, dans les sociétés industrialisées, les premières règles surviennent dès l'âge de 12 ou 13 ans (probablement parce que ses réserves en matières grasses suffiraient à une très jeune femme pour nourrir un fœtus), mais la première grossesse ne survient parfois que 20 ans plus tard, voire jamais. En moyenne, une femme a 150 cycles menstruels dans les sociétés de chasseurs-cueilleurs, mais plus de 400 dans les sociétés industrialisées. On ne peut prôner des grossesses précoces pour prévenir le cancer du sein, mais certains s'interrogent sur l'intérêt d'une prescription précoce d'hormones de grossesse afin de réduire le risque. Des évaluations de ce traitement sont en cours à l'Université de San Diego.

Toute adaptation exige des compromis. Si les os du bras étaient trois fois plus épais qu'ils ne le sont aujourd'hui, ils ne se casseraient quasiment jamais, mais *Homo sapiens* serait alors



une créature massive en quête incessante de calcium. Des oreilles plus sensibles seraient parfois utiles, mais nous serions distraits par le bruit des molécules d'air cognant sur nos tympans.

Compromis et contraintes

Des compromis génétiques existent aussi. Quand une mutation présente un avantage reproductif, sa fréquence augmente dans la population, même quand elle confère une vulnérabilité supérieure vis-à-vis de certaines maladies. Ainsi, les personnes qui ont deux exemplaires (ou allèles) du gène de l'anémie falciforme souffrent de douleurs aiguës et meurent jeunes ; les personnes dont le génome est normal risquent de mourir du paludisme dans les zones d'endémie. En revanche, celles qui ont un seul allèle du gène de l'anémie falciforme ne souffrent pas de la maladie et elles sont protégées contre le paludisme. Dans les régions où le paludisme est répandu, ces personnes sont le mieux adaptées, au sens darwinien. Ainsi, bien que le gène de l'anémie falciforme soit néfaste, il est sélectionné là où le paludisme est endémique. On ne peut dire alors quel est l'allèle « sain » : selon l'environnement, le génome humain « normal » change.

D'autres gènes responsables de maladies ont vraisemblablement conféré un avantage – au moins dans certains environnements –, sinon ils ne seraient pas si fréquents. La mucoviscidose tue 1 personne sur 2 500 en

Europe, par exemple : les gènes qui en sont responsables devraient finir par être éliminés du génome. Pourtant, ils persistent. Quels avantages le gène de la mucoviscidose confère-t-il ? Gerald Pier et ses collègues de la Faculté de médecine d'Harvard ont récemment montré que les porteurs d'un seul exemplaire du gène de la mucoviscidose semblent avoir moins de risques de contracter une fièvre typhoïde que les autres (le taux de mortalité de la fièvre typhoïde atteint 15 pour cent).

Le vieillissement est sans doute le meilleur exemple de compromis génétique. En 1957, l'un de nous deux (G. Williams) supposa que les gènes du vieillissement et de la mort ont été sélectionnés parce qu'ils ont des effets intéressants chez les jeunes, où la pression de sélection est la plus forte. Ainsi, un gène qui, en contrôlant le métabolisme du calcium, assurerait une consolidation rapide des os, mais entraînerait aussi un dépôt régulier de calcium sur les parois des artères serait-il sélectionné ? Oui, car, même s'il tue quelques personnes âgées, son intérêt pour la consolidation des fractures l'emporterait.

Le vieillissement : un compromis génétique

On a observé l'influence de ces gènes pléiotropes (qui ont de multiples effets) chez les drosophiles et chez les ténébrions (des insectes qui vivent dans les lieux sombres et dont les larves se développent dans la farine), mais pas chez l'homme. Sauf, peut-être, dans le cas de la goutte : cette maladie survient quand l'acide urique (un puissant antioxydant) forme des cristaux qui précipitent dans les articulations. D'une part, les antioxydants luttent contre le vieillissement et, d'autre part, les concentrations plasmatiques en acide urique, chez différentes espèces de primates, augmentent avec l'âge : des concentrations élevées en acide urique sont bénéfiques pour beaucoup de personnes, car elles ralentissent le vieillissement tissulaire, mais, en contrepartie, quelques personnes souffrent de goutte.

D'autres facteurs accélèrent le vieillissement. Ainsi, des défenses immunitaires énergiques nous protègent contre les infections, mais elles endommagent sans cesse nos tissus.

Il est possible que la plupart des gènes du vieillissement n'aient jamais aucune contrepartie avantageuse : ils seraient présents uniquement parce qu'ils sont transmis aux enfants avant que leurs effets néfastes ne se soient exprimés chez les parents (la sélection naturelle ne peut modifier les gènes qui ont déjà été transmis). Nous prévoyons qu'au cours des dix prochaines années les biologistes identifieront des gènes qui accélèrent le vieillissement et trouveront alors comment les inhiber. Auparavant, nous devrions être certains qu'en inhibant les effets délétères de ces gènes chez les personnes âgées, on ne bloque pas aussi d'éventuelles actions positives chez les personnes jeunes.

Comme l'évolution est irréversible, un organisme ne peut évoluer qu'à partir des structures existantes. Ainsi, nous l'avons souligné, l'œil des vertébrés est « imparfait ». En revanche, celui du calamar est parfait : les vaisseaux et les nerfs restent à l'extérieur, ne pénètrent que là où cela est nécessaire et immobilisent la rétine, qui ne peut pas se décoller. Seule la malchance est responsable des défauts de l'œil humain : il y a des centaines de millions d'années, la

Les principes de la médecine darwinienne

Une approche darwinienne de la médecine modifie certaines interprétations. Les principes suivants permettent de considérer santé et maladie dans un contexte évolutif :

Les **DÉFENSES** de l'organisme et les **SYMPTÔMES** sont des manifestations fondamentalement différentes des maladies.

BLOQUER LES DÉFENSES a des avantages, mais aussi des inconvénients.

La sélection naturelle contrôle les défenses comme un **DÉTECTEUR DE FUMÉE**, de sorte que le déclenchement des défenses et la douleur associée sont parfois excessives.

Les épidémies modernes surviennent vraisemblablement parce que la physiologie de l'organisme humain n'est pas adaptée aux **NOUVEAUX ASPECTS** de notre environnement.

Nos **COMPORTEMENTS**, façonnés dans un environnement ancestral pour optimiser notre succès reproducteur, sont aujourd'hui responsables de maladies et de mort prématurée.

L'organisme est une somme de **COMPROMIS**.

Un organisme humain **NORMAL** n'existe pas. Un génome humain **NORMAL** n'existe pas.

L'**ÉGOISME DE NOS GÈNES** guide les actes individuels, même au détriment de la santé et de la longévité.

Certains **GÈNES** responsables de maladies confèrent parfois des avantages ; d'autres ne deviennent pathogènes qu'en présence de nouveaux facteurs environnementaux.

La **VIRULENCE** des agents pathogènes peut changer.

Les **SYMPTÔMES** d'une infection peuvent profiter à l'agent pathogène, à la personne malade, à l'un et à l'autre, ou à aucun des deux.

Les maladies sont **INÉVITABLES** en raison de la façon dont les organismes ont évolué.

Face à une maladie, on **S'INTERROGE** : pourquoi certaines personnes sont-elles contaminées, d'autres pas ? On doit rechercher une **EXPLICATION ÉVOLUTIONNISTE** à la vulnérabilité face aux maladies.

Contrairement aux maladies qui ne sont pas le fruit de la sélection naturelle, la **VULNÉRABILITÉ** en est le produit.

Le vieillissement est plutôt un **COMPROMIS** qu'une maladie.

Les recommandations médicales doivent reposer sur des **ÉTUDES CLINIQUES** ; la théorie, si elle n'est pas scientifiquement fondée, risque d'être nuisible.

couche de cellules qui, chez nos ancêtres, devint sensible à la lumière n'était pas disposée de la même façon que la couche équivalente des calmars. Les deux structures ont alors évolué chacune à leur façon, et il n'existe aucun moyen de revenir en arrière.

Cette interdépendance des mécanismes évolutifs explique, par exemple, que l'on risque de s'étouffer quand des aliments solides obstruent nos bronches : les voies respiratoires et digestives se croisent parce que, chez un ancêtre des poissons à poumons, l'air était inspiré par un orifice situé sur le dessus du museau et aboutissait dans un espace localisé sur le trajet des aliments.

Des organes inutiles et qui risquent d'entraîner la mort ont même parfois été sélectionnés : c'est le cas de l'appendice, vestige d'une cavité que nos ancêtres utilisaient au cours de la digestion. Aujourd'hui, l'appendice ne sert plus à rien : pourquoi la sélection naturelle ne l'a-t-elle pas éliminé ? Une appendicite résulte d'une inflammation, et d'un gonflement qui comprime l'artère irriguant l'appendice. Quand le sang circule normalement, les bactéries ne peuvent se développer. En revanche, toute réduction du débit risque de favoriser une infection, donc un gonflement, lequel comprime l'artère et diminue encore le débit sanguin. Quand le sang cesse de circuler, les bactéries se multiplient jusqu'à ce que la paroi de l'appendice se rompe. Un petit appendice risque plus d'être infecté, et c'est pourquoi, paradoxalement, la pression de sélection favorise les gros appendices. L'organisme humain n'est pas parfait, et une analyse évolutive révèle que certains des organes ou des mécanismes physiologiques hérités de nos ancêtres sont néfastes ; nous avons même un certain nombre de « talons d'Achille » soigneusement épargnés par la sélection naturelle.

Évolution de la médecine darwinienne

Malgré la puissance du modèle darwinien, la biologie évolutionniste s'est difficilement imposée. La plupart des maladies diminuent la capacité de transmission des gènes : la sélection naturelle semble expliquer la santé, mais pas la maladie. L'approche darwinienne n'a de sens que si l'on se demande pourquoi l'on est sensible aux maladies. De surcroît, il est erroné de croire que la sélection naturelle privilégie la santé :

elle ne fait qu'optimiser le succès reproducteur des gènes. Les gènes qui augmentent le succès reproducteur sont de plus en plus nombreux, même s'ils compromettent la santé des individus qui les portent.

Ainsi, l'histoire et diverses conceptions erronées ont entravé le développement de la médecine darwinienne. Une approche évolutionniste ne sera pas acceptée avant d'avoir été débarrassée de certaines idées reçues : par exemple, chaque fois que l'évolution et la médecine sont associées, le spectre de l'eugénisme réapparaît. Or, même si l'approche darwinienne montre que tous les organismes humains sont également vulnérables face à la maladie, nous ne pouvons envisager, ni *a fortiori* même mettre en œuvre une quelconque tentative d'amélioration de l'espèce. En revanche, notre approche souligne que des défauts génétiques apparents ont parfois une utilité adaptative méconnue, qu'un génome « normal » n'existe pas, et que la notion de « normalité » est même simpliste.

L'application systématique de la biologie évolutionniste à la médecine est une entreprise toute nouvelle. Comme la biochimie au début du ^{xx}e siècle, la médecine darwinienne devra démontrer son utilité. Il faudra du temps et des moyens aux spécialistes de cette nouvelle discipline pour tester leurs hypothèses et les valider.

La perspective évolutionniste relie la maladie et le fonctionnement normal, fédère des voies de la recherche médicale jusqu'alors disjointes et ouvre de nouveaux domaines aux biologistes. Si ces recherches sont fructueuses, la biologie évolutionniste devrait devenir une science médicale fondamentale à part entière.

Randolph NESSE est professeur de psychiatrie à la Faculté de médecine du Michigan. George Williams est professeur émérite d'écologie et d'évolution à l'Université de Stony Brook.

P.W. EWALD, *Evolution of Infectious Disease*, Oxford University Press, 1994.

M.T. McGUIRE et A. TROISI, *Darwinian Psychiatry*, Harvard University Press, 1998.

Evolution in Health and Disease, sous la direction de S. Stearns, Oxford University Press, 1998.

W.R. TEVATHAN et al., *Evolutionary Medicine*, Oxford University Press, à paraître.

L'instructive histoire des noms de familles

JEAN-MARIE LEGAY • MICHEL VERNAY

La transmission des noms de familles obéit à des lois génétiques. Leur histoire renseigne sur l'Histoire des hommes, sur leur origine géographique et sociale, ainsi que sur les migrations.

En France, les patronymes se transmettent par le père, et cette transmission est analogue à celle d'un gène porté par le chromosome Y (chromosome sexuel présent uniquement chez l'homme). Associant ainsi patronymie et génétique, les noms de familles constituent un outil efficace de connaissance de l'histoire migratoire et démographique depuis leur émergence, il y a environ sept siècles.

Aucun autre marqueur n'offre une telle possibilité : dans le meilleur des cas, les généalogies ne remontent guère au-delà du XVI^e siècle, quant aux analyses à partir des allèles (des variantes de gènes), d'une part, elles ne sont disponibles que pour les populations contemporaines et, d'autre part, les allèles ont émergé il y a trop longtemps pour permettre une exploration efficace de notre histoire récente. Aussi l'analyse de la dynamique et de la dispersion géographique des

patronymes est-elle devenue un axe important de recherche en génétique des populations.

Après avoir analysé les mécanismes d'apparition, de transmission et de disparition des patronymes, nous examinerons comment, dans quelques départements, la répartition des patronymes renseigne sur l'immigration, ainsi que sur les mécanismes de

diffusion des patronymes. Lorsque l'on étend la zone de couverture, la répartition des variantes orthographiques ou de prononciation d'un patronyme permet de retrouver son origine géographique, alors qu'à l'examen de la répartition du patronyme lui-même, cette information n'apparaissait pas. Enfin, nous verrons comment l'isonymie matrimoniale (les mariages entre personnes qui portent le même nom) renseigne sur la parenté généalogique.

Le besoin d'identification a conduit les hommes à se donner des noms. Dans des groupes peu nombreux, l'identification n'était pas difficile et, aujourd'hui encore, certaines populations emploient des procédés simples. Selon Roberte Tomasone, les Pygmées Aka de la région de Basse Lobaye, en

République centrafricaine, désignent le nouveau-né du nom d'un objet caractéristique (plante, animal) de l'environnement où sa mère lui a donné le jour. Les Esquimaux de Thulé se servent du nom d'un parent connu et apprécié qu'ils réutilisent pour le nouveau-né, espérant ainsi lui donner les qualités de l'ancêtre. Les Touaregs du Hoggar tirent à la courte paille après la naissance un nom parmi plusieurs considérés comme convenables et choisis avant la naissance ; on y accole le nom du père et on y ajoute parfois un surnom.

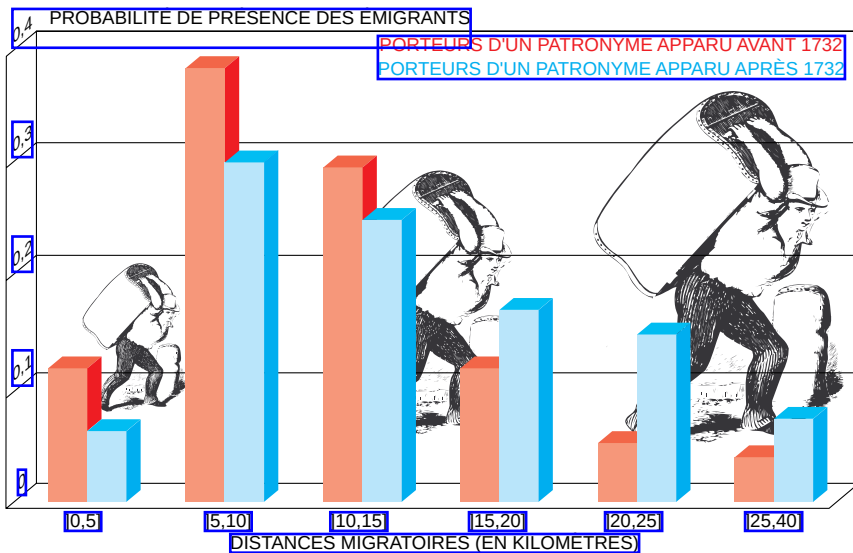
Les premiers noms

Dans la plupart des populations, ce premier nom, qui est définitif, va devenir un prénom (un nom de baptême dans le monde catholique) qui ne peut rester seul, car les possibilités sont trop peu nombreuses pour ne pas entraîner répétitions et donc confusions : seules quelques centaines de prénoms existaient et les plus usités étaient moins d'une centaine. En France, dès le IX^e siècle, on commence ainsi à associer un deuxième qualificatif au prénom en se fondant sur l'origine géographique locale (Jean du Pré, Jean de la Plaine),

sur le métier (Jean le Maçon), sur une caractéristique physique marquante (Jean le Rouge, en raison de la couleur des cheveux), intellectuelle ou morale (Jean le Goupil, rusé comme un renard) et, d'une façon générale, sur toutes sortes de sobriquets plus ou moins durables (Charles le Mauvais, Pierre le Hardi, etc.).

L'usage du deuxième nom s'établit progressivement au XII^e siècle, un peu plus vite en ville qu'à la campagne. Cette pratique se généralise en France au XIII^e siècle. Pour ce nom, la parenté entre en jeu dans le repérage de l'individu. On dit explicitement que telle personne est le fils ou la fille de l'autre. Toutes les langues conservent des traces de cette pratique : Gustavson était le fils de Gustav, Ivanovitch, le fils d'Ivan, Ibn Hazm le fils d'Hazm, etc. Ce repérage par la parenté va rapidement prendre une importance considérable, car le nom passe ainsi de l'individu à la famille, et finalement, le nom devient héréditaire, d'abord dans les familles royales, puis ailleurs. Il s'accompagnera de la propriété d'une terre, d'un château, mais aussi de biens plus modestes comme une échoppe ou une maison.

1. PHOTOGRAPHIE DE MARIAGE du début du siècle. Les mariages entre cousins plus ou moins éloignés, mais portant le même nom, et l'absence de descendants, renforcent certains patronymes et en éliminent d'autres. Sur les 488 000 patronymes différents répertoriés en France, entre 1891 et 1915, 152 000 disparaissent dans la période 1916-1940, dont 115 000 étaient portés par un seul individu.



2. L'EVOLUTION DE LA PROBABILITE DE PRESENCE des individus nés dans quatre communes rurales de la vallée de la Valeserine (Ain,) entre 1871 et 1910, fait apparaître que les porteurs d'un patronyme apparu dans la vallée après 1732 sont moins enracinés : ils migrent plus loin que les porteurs d'un patronyme apparu antérieurement.

Les règles déterminant l'héritage d'un nom ont posé des problèmes, mais c'est la voie patrilinéaire (les enfants prennent le nom de famille de leur père) qui a finalement emporté, avec des tentatives diverses de modulations, plus ou moins heureuses. Par exemple, dans le monde hispanique, on associe le nom du père et le nom de jeune fille de la mère : les enfants portent simultanément les patronymes des grands-pères paternels et maternels. Par exemple, l'auteur de *Cent ans de solitude* se nomme Gabriel Garcia Marquez, où Garcia était le nom de son père et Marquez celui de sa mère. En revanche, l'association de plus de deux noms est matériellement trop lourde.

La féminisation des noms est un moyen complémentaire de différen-

ciation des personnes. Dans la région lyonnaise, au XV^e siècle, un Gonthier est devenu Gonthière : il désigne la femme dans cette famille.

Les exigences économiques et sociales vont conforter l'évolution vers une meilleure reconnaissance individuelle. L'organisation administrative de la société requiert des évaluations démographiques, des décomptes, et, finalement, de véritables recensements. Dès 1539, l'ordonnance de Villers-Cotterêts (établie par François I^{er}), qui impose le français comme langue officielle, donne naissance à l'état civil en obligeant les curés à tenir des registres de baptême et de décès. Toutefois, ce n'est qu'après la Révolution, en 1803, que l'héritage patronymique devient patrilinéaire.

Auparavant, les gens étaient libres d'adopter le nom de leur choix, interdisant les recherches de filiation.

L'étude des noms de personnes (l'anthroponymie) a montré que, pour la France, leur origine (l'onomastique) pouvait être latine, gallo-latine, gallo-germanique, puis plus proprement française ; à ces patronymes se sont mêlées des introductions étrangères, italienne, flamande, allemande, ou des influences confessionnelles, chrétienne et juive. Les interactions entre l'anthroponymie, l'histoire, la sociologie et, bien entendu, la linguistique, sont fortes et extrêmement instructives.

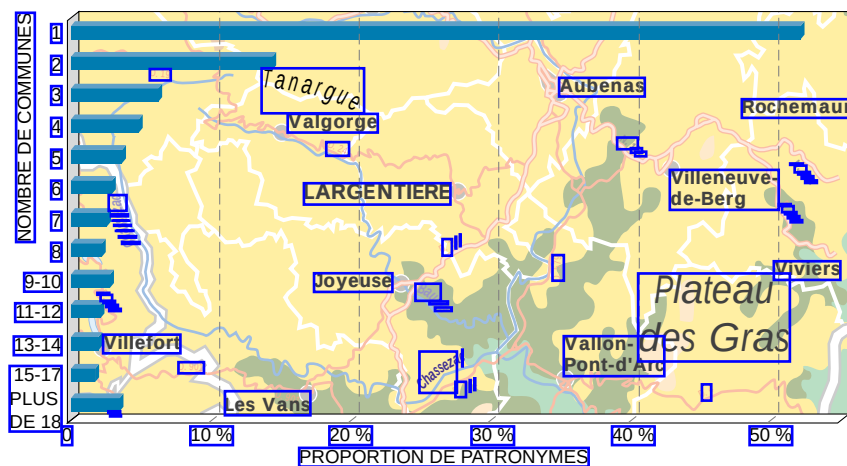
Lorsque le nom devient héréditaire, l'analogie avec l'hérédité génétique est patente. Le patronyme est alors un marqueur de l'hérédité patrilinéaire. Dès lors, l'étude des patronymes n'est plus seulement une curiosité historique sur l'origine des familles, mais elle devient un moyen d'investigation de la biologie et de la génétique des populations humaines. Nous en verrons quelques illustrations.

Variations des fréquences des patronymes

Les patronymes sont très variés. Parmi les naissances enregistrées en France métropolitaine entre 1891 et 1915, l'équipe de Pierre Darlu, du Laboratoire d'épidémiologie génétique de l'INSERM, a dénombré environ 489 000 patronymes différents, dont plus du tiers (174 000) ne sont représentés qu'une seule fois. Mais ces décomptes sont très discutés en raison des erreurs dans les registres et des modifications orthographiques. En 1986, la Société France Télécom recensait 800 000 patronymes distincts parmi près de 30 millions d'abonnés au téléphone.

Si leur caractère héréditaire confère aux patronymes une certaine stabilité, plusieurs phénomènes modifient leur fréquence. Ainsi, au cours du temps, l'ensemble des patronymes n'est pas figé : certains patronymes se sont éteints, d'autres ont fait leur apparition, d'autres encore ont seulement vu leur importance augmenter ou se réduire, au gré des crises démographiques.

Par quels mécanismes les fréquences patronymiques sont-elles modifiées ? La disparition d'un patronyme résulte de l'arrêt de certaines lignées porteuses de tel ou tel patronyme, par l'absence totale de descendants ou par l'absence



3. REPARTITION DES PATRONYMES en fonction du nombre de communes où ils sont présents, dans l'arrondissement de Largentière (Ardèche), entre 1891 et 1915. La plupart des patronymes présents dans une seule commune sont des patronymes portés par une seule famille. Ainsi, la proportion de ces patronymes est un indicateur de l'immigration.

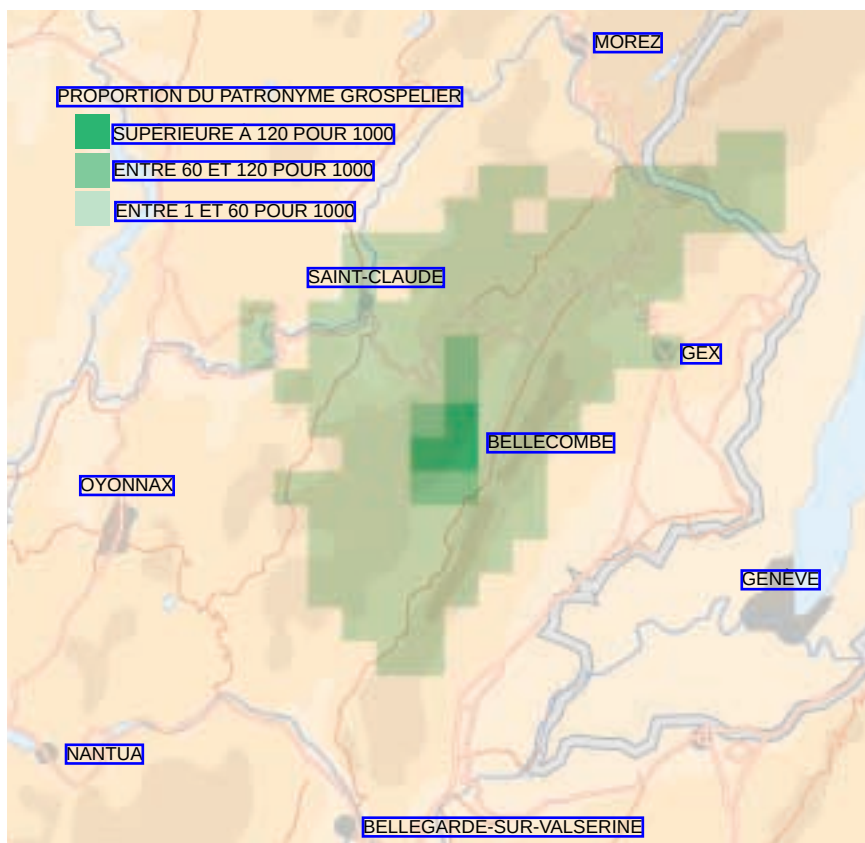
de descendants de sexe masculin. La disparition de patronymes est attestée par les tombes abandonnées dans les cimetières et par l'étude d'arbres généalogiques. Selon certains généticiens des populations, en raison de ces disparitions de lignées, les Français actuels descendraient d'une dizaine de familles seulement du temps de Charlemagne!

Au-delà des différences individuelles de fertilité (quelle que soit l'époque, environ dix pour cent des couples n'ont pas de descendants), d'autres facteurs, comme la mortalité infantile, le taux de nuptialité, les obligations de célibat dans certaines religions et la mobilité géographique ont également joué sur le nombre final de descendants et, par conséquent, sur le devenir des patronymes d'une génération à l'autre. Aux facteurs biologiques influant sur la fertilité, s'ajoute une très forte sélection sociale : on se marie avec des personnes qui ont les mêmes revenus, les mêmes possessions agricoles ou le même niveau d'instruction. Cette endogamie joue sur la répartition des patronymes dans les différentes couches sociales.

Lors de l'analyse des émigrants qui quittaient quatre communes rurales de la vallée de la Valserine (département de l'Ain), il nous est ainsi apparu que la migration dépendait de l'«enracinement» généalogique des individus, enracinement révélé par la durée de présence dans la vallée du patronyme porté (voir la figure 2). La probabilité de rester sur place est d'autant plus élevée et le rayon de migration est d'autant plus court (si un départ survient) que le patronyme porté est apparu tôt dans les registres de baptême.

La différence de fécondité entre les groupes renforce la ségrégation géographique de certains individus et, en conséquence, augmente, dans certaines régions, le poids démographique, génétique, mais aussi social et culturel de certains groupes au détriment d'autres groupes. Par exemple, dans la vallée de la Valserine, on observe que les émigrés récents ont, en moyenne, moins d'enfants que les natifs, peut-être en raison d'une crainte de l'avenir qui n'existe pas chez les plus anciens habitants.

Les apparitions de nouveaux patronymes résultent essentiellement de trois mécanismes. Le premier est dû à un choix délibéré : les porteurs de patronymes incongrus, de prononciation difficile, ou encore donnant des indices



4. LA RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE des naissances des individus du nom Grospeilier dans la région du Haut-Jura pour la période 1891-1915 est typique d'une diffusion suivant le modèle de l'isolation par la distance : très élevé dans la commune jurassienne de Bellecombe (17 pour cent des patronymes), le nombre de porteurs de ce nom diminue à mesure que l'on s'éloigne du foyer principal.

d'origines (ethniques ou confessionnelles) non souhaitées, demandent officiellement à modifier leur nom, ce qui est souvent accepté. Le deuxième mécanisme est involontaire : c'est celui des erreurs de prononciation ou de transcription, encore fréquentes aujourd'hui, même dans une administration d'état civil qu'on pourrait croire au-dessus de toute faiblesse. Enfin, le troisième mécanisme résulte d'échanges migratoires plus ou moins anciens avec d'autres pays ou régions. Par exemple, au lendemain de la Première Guerre mondiale, on note, dans les registres des naissances des agglomérations de la vallée du Rhône, l'apparition de nombreux patronymes d'origine arménienne (tels Aznavourian ou Dolabjian), jamais enregistrés auparavant, conséquence de l'exode des Arméniens à la suite du génocide perpétré par la Turquie, en 1915.

Le bilan des mécanismes d'émergence et de disparition que nous venons d'évoquer est aujourd'hui négatif. Le système anthroponymique actuel entraîne un appauvrissement du capital de patronymes. Depuis l'ordonnance de

Villers-Cotterêts, les noms fréquents sont avantagés aux dépens des noms rares.

Les noms se raréfient

L'historien Michel Tesnière évalue les pertes séculaires à environ 8 000 patronymes. D'autres historiens, dont Anne Lefèvre-Teillard, de l'Université Paris 2, vont jusqu'à proposer un assouplissement du régime actuel de l'état civil, et la possibilité d'une «mutabilité contrôlée» pour sauvegarder la fonction sociale des noms. Ainsi, on autoriserait, par exemple, la transmission du patronyme du grand-père maternel lorsque celui-ci est menacé d'extinction.

Ces énoncés des phénomènes d'apparition et de vie des patronymes montrent que des questions aussi anodines que : pourquoi ne nous appelons-nous pas tous Martin (le nom français le plus fréquent aujourd'hui) ou pourquoi tel patronyme n'est-il présent que dans telle région, renvoient à des interrogations plus générales sur la structure et sur le fonctionnement des populations humaines.

Faute d'un enregistrement spécifique, l'estimation de l'orientation et de l'intensité des flux migratoires, notamment à l'intérieur d'une même région, demeure un problème délicat. Ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale que l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) a introduit, dans les formulaires de recensement, une rubrique relative à la localisation géographique des individus lors du précédent recensement, permettant ainsi de mesurer les mouvements migratoires.

Les patronymes, marqueurs migratoires

L'utilisation des patronymes comme marqueurs migratoires dépend étroitement de leur spécificité géographique : peut-on distinguer les individus selon l'aire géographique

d'origine de leurs ancêtres paternels, alors même que le souvenir de cette origine a probablement disparu ? Nous allons examiner cette question. Avant de pouvoir utiliser les patronymes comme marqueurs migratoires, nous devons répondre à deux questions portant sur l'origine géographique des patronymes. D'abord les patronymes étudiés ont-ils une origine multiple ou unique ? Ensuite, quelles sont les similitudes entre la répartition géographique des patronymes observée à un instant donné, et l'orientation et l'intensité des flux migratoires intervenus par le passé.

La première question n'a pas de réponse directe, car, d'une part, les patronymes sont apparus bien avant la promulgation de l'ordonnance de Villers-Cotterêts et, d'autre part, la mise en place du recueil systématique des données démographiques n'a pas été

immédiate partout. Ainsi, hormis quelques généalogies de familles nobles, on ne dispose pas de généalogies anciennes, contemporaines de l'émergence des patronymes.

En revanche, l'analyse de la dispersion géographique des patronymes permet de retracer l'origine des patronymes, car la répartition par commune des porteurs d'un même patronyme est extrêmement inégale. L'étude des patronymes figurant dans les actes de naissance des communes de l'arrondissement de Largentière (département de l'Ardèche) entre 1891 et 1915 illustre cette grande hétérogénéité géographique (voir la figure 3).

Parmi les 25 118 actes de naissance répertoriés, 2 128 patronymes différents ont été dénombrés : pour 1 000 naissances, on ne décompte en moyenne que 85 patronymes différents, ce qui est relativement peu. Il serait pourtant erroné d'en déduire que tous les Ardéchois portent le même nom de famille, car plus de la moitié des patronymes (1 106) ne sont présents que dans une seule commune et les deux patronymes les plus répandus (Martin et Reynaud) ne sont présents que dans 45 des 110 communes de l'arrondissement, c'est-à-dire dans moins de la moitié de l'arrondissement. Dans le même temps, à peine dix pour cent des patronymes sont simultanément présents dans plus de dix communes. Ainsi, la spécificité géographique et la diversité des patronymes se révèlent beaucoup plus importantes qu'on ne le suppose généralement, y compris pour des aires géographiques limitées.

Peut-on approfondir la constatation selon laquelle les noms de familles sont inégalement distribués sur le territoire ? La cartographie des aires géographiques où résident les porteurs d'un patronyme constitue une méthode d'investigation plus fine des mécanismes migratoires, utilisée depuis longtemps en écologie et en épidémiologie. Ainsi, l'étude de 175 communes réparties entre la région montagneuse et rurale du Haut-Jura (en limite des départements de l'Ain et du Jura) et les proches alentours précise quelques aspects de la diffusion géographique des patronymes.

Sur les 170 patronymes les plus fréquents analysés (entre 1891 et 1915), 80 patronymes se répartissent de manière caractéristique : ils n'apparaissent que dans un nombre réduit de

L'évolution génétique

En se fondant sur les mécanismes de l'évolution génétique, on peut examiner les mécanismes de l'évolution des patronymes. Entre deux générations successives, les variations des fréquences patronymiques (ou des allèles) résultent de quatre mécanismes distincts.

Premièrement, la dérive génétique. La constitution d'une nouvelle génération relève d'un processus d'échantillonnage du stock d'allèles des parents. La dérive génétique recouvre les fluctuations aléatoires de fréquence qui se produisent à cette occasion : certains allèles parentaux disparaissent, tandis que d'autres sont fixés. Ce phénomène amplifie progressivement la différenciation génétique entre les populations. À l'échelle des communes, l'amplitude des fluctuations des fréquences patronymiques est importante, car le nombre des patronymes est élevé (les fréquences correspondantes sont donc faibles) et le nombre des naissances est généralement réduit.

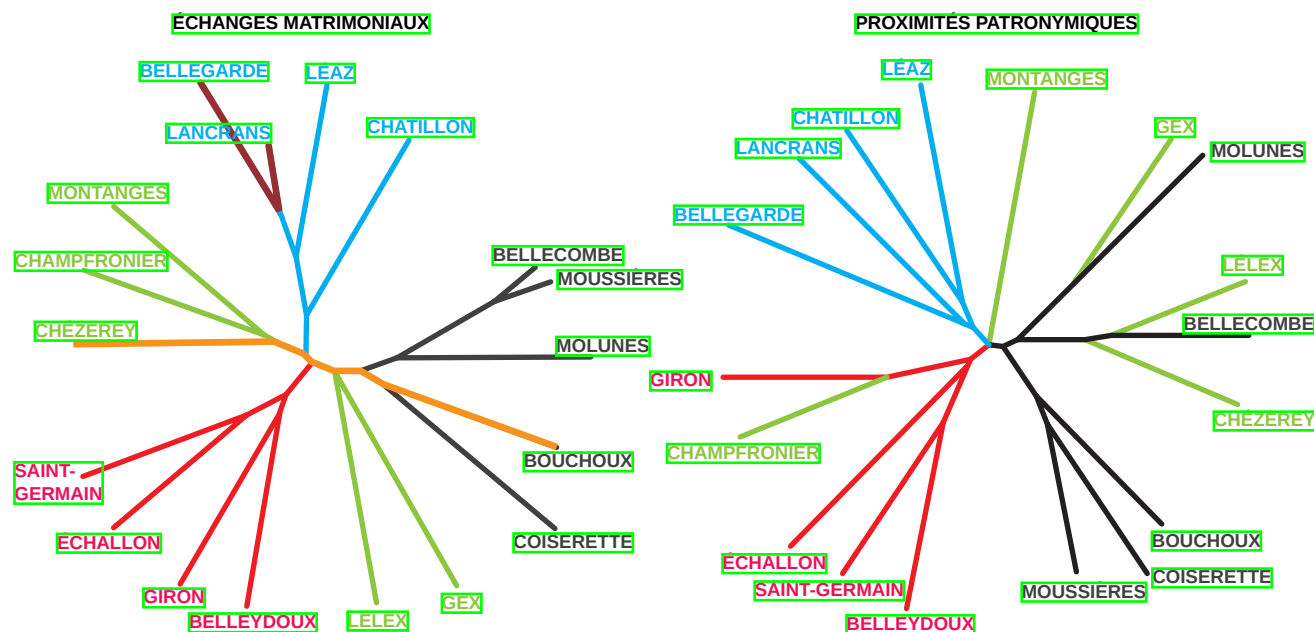
Deuxièmement, les migrations entraînent la diffusion géographique des allèles. En cela, elles s'opposent à la différenciation induite par la dérive génétique. À côté des grands mouvements historiques, comme les grandes migrations du Néolithique, qui portent sur de grandes distances et de longues périodes (entre -7600 et -4000, la culture néolithique a diffusé à travers toute l'Europe à partir du Moyen-Orient), les migrations locales (à l'échelle d'une région) dépendent de l'éloignement, car l'intensité des échanges de gènes diminue très rapidement avec la dis-

tance. Par exemple, la probabilité pour que deux personnes se marient diminue avec la distance entre les habitations initiales des futurs conjoints.

Troisièmement, la sélection recouvre les processus d'origine biologique ou sociale (fécondité différentielle, mortalité périnatale et infantile...) qui affectent la descendance finale des couples et entraînent à terme la disparition de certains allèles au profit d'autres. Les patronymes sont généralement assimilés à des allèles sélectivement neutres, dont la répartition géographique ne dépend que de la dérive génétique et des migrations. Ils sont en revanche dépendant d'autres caractéristiques individuelles (catégorie socioprofessionnelle, appartenance ethnique ou religieuse...) qui ont probablement une incidence sur le nombre final de descendants. Par exemple, dans la vallée de la Valserine, le nombre d'enfants moyen d'un couple dépend de l'enracinement du couple dans la région.

Enfin, les mutations constituent le seul mécanisme susceptible d'engendrer de la diversité génétique ou patronymique. Le très grand polymorphisme patronymique et ses causes multiples (erreurs de transcription, modifications orthographiques) représentent encore une difficulté, et les tentatives d'analyse systématique des « mutations » patronymiques demeurent peu nombreuses (voir la figure 6).

Dans les populations, la répartition géographique observée à un instant donné d'un allèle ou d'un patronyme résulte de ces phénomènes antagonistes.



5. CARTOGRAPHIE SOUS FORME DE DENDROGRAMMES des échanges matrimoniaux (à gauche) et des proximités patronymiques (à droite) pour 18 communes du Haut-Jura durant la période 1801-1830. Sur le diagramme de gauche, la longueur du chemin entre deux communes est inversement proportionnelle à l'intensité des échanges matrimoniaux entre les personnes de ces communes (le nombre de mariages entre ces communes). Par exemple, le nombre des mariages entre les habitants de Bellegarde et ceux de Locrans (*chemin marron*) est supérieur aux mariages entre les habitants de Chézerey et ceux de Bouchoix (*chemin orange*). Sur le diagramme de droite, la

longueur du chemin est inversement proportionnelle à la proximité patronymique, la probabilité pour que deux individus de ces communes portent le même nom. Chaque couleur correspond à une vallée. Ainsi, la proximité patronymique et les échanges matrimoniaux sont similaires. Les rares différences résultent de problèmes spécifiques, essentiellement dans la vallée de la Valserine (*en vert*). Par exemple, la commune de Lélex, créée au début du XVIII^e siècle, résulte en partie d'un essaimage d'individus originaires de Chézerey, ce qui explique leur proximité patronymique malgré des échanges matrimoniaux relativement faibles.

communes et les communes où ils sont présents ne sont pas distribuées au hasard (ces communes sont souvent limitrophes). À mesure que l'on s'éloigne de la zone où le nombre de patronymes est maximal, la fréquence des porteurs diminue (*voir la figure 4*).

La diminution de cette fréquence, en fonction de l'éloignement géographique de la zone principale, obéit au modèle de l'isolation par la distance, énoncé par Gustave Malécot en 1955 (ce mathématicien français, mort en 1998, est l'un des pionniers de la génétique des populations, qui prédit une décroissance exponentielle de la fréquence patronymique en fonction de la distance géographique. Cette dispersion est typique d'une diffusion progressive et isotrope à partir d'un foyer unique.

Répartition des patronymes et flux migratoires

La question des similitudes entre la répartition géographique des patronymes et l'intensité des flux migratoires anciens est également délicate. D'abord, ces deux notions ne se réfèrent pas au même intervalle de temps. En général, les données migratoires

portent sur des périodes courtes (en démographie historique, les migrations sont souvent estimées en comparant les lieux de naissance et de mariage des conjoints qui figurent sur les actes de mariage). Les flux migratoires sont donc une mesure instantanée dont la valeur ne reflète pas nécessairement les flux antérieurs.

En revanche, la dispersion géographique d'un caractère comme les patronymes reflète l'ensemble des phénomènes qui ont affecté la répartition des porteurs depuis leur émergence, c'est-à-dire les flux migratoires contemporains et passés. Mais cette dispersion reflète aussi d'autres phénomènes, comme la sélection (les mécanismes sociaux qui modifient la descendance des couples) ou la dérive patronymique, susceptibles d'avoir modifié la survie des patronymes.

Pour comparer la dispersion géographique et l'intensité des flux migratoires, nous avons entrepris, dans le Haut-Jura, l'estimation de l'intensité des flux migratoires entre les 18 communes de la région, à partir des registres de mariages de la période 1801-1890 : on mesure le nombre de mariages entre natifs de ces communes. Nous avons ensuite déterminé la

«proximité patronymique» entre les villages, en nous fondant sur la probabilité moyenne pour que deux individus portent le même patronyme (deux populations sont alors d'autant plus proches que cette probabilité est élevée). Après comparaison, nous avons établi qu'au XIX^e siècle, la proximité patronymique et l'intensité des flux migratoires sont très similaires (*voir la figure 5*).

En général, l'intensité des échanges matrimoniaux et les proximités patronymiques dépendent étroitement de l'éloignement géographique entre les communes. De surcroît, au-delà d'un rayon moyen de 15 kilomètres, les échanges sont quasiment inexistantes et la probabilité de rencontrer deux individus portant le même patronyme est quasi nulle. Localement, un patronyme peut être porté par un tiers (voire plus) des natifs, et les aires de répartition des patronymes sont de taille limitée, conséquence ancienne d'une mobilité géographique limitée et de relations confinées à un voisinage proche.

L'élargissement de la zone d'étude soulève de nouvelles difficultés, car certains patronymes sont alors trop fréquents pour qu'ils aient une origine géographique unique.

La répartition des variants

À titre d'exemple, la répartition géographique des individus porteurs du patronyme Legay, tels qu'ils apparaissent dans l'annuaire du téléphone de l'année 1975, met en évidence l'existence de trois aires de prévalence maximale (voir la figure 6). L'absence complète du patronyme dans 30 départements, à la date indiquée, montre la présence et la persistance d'une forte hétérogénéité géographique qui va à l'encontre de l'idée communément admise selon laquelle le mode de vie contemporain aurait entraîné un brassage général de la population.

La persistance actuelle, récemment observée par Nicholas Mascie-Taylor et ses collaborateurs de l'Université de Cambridge, d'une répartition géographique inégale des allèles sanguins, en Grande-Bretagne, corrobore d'ailleurs cette observation (les allèles sont différentes versions du même gène, par exemple les allèles A, B et O qui s'expriment dans les cellules sanguines).

Par ailleurs, on ne peut éviter de s'interroger sur un lien de parenté entre tous les porteurs d'un même patronyme. Nous avons déjà évoqué, comme cause possible de l'émergence de nouveaux patronymes, la déformation progressive d'un nom, suite à des erreurs de transcription ou de prononciation.

Ce mécanisme est bien connu en génétique et en linguistique : qu'elles soient dues à une erreur de réplication de l'ADN ou à une modification de la prononciation, les mutations sont à la base de l'évolution biologique et linguistique. Généticiens et linguistes savent également qu'elles s'accumulent dans les zones les plus anciennement peuplées, c'est-à-dire là où elles ont eu le plus de temps pour survenir. Inversement, les régions où la diversité génétique ou linguistique est la plus importante peuvent être considérées comme des foyers originels (c'est d'ailleurs ce type de raisonnement qui permet aujourd'hui de conclure au foyer originel unique de l'homme moderne).

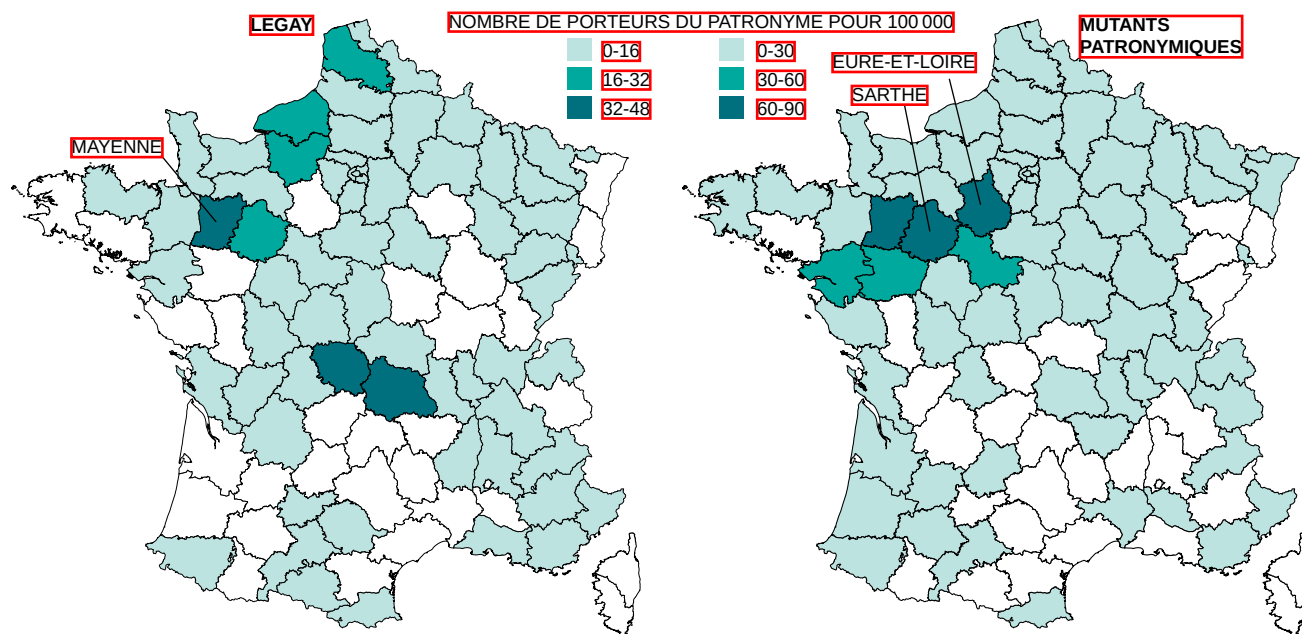
Dans le cas du patronyme Legay, nous avons étudié la répartition de tous les individus porteurs d'une forme patronymique voisine et susceptible d'avoir dérivée de la forme principale (voir la figure 6). Cette étude aboutit de fait à des conclusions assez différentes de l'étude faite sur le patronyme «non muté». Les formes mutantes présentent un foyer principal unique (situé dans le Nord du Val de Loire) qui recoupe l'un des trois foyers identifiés pour la forme principale du patronyme. Des trois aires principales de répartition du patronyme Legay, une seule serait donc suffisamment ancienne pour avoir permis

l'accumulation, au cours du temps, de formes mutantes ; les deux autres ne seraient que des aires secondaires, correspondant à des régions où le patronyme a été introduit plus tardivement.

L'éventuelle hypothèse d'une introduction ultérieure du patronyme, à partir d'un foyer originel unique, soulève évidemment de nombreuses interrogations quant à la nature (déplacements ponctuels ou grégaires) et à la date (nous savons déjà qu'elle est antérieure à l'exode rural) de cette diffusion géographique.

La transmission patrilinéaire des noms de familles (analogue en partie à celle du chromosome Y) a suggéré aux généticiens des populations que les patronymes seraient de bons marqueurs de la parenté généalogique. En 1965, James Crow, de l'Université du Wisconsin, et Arthur Mange, de l'Université d'Amherst, établissent les premiers modèles de cette transmission. Deux individus porteurs du même patronyme sont alors non seulement supposés avoir des ancêtres originaires de la même région, mais également avoir au moins un ancêtre commun.

Selon ce modèle, la fréquence des mariages isonymes (c'est-à-dire conclus entre deux conjoints portant le même patronyme) permet d'estimer le nombre d'unions entre apparentés (voir l'encadré ci-contre). Ces unions résultaient souvent de règles matrimoniales



6. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE des porteurs du patronyme Legay (à gauche) et des formes «mutantes» de ce patronyme (dont l'orthographe ou la prononciation sont voisines, comme Legeay) (à droite). Alors que le patronyme possède trois zones de prévalence principales (Région du Centre, Val de Loire et Nord-Pas-de-Calais / Haute-Nor-

mandie), les formes mutantes se concentrent principalement dans la partie septentrionale du Val de Loire (Mayenne, Sarthe et Eure-et-Loire). Ainsi, le département de la Mayenne, qui possède simultanément une proportion élevée de la forme principale et des formes mutantes, constituerait le foyer du patronyme.

strictes : c'était autrefois le cas chaque fois que le mariage servait un dessein politique dans les familles royales et nobles, un dessein économique ou social, par exemple, pour éviter le morcellement des terres cultivables, ou dans certains pays musulmans où, par exemple, une veuve ne peut épouser en seconde noce qu'un membre de la famille de son mari (frère, oncle, etc.). À cette composante «volontaire» (qualifiée de non aléatoire) de la consanguinité, que l'on peut mesurer, s'ajoute une composante aléatoire. Dans un système où seul le hasard serait à l'origine des unions, l'isonymie aléatoire dépendrait uniquement de la fréquence du patronyme parmi les femmes et les hommes. En pratique, l'isonymie «aléatoire» n'est jamais uniquement due au hasard, mais reflète aussi les contraintes du milieu, comme l'âge, l'éloignement géographique, le rang social, ou tout simplement la démographie.

Patronymes et consanguinité

L'isonymie matrimoniale fournit des estimations de consanguinité pour des périodes reculées, à des époques où les généalogies sont trop incomplètes pour rendre compte de l'ensemble des liens généalogiques, notamment ceux qui relèvent de la parenté éloignée.

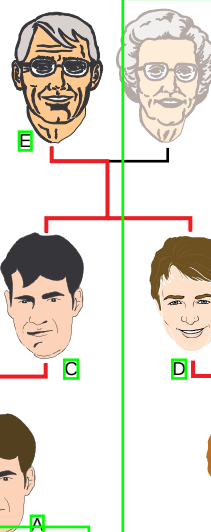
L'analyse de l'évolution temporelle de l'isonymie matrimoniale dans 18 communes du Haut-Jura met en évidence des aspects inattendus de la dynamique de la population. La fréquence des unions isonymes varie fortement dans le temps : dans les communes étudiées, elle est particulièrement élevée au début du XIX^e siècle. S'agit-il là d'une spécificité locale ou d'un phénomène plus général ? La réponse n'est pas claire. En général, il semblerait en effet que les unions entre apparentés constituent une mesure de protection de populations humaines en situation de crises (guerres, situation de grande instabilité, etc.).

Historiquement, le modèle de l'isonymie est la plus ancienne tentative d'exploitation de l'information patronymique. S'il a été souvent décrié en raison de la grande méconnaissance de la dynamique des patronymes, aujourd'hui, les différentes observations sur la dispersion géographique des noms de familles rendent vraisemblable l'hypothèse d'une origine généalogique commune à tous

Le modèle de l'isonymie

En 1965, J. Crow et A. Mange montrent que, dans un système de transmission patrilinéaire du patronyme, la probabilité (p) pour que deux individus apparentés portent le même patronyme est quatre fois supérieure à leur coefficient de parenté généalogique (f), c'est-à-dire à la probabilité pour que les deux individus possèdent, dans la même partie de leur génome, deux allèles qui proviennent du même allèle ancêtre (un allèle est une variété de gène).

Prenons l'exemple de deux cousins germains A et B (voir la figure). Chaque enfant a une chance sur deux de recevoir un allèle donné de son père. Ainsi, la probabilité que les cousins possèdent un allèle commun qui provient de leur grand-père (E) est le produit de la probabilité de transmission de E à C par celle de C à A par celle de E à D par celle de D à B. Le coefficient de parenté entre ces cousins est alors de $1/2^4$, soit $1/16$. De son côté, la probabilité pour que les deux cousins portent le même patronyme hérité de leur grand-père commun est seulement de $1/4$, car l'événement est réalisé lorsque les deux ancêtres intermédiaires (C et D) sont de sexe masculin.



Cette relation $f = p/4$ est généralisable à tous les degrés d'apparentement simple. Ainsi, la proportion des unions isonymes (c'est-à-dire pour lesquelles les deux conjoints portent le même patronyme) ou, plus généralement, la probabilité pour que deux individus pris au hasard portent le même patronyme, est une estimation du coefficient moyen de parenté généalogique. Pour établir cette relation, trois hypothèses simplificatrices sont toutefois nécessaires.

Premièrement, on suppose que les patronymes sont monophylétiques, c'est-à-dire que tous les porteurs d'un même patronyme sont apparentés et ont hérité leur patronyme d'un ancêtre commun unique. Deuxièmement, on suppose que les hommes et les femmes participent de manière identique aux migrations (en général, les sociétés rurales sont virilocales : le couple s'installe dans la commune d'origine du mari). Troisièmement, on suppose que la transmission du patronyme coïncide avec la transmission biologique, ce qui, dans ce modèle, interdit la prise en compte de l'existence d'enfants adoptés ou illégitimes.

les porteurs d'un même patronyme. Finalement, contrairement aux idées reçues, toutes ces observations montrent la forte localisation géographique des patronymes et les grands contrastes patronymiques qui existent entre les communes.

Au-delà de la petite histoire et des anecdotes sur tel ou tel nom de famille, les questions soulevées lors de l'analyse des patronymes deviennent vite complexes, renvoyant à des interrogations beaucoup plus vastes sur les

structures démographiques, sociales, spatiales et génétiques des populations humaines et sur leur évolution dans le temps.

Ces études patronymiques existent dans beaucoup de pays où la transmission patrilinéaire est la règle. Dans quelques siècles, si la transmission patrilinéaire perdure, les comparaisons des patronymes européens permettront peut-être de quantifier les migrations européennes qui se dessinent à l'aube de l'Europe.

Jean-Marie LEGAY et Michel VERNAY travaillent au Département de génétique et biologie des populations de l'Université Lyon 1 et au Centre d'études démographiques de l'Université Lyon 2.

Jacques CELLARD, *Trésors des noms de familles*, Belin, 1983.

Anne LEFEBVRE-TEILLARD, *Le nom, droit et histoire*, PUF, Paris, 1990.

C.G.N. MASCIE-TAYLOR et G. LASKER, *Further Note on Possible Changes in the Geographic Distribution of ABO and RH Blood Groups in Great Britain*, in *Human Biology*, vol. 68, pp. 473-478, 1996.

Michel VERNAY, Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard (Lyon 1), 1997.

Paul FABRE, *Les noms de personnes en France*, PUF, 1998.

L'asymétrie de la matière

Dans quelques semaines, de nouveaux accélérateurs de particules rechercheront les violations d'une symétrie fondamentale de la nature et repousseront ainsi les limites de la physique.

HELEN QUINN • MICHAEL WITHERELL

En 1932, Carl Anderson détecte pour la première fois une antiparticule dans les rayons cosmiques. L'existence de ce type d'objet avait été prédite quatre ans plus tôt par Paul Dirac, mais l'antimatière est rare dans l'Univers. Aujourd'hui encore, malgré les perfectionnements des techniques de détection, les astronomes n'observent que des objets faits de matière. Pourquoi cette asymétrie de l'Univers, alors que les quantités de matière et d'antimatière étaient égales aux premiers instants de l'Univers?

Ce déséquilibre est-il fortuit? Ou est-il la conséquence inévitable d'une asymétrie des lois de la nature? Les physiciens théoriciens pensent aujourd'hui qu'il résulte des comportements différents de la matière et de l'antimatière; une symétrie nommée inversion de charge-parité, ou symétrie CP, n'aurait pas cours dans notre Univers.

Dans les années 1960, les théoriciens et les expérimentateurs ont découvert un moyen naturel de décrire cette brisure de la symétrie CP dans le cadre de la théorie des particules aujourd'hui dominante, le «Modèle standard». Cependant, la violation ainsi prédite ne suffit pas à expliquer l'excès de matière dans l'Univers: le Modèle standard est insuffisant, parce que des phénomènes restent inconnus.

En Californie et au Japon, deux nouveaux accélérateurs de particules étudieront bientôt les violations de la symétrie CP, afin de révéler si le Modèle standard doit être amélioré ou remplacé. Ils produiront des quantités considérables de particules nommées mésons, qui sont constitués d'un quark et d'un antiquark, c'est-à-dire d'une quantité égale de matière et d'antimatière.

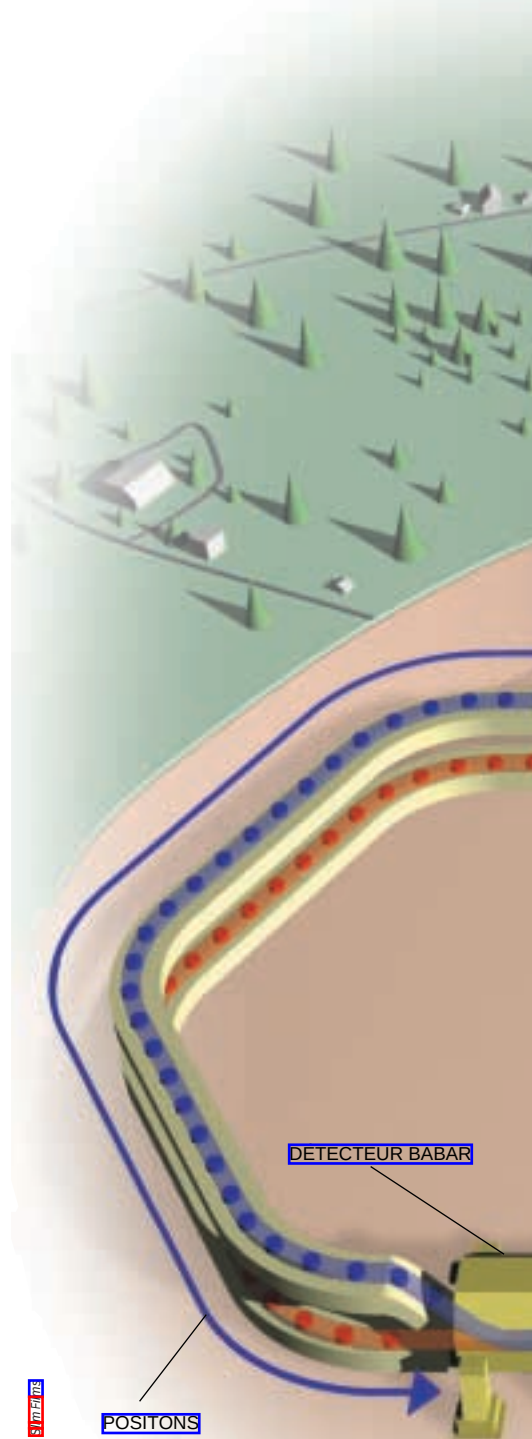
Le Modèle standard décrit les centaines de particules connues ainsi que leurs interactions, à partir des familles

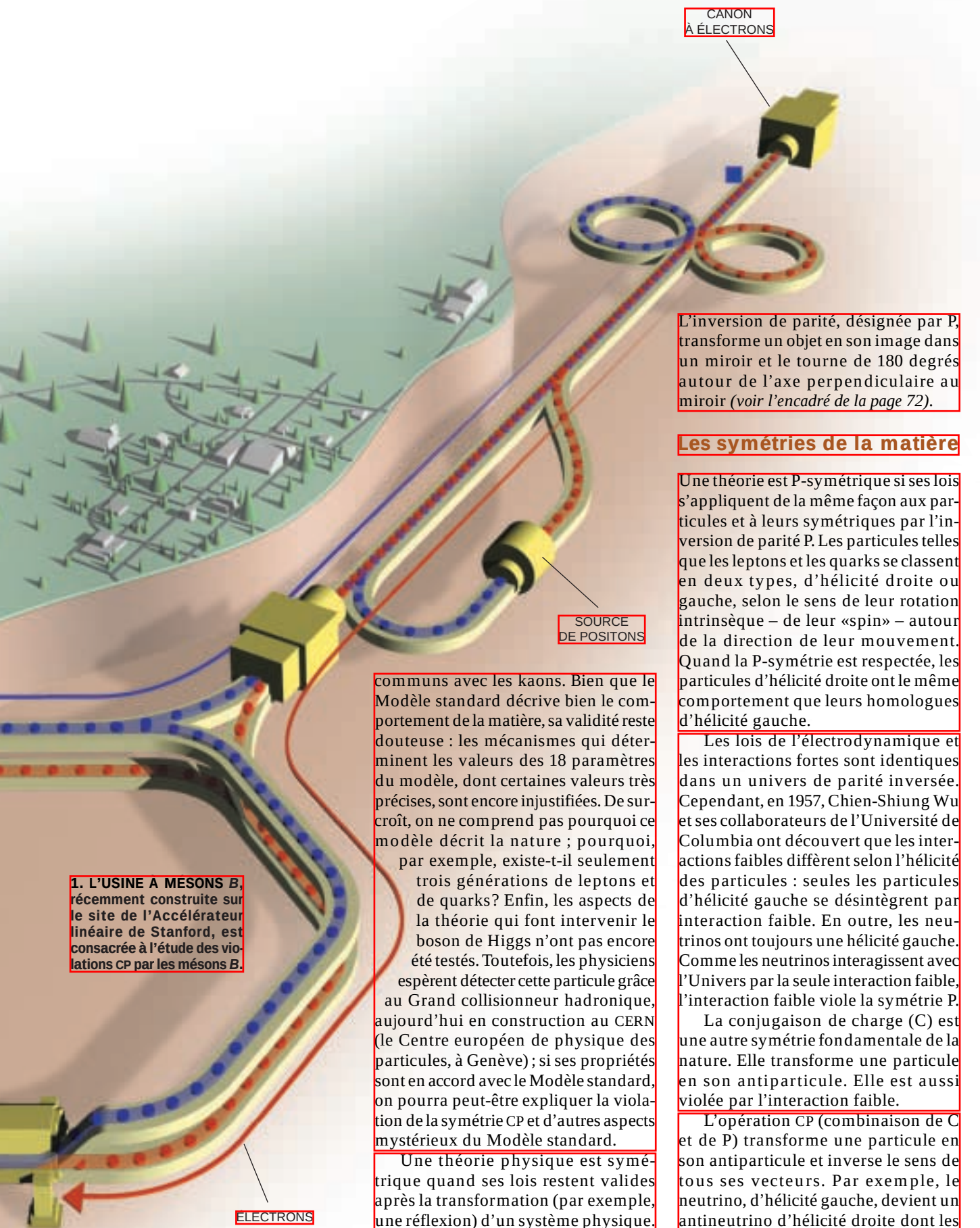
fondamentales des quarks et des leptons. Les six quarks – nommés *top*, *bottom*, *charm*, *strange*, *up* ou *down* – sont 100 fois plus massifs que les leptons, tels l'électron, le neutrino et leurs cousins. En outre, à chaque quark ou lepton est associée une antiparticule de masse identique, mais dont les caractéristiques, nommées nombres quantiques, telle la charge électrique, sont de signe opposé. Ces particules se classent en trois «générations» de masses croissantes (voir les encadrés des pages 68 et 72), dont la première compose les constituants élémentaires de la matière habituelle.

Le Modèle standard décrit trois types d'interactions, ou forces, entre les particules: les interactions électromagnétiques, les interactions fortes et les interactions faibles (la gravitation n'est pas incluse dans le Modèle standard). L'interaction forte regroupe les quarks en objets composés, tel le proton. Aucun quark isolé n'a jamais été observé. L'interaction faible provoque une instabilité: elle est notamment responsable de la lente désintégration des quarks et des leptons les plus massifs en objets de masse inférieure.

En outre, le Modèle standard prédit que toutes ces interactions correspondent à l'échange de particules nommées vecteurs: le photon, le gluon et les bosons W^+ , W^- et Z^0 . Enfin, cette théorie est fondée sur l'existence d'une particule, le «boson de Higgs», encore non observée, qui serait responsable de la masse des quarks et des leptons.

Les mésons sont des particules essentielles pour l'étude de la violation de la symétrie CP. En particulier, les mésons *K*, ou kaons, se composent d'un quark ou antiquark *strange* et d'un quark ou antiquark *up* ou *down*. Les mésons *B*, composés d'un quark ou antiquark *bottom*, apparié à des partenaires *up* ou *down*, ont de nombreux points





L'inversion de parité, désignée par P, transforme un objet en son image dans un miroir et le tourne de 180 degrés autour de l'axe perpendiculaire au miroir (voir l'encadré de la page 72).

Les symétries de la matière

Une théorie est P-symétrique si ses lois s'appliquent de la même façon aux particules et à leurs symétriques par l'inversion de parité P. Les particules telles que les leptons et les quarks se classent en deux types, d'hélicité droite ou gauche, selon le sens de leur rotation intrinsèque – de leur « spin » – autour de la direction de leur mouvement. Quand la P-symétrie est respectée, les particules d'hélicité droite ont le même comportement que leurs homologues d'hélicité gauche.

Les lois de l'électrodynamique et les interactions fortes sont identiques dans un univers de parité inversée. Cependant, en 1957, Chien-Shiung Wu et ses collaborateurs de l'Université de Columbia ont découvert que les interactions faibles diffèrent selon l'hélicité des particules : seules les particules d'hélicité gauche se désintègrent par interaction faible. En outre, les neutrinos ont toujours une hélicité gauche. Comme les neutrinos interagissent avec l'Univers par la seule interaction faible, l'interaction faible viole la symétrie P.

La conjugaison de charge (C) est une autre symétrie fondamentale de la nature. Elle transforme une particule en son antiparticule. Elle est aussi violée par l'interaction faible.

L'opération CP (combinaison de C et de P) transforme une particule en son antiparticule et inverse le sens de tous ses vecteurs. Par exemple, le neutrino, d'hélicité gauche, devient un antineutrino d'hélicité droite dont les

communs avec les kaons. Bien que le Modèle standard décrive bien le comportement de la matière, sa validité reste douteuse : les mécanismes qui déterminent les valeurs des 18 paramètres du modèle, dont certaines valeurs très précises, sont encore injustifiées. De surcroît, on ne comprend pas pourquoi ce modèle décrit la nature ; pourquoi, par exemple, existe-t-il seulement trois générations de leptons et de quarks ? Enfin, les aspects de la théorie qui font intervenir le boson de Higgs n'ont pas encore été testés. Toutefois, les physiciens espèrent détecter cette particule grâce au Grand collisionneur hadronique, aujourd'hui en construction au CERN (le Centre européen de physique des particules, à Genève) ; si ses propriétés sont en accord avec le Modèle standard, on pourra peut-être expliquer la violation de la symétrie CP et d'autres aspects mystérieux du Modèle standard.

Une théorie physique est symétrique quand ses lois restent valides après la transformation (par exemple, une réflexion) d'un système physique.

1. L'USINE À MESONS B, récemment construite sur le site de l'Accélérateur linéaire de Stanford, est consacrée à l'étude des violations CP par les mésons B.

interactions avec les autres particules sont identiques à celles des neutrinos d'hélicité gauche. Ainsi, bien que les symétries de charge (C) et de parité (P) soient brisées par les neutrinos, leur combinaison CP est respectée par ces particules.

Cependant, en 1917, la mathématicienne allemande Emmy Noether a démontré un théorème qui stipule qu'à toute symétrie est associée une grandeur physique conservée. Par exemple, comme l'espace-temps est semblable dans toutes les directions – il a une symétrie de rotation –, le moment cinétique de rotation est conservé. Le théorème de Noether indique que, si la symétrie CP était valide, une quantité nommée nombre CP serait conservée.

La violation CP

Une particule et son antiparticule se déplaçant dans des directions opposées, avec des énergies égales, forment une paire de particules CP-symétriques : le système composé de deux particules est inchangé par l'opération CP ; cependant, sa représentation mathématique se trouve modifiée par un facteur : le nombre CP. Lorsque les symétries P ou C sont appliquées deux fois de suite

à un même système, ce dernier retrouve son état initial. Cette propriété s'exprime en mathématiques par les égalités $C^2 = P^2 = 1$ (1 représente ici l'opération identité qui, par définition, ne provoque aucun changement). De ce fait, (CP)(CP) est égal à 1, de sorte que le nombre CP ne prend que les valeurs -1 ou +1. Selon le théorème de Noether, avec une symétrie CP parfaite, aucun état physique de nombre CP égal à -1 ne se transformerait en un état de nombre CP égal à +1.

Considérons alors le kaon K^0 , qui se compose d'un quark *down* et d'un antiquark *strange* ; son antiparticule, l'antikaon $\bar{K}^0$, se compose d'un antiquark *down* et d'un quark *strange*. La symétrie CP, qui transforme un quark en antiquark et un antiquark en quark, devrait transformer chaque kaon en son antiparticule. Les théoriciens en déduisent qu'aucun de ces kaons n'a de nombre CP déterminé. Toutefois, ils savent construire une paire de kaons aux nombres CP bien définis en superposant la fonction d'onde du kaon à celle de l'antikaon. Les règles de la théorie quantique indiquent qu'une telle superposition correspond à une particule réelle, qui possède une masse et une durée de vie bien définies.

La conservation du nombre CP expliquerait une caractéristique curieuse. Bien que similaires, les deux kaons obtenus par superposition ont des durées de vie qui diffèrent d'un facteur environ égal à 500 (voir la figure 3). Le kaon de nombre CP égal à +1 se désintègre en deux pions, état physique qui possède le même nombre CP. Cette désintégration survient rapidement, car ce kaon est assez massif. En revanche, le kaon de nombre CP égal à -1 se désintègre en trois pions, un état dont le nombre CP est égal à -1. Cette dernière désintégration est plus lente, car ce kaon est de masse à peine supérieure à celle des trois pions. Ainsi, la découverte de ce kaon, dont la conservation du nombre CP explique la longue durée de vie, a constitué un solide témoignage indiquant que le kaon issu de la superposition respectait la symétrie CP.

Cependant, en 1964, à Brookhaven, James Christenson, James Cronin, Val Fitch et René Turlay ont montré que, sur 500 kaons à grande durée de vie (avec un nombre CP égal à -1), l'un d'eux en moyenne se désintègre en deux pions (de la même manière que le kaon de nombre CP égal à +1). Or, une symétrie CP exacte et parfaite interdit une telle

Les particules du Modèle standard

VECTEURS DE FORCE

BOSONS FAIBLES	PHOTON	GLUON	HIGGS
			

Les constituants fondamentaux de la matière, les quarks et les leptons, se répartissent en trois «générations». La première comprend les quarks et les antiquarks *up* et *down*, l'électron, un neutrino, ainsi que leurs antiparticules. La matière ordinaire est presque exclusivement composée de particules de la première génération. Par exemple, les protons et les neutrons des noyaux atomiques sont composés de quarks *up* et *down*. Les deux autres générations, présentes en abondance au commencement de l'Univers, subsistent aujourd'hui dans des environnements particulièrement chauds, telles les étoiles à neutrons ; on les détecte dans les accélérateurs de particules.

En outre, le Modèle standard prévoit l'existence de plusieurs particules nommées bosons, qui sont échangées lorsque des particules de matière interagissent. Selon le Modèle standard, le boson de Higgs est responsable de l'existence de la masse

CONSTITUANTS DE LA MATIERE

	PARTICULE	SYMBOLE	CHARGE	MASSE (GeV/c ²)
PREMIERE GENERATION				
QUARKS	UP		$+\frac{2}{3}$	0,03
	DOWN		$-\frac{1}{3}$	0,06
LEPTONS	ELECTRON		-1	0,0005
	NEUTRINO ELECTRONIQUE		0	0?
DEUXIEME GENERATION				
QUARKS	CHARM		$+\frac{2}{3}$	1,3
	STRANGE		$-\frac{1}{3}$	0,14
LEPTONS	MUON		-1	0,106
	NEUTRINO MUONIQUE		0	0?
TROISIEME GENERATION				
QUARKS	TOP		$+\frac{2}{3}$	174
	BOTTOM		$-\frac{1}{3}$	4,3
LEPTONS	TAU		-1	1,7
	NEUTRINO TAUIQUE		0	0?

de toutes les particules et des violations de la symétrie CP ; cependant, ce boson de Higgs n'a encore jamais été observé.

désintégration. Pourquoi cette symétrie est-elle brisée? Pourquoi l'est-elle si peu?

En 1972, Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa, de l'Université de Nagoya, ont montré que le Modèle standard pouvait admettre la violation de la symétrie CP si le nombre de générations de quarks était supérieur à deux. À l'époque, seules deux générations de quarks étaient connues (les quarks *up* et *down*, et les quarks *strange* et *charm*). Trois ans plus tard, Martin Perl et ses collègues de l'Accélérateur linéaire de Stanford ont détecté la première particule de la troisième génération : le lepton τ (tau) ; les quarks *bottom* et *top*, qui complètent la troisième génération de particules, ont été découverts respectivement en 1977 et en 1995.

L'asymétrisation de l'Univers

L'Univers est-il né asymétrique, c'est-à-dire avec des nombres de particules et d'antiparticules inégaux? Ce déséquilibre initial aurait été rapidement éliminé si, dans l'Univers primordial, le nombre baryonique (le nombre de particules de matière moins le nombre de particules d'antimatière) pouvait être modifié (les extensions du Modèle standard nommées théories de Grande Unification envisagent des phénomènes qui changent le nombre baryonique). Cependant, les physiciens supposent plutôt que les particules et les antiparticules étaient initialement en quantités égales, et que les particules devinrent prépondérantes quand l'Univers se refroidit en se dilatant.

Selon le physicien soviétique Andréï Sakharov, ce scénario est possible à trois conditions : que le nombre baryonique n'ait pas été conservé ; que l'Univers n'ait pas atteint l'équilibre thermique durant sa phase d'expansion ; que la symétrie CP ait été brisée. En l'absence de l'une de ces conditions, toute variation de la quantité de matière aurait été compensée par une variation correspondante d'antimatière.

Selon la théorie aujourd'hui dominante, le champ quantique associé à la particule de Higgs (responsable de la masse) était partout égal à zéro lors du Big Bang. Puis, apparu une bulle où le champ de Higgs prit sa valeur actuelle non nulle. Les particules et les antiparticules qui n'avaient pas de masse à l'extérieur de la bulle en acquéraient une lorsqu'elles passaient à l'intérieur. Les particules et les

antiparticules pénétraient à l'intérieur de la bulle en expansion, mais à des vitesses inégales à cause de la violation de la symétrie CP. À l'extérieur de la bulle, tout déséquilibre entre matière et antimatière se trouvait rapidement corrigé par les événements modifiant le nombre baryonique.

En revanche, ces événements ont été très rares à l'intérieur de la bulle : le déséquilibre a subsisté. Lorsque la bulle a été suffisamment dilatée pour englober l'Univers entier, elle contenait plus de particules que d'antiparticules. Enfin, l'Univers s'est refroidi au point que particules et antiparticules non seulement n'étaient plus formées lors de collisions, mais, en outre, s'annihilaient lorsqu'elles se rencontraient. Malheureusement, les physiciens calculent que l'ampleur du déséquilibre matière-antimatière créé par ce mécanisme est beaucoup trop faible pour rendre compte l'état actuel de l'Univers. Il existe vraisemblablement d'autres modes de violation de la symétrie CP, et le Modèle standard semble être incomplet.

Où chercher d'autres violations de la symétrie CP? Selon le Modèle

standard, les désintégrations du méson B^0 et de l'antiméson B^0 sont très asymétriques. Un méson B^0 contient un quark *down* lié à un antiquark *bottom*, tandis que l'antiméson B^0 est constitué d'un antiquark *down* et d'un quark *bottom*. Le comportement des mésons B^0 ressemble à celui des kaons.

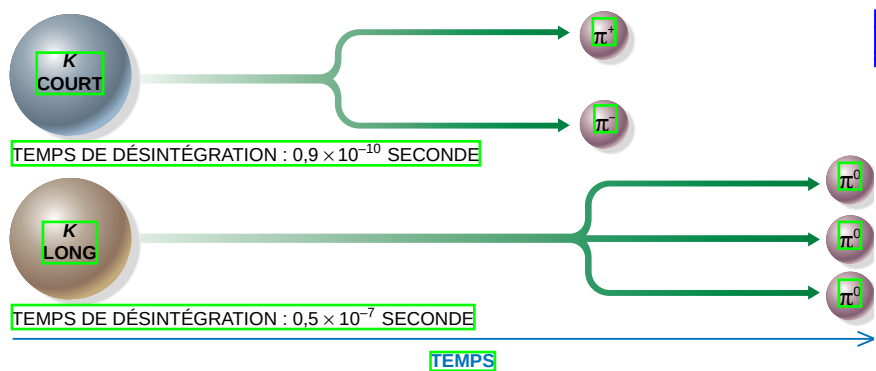
Quand un méson B^0 est produit à un instant précis, un observateur verra, avec une certaine probabilité, cette même particule et avec une probabilité différente, son antiparticule, l'antiméson B^0 .

Les usines à mésons

L'exploration de la violation CP nécessite l'étude de désintégrations du méson B^0 , dont les produits correspondent à des états possédant un nombre CP bien défini. Les vitesses de désintégration devraient différer selon que la particule est initialement un méson B^0 ou un antiméson B^0 . Cette différence indiquera l'ampleur de la violation CP dans le système. En outre, selon le Modèle standard, l'asymétrie des désintégrations du méson B^0 devrait être bien plus marquée que celle

PARTICULE			ANTIPARTICULE		
NOM	SYMBOLE	COMPOSANTS	NOM	SYMBOLE	COMPOSANTS
PROTON	p	$u u d$	ANTIPROTON	$\bar{p}$	$\bar{u} \bar{u} \bar{d}$
NEUTRON	n	$u d d$	ANTINEUTRON	$\bar{n}$	$\bar{u} \bar{d} \bar{d}$
PI-PLUS	π^+	$u \bar{d}$	PI-MOINS	π^-	$\bar{u} d$
PI-ZERO	π^0	$u \bar{u} \text{ ou } d \bar{d}$	ANTI-PI-ZERO	$\bar{\pi}^0$	$u \bar{u} \text{ ou } d \bar{d}$
K-ZERO	K^0	$d \bar{s}$	ANTI-K-ZERO	$\bar{K}^0$	$\bar{d} s$
B-ZERO	B^0	$d \bar{b}$	ANTI-B-ZERO	$\bar{B}^0$	$\bar{d} b$

2. LES PARTICULES COMPOSÉES sont, soit des baryons (tels le proton et le neutron), formés de trois quarks, soit des mésons, composés d'un quark et d'un antiquark. Le méson le plus répandu est un pion ($\pi^\pm$). Les mésons *B* et *K* sont importants pour l'étude de la violation CP, mais plus rares. Ils contiennent un quark (ou un antiquark) *down* et un antiquark (ou un quark) *strange* (méson *K*) ou *bottom* (méson *B*).



3. LES KAONS NEUTRES (ou mésons *K*) possèdent deux durées de vie très différentes l'une de l'autre. Ces différences découlent de ce que ces kaons ont des nombres CP différents. Les kaons qui se désintègrent rapidement se transforment en deux pions ; ceux qui se désintègrent lentement engendrent trois pions. Cependant, le second type de kaons se désintègre parfois en deux pions ; la symétrie CP est alors violée.

Une flèche du temps microscopique?

La symétrie C transforme la matière en antimatière, tandis que la symétrie P transforme un objet en son image dans un miroir, lui la tourne de 180 degrés. Les différents états produits par ces deux symétries sont-ils égaux face à l'écoulement du temps? En physique subatomique, l'opérateur T inverse le signe du temps dans les équations d'évolution d'un système physique. En 1954, Wolfgang Pauli et Gerhard Lüders ont démontré que le produit des trois opérateurs C, P et T est symétrique : les lois de la nature sont les mêmes dans notre Univers et dans un univers fait d'antimatière observé dans un miroir où le temps s'écoulerait à l'envers.

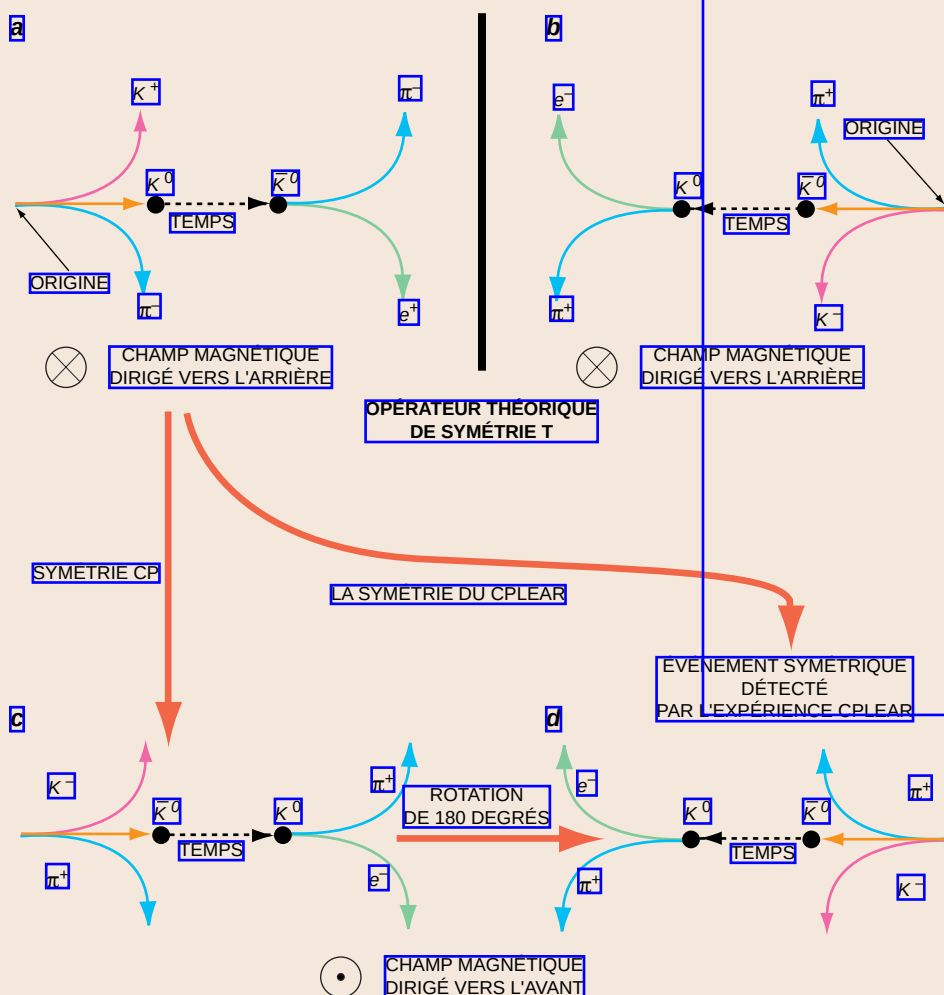
En 1964, la découverte de la violation de la symétrie CP imposait la violation de la symétrie T pour que le produit $CP \times T$ soit conservé. Cependant, pendant plus de 30 ans, toutes les réactions concernant les particules élémentaires se comportaient de la même façon, quel que soit le sens du temps. La symétrie T restait intacte. En

1985, une équipe internationale de plus de 100 physiciens, parmi lesquels des physiciens français du CEA et du CNRS, a présenté un protocole expérimental d'observation d'une telle réaction, l'expérience CPLEAR effectuée au CERN, près de Genève. Le théoricien Prahaban Kemal Kabir avait proposé 14 ans plus tôt une expérience de pensée dont se sont inspirés les physiciens du CERN, mais à l'époque, les moyens techniques étaient insuffisants. On compare la probabilité de transformation d'un kaon en un antikaon, et la probabilité de la réaction inverse : la transformation d'un antikaon en un kaon. Ces deux phénomènes, qui sont l'image l'un de l'autre par l'opérateur T, sont mesurables en laboratoire. Les résultats préliminaires, présentés en 1995, indiquaient l'existence d'une asymétrie temporelle dans le monde des particules élémentaires. La publication récente des résultats définitifs confirme et démontre la violation de la symétrie T.

Dans l'expérience CPLEAR du CERN, les antiprotons fournis par l'anneau de stockage de basse énergie (LEAR) heurtent des atomes d'hydrogène. Ces chocs produisent trois particules : un kaon chargé (positivement ou négativement), un kaon ou un antikaon neutre, et un pion chargé (positivement ou négativement). On détermine la nature de la particule neutre, au moment de sa production en mesurant les charges des kaons chargés. Dans un second temps, on identifie l'état au moment de la désintégration et on sélectionne les événements pour lesquels la particule neutre a changé de nature entre sa production et sa désintégration (voir la figure).

Ces résultats, confirmés par une équipe du Laboratoire Fermi de Chicago, démontrent pour la première fois l'existence d'une flèche du temps pour les particules élémentaires. Cependant, l'origine d'un tel phénomène reste mystérieuse, ainsi que sa relation avec la flèche du temps du monde quotidien, macroscopique.

Marc DEJARDIN,
CEA-Saclay



Le choc d'un atome d'hydrogène et d'un antiproton produit un kaon chargé (K^+ ou K^-), un kaon ou un antikaon neutre (K^0 ou $\bar{K}^0$) et un pion chargé (π^+ ou π^-). En (a), un kaon se transforme en un antikaon ($\bar{K}^0$), qui se désintègre en un pion (π^-) et en un positon (e^+). L'opérateur T inverse la flèche du temps de cette réaction (b). La transformation (c) d'un antikaon en un kaon qui se désintègre en un électron (e^-) et en un pion chargé positivement (π^+) est bien, après rotation de 180 degrés, la réaction inverse. En comparant les deux réactions (a et d), les physiciens du CERN ont observé la violation de la symétrie T.



4. LE DÉTECTEUR BABAR de l'Université de Stanford, construit dans le cadre d'une collaboration internationale, enregistrera les désintégrations des mésons B et permettra ainsi d'éclaircir nos connaissances sur la violation CP.

observée pour les désintégrations du kaon K^0 . La mesure de l'ampleur de l'asymétrie de ces désintégrations confirmera le Modèle standard ou bien d'autres modèles existants.

Lorsque le quark *bottom* fut découvert, on lui trouva une masse d'environ cinq milliards d'électronvolts / c^2 (GeV / c^2 : cette unité est issue de la relation $E = mc^2$, où E mesure l'énergie en électronvolts, m la masse et où c est la vitesse de la lumière), soit près de cinq fois celle du proton. Les physiciens ont alors calculé que la production de deux mésons B requerrait une énergie à peine supérieure à 10 GeV, car le quark *down* et l'antiquark *down* sont très légers. Dans les années 1980, le collisionneur de l'Université Cornell a confirmé ce calcul en libérant une énergie de 10,58 GeV, qui engendra surtout des mésons B .

En 1983, les expérimentateurs de l'Accélérateur de Stanford ont découvert que le méson B avait une durée de vie bien plus grande que prévu. Cette «longue» durée de vie (1,5 millième de

milliardième de seconde) augmente les chances d'observer l'ampleur de la violation CP, car la probabilité qu'un méson B^0 ne se transforme avant sa désintégration en un antiméson B^0 est supérieure. Puis, en 1987, des expérimentateurs de l'accélérateur DESY, à Hambourg, ont calculé que cette probabilité était égale à 16 pour cent. On en déduit que ces asymétries sont sans doute supérieures à celles qui sont observées pour le kaons K^0 . Toutefois, la rareté des désintégrations de mésons B^0 impose, pour une étude fiable de la violation CP, la présence d'un grand nombre de mésons B .

En 1988, pour étudier la violation CP par les mésons B , un groupe proposa l'utilisation d'un collisionneur électrons-positons où les faisceaux d'électrons et de positons auraient des énergies différentes. Cette particularité augmenterait la durée de vie d'un méson B et, donc, sa mesure.

Par exemple, un accélérateur comprenant deux anneaux distincts, chacun produisant d'intenses faisceaux

Ce magazine vous intéresse !



Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actualités
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'environnement
- ☐ Le texte intégral des conférences du

samedi

- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires

- ☐ Le programme des activités du Palais de la découverte

Je souscris un abonnement à la

REVUE DU PALAIS DE LA
DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque à l'ordre du

PALAI DE LA DÉCOUVERTE
(CCP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)

Tarif étranger : 200 F

par mandat international uniquement
(par avion, supplément de 80 FF)

Abonnement de soutien : 230 F

Nom (M., Mme, Mlle) :

Prénom :

Adresse :

.....

Ville :

Code postal :

Profession :

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAI DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 00

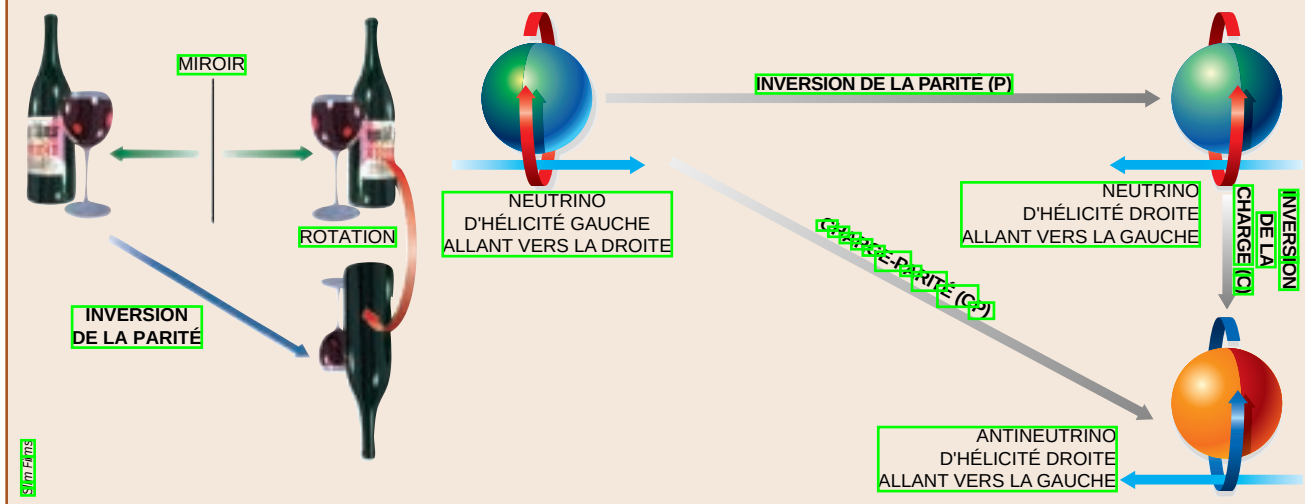
La conjugaison de charge et l'inversion de parité

L'étude des symétries est importante en physique. La conjugaison de charge (C) est l'opération qui inverse les signes des nombres quantiques, telle la charge électrique, et transforme ainsi une particule en son antiparticule. L'inversion de parité (P) correspond à une réflexion dans un miroir, puis à une rotation de 180 degrés autour d'un axe perpendiculaire au miroir. Cette opération inverse le sens de tous les vecteurs associés à un objet.

Les lois de la mécanique classique et de l'électromagnétisme

restent inchangées après chacune de ces deux opérations. Selon le Modèle standard de la physique quantique, l'interaction forte est également invariante. En revanche, l'interaction faible est modifiée par la conjugaison de charge ou par l'inversion de parité.

En 1964, des expériences ont montré que, contrairement à ce qui était admis, la combinaison des inversions de charge et de parité (symétrie CP) était violée. Les physiciens ont alors cherché pourquoi la nature est différente après une telle combinaison de symétries.



d'électrons ou de positrons à des énergies différentes, produirait un nombre élevé de collisions. Une telle machine, où le nombre de collisions serait élevé, a depuis reçu le nom d'usine asymétrique à mésons B.

En 1993, le ministère américain de l'Énergie et l'agence japonaise *Monbusho* ont approuvé deux projets de machines qui fabriqueraient environ 30 millions de paires de mésons B par an. Le projet américain, à Stanford, utilise le tunnel rectiligne qui existe déjà pour accélérer les électrons et les positons. Ces deux types de particules circuleront ensuite dans deux nouveaux anneaux, puis se heurteront en un point de croisement. La construction de cet accélérateur coûtera environ un milliard de francs. Le projet japonais, à Tsukuba, repose aussi sur l'emploi de tunnels existants : ceux qui abritaient autrefois le collisionneur *Tristan*.

Physiciens et ingénieurs mettent au point les détecteurs qui identifieront les rares désintégrations des mésons B liés à la symétrie CP. Ils utiliseront un détecteur au silicium du même type que ceux qui ont été utilisés pour la découverte du quark *top* (voir *La découverte du quark top*, par Tony Liss et Paul Tipton, *Pour la Science*, octobre 1997), qui permettra de mesurer la position

des particules avec une précision de 80 micromètres.

Le détecteur le plus interne de l'expérience américaine, nommé BABAR, sera placé au point de croisement des faisceaux d'électrons et de positons. Sa paroi interne, composée de silicium, formera un cylindre d'environ 30 centimètres de diamètre et de 60 centimètres de long. Les couches externes mesureront l'énergie, la vitesse et le pouvoir de pénétration de chaque particule créée. On reconstituera les événements originels à partir de ces mesures. Plus de 500 participants (dont nous-mêmes), provenant de 70 institutions de neuf nationalités différentes, construisent aujourd'hui ce détecteur et se partagent son coût de construction : 450 millions de francs (le réseau *World Wide Web*, utilisé par *Internet*, fut inventé au CERN pour faciliter les collaborations internationales de ce type).

Helen QUINN travaille à l'Accélérateur linéaire de Stanford. Michael WITHELL est professeur à l'Université de Santa Barbara.

Richard FEYNMAN, *The Character*, MIT Press, 1965.
A. ZEE, *Fearful Symmetry : The Search*

L'expérience japonaise, nommée BELLE, est également une collaboration internationale. Ces deux usines à mésons B livreront probablement leurs premiers résultats dans les semaines à venir.

Les désintégrations de mésons B montreront sans doute d'autres types de violation CP, que le collisionneur et le détecteur de Cornell étudieront, une fois achevés les travaux en cours. Plusieurs expériences sur la physique des mésons B sont également menées dans divers accélérateurs de protons aux quatre coins du Globe ; ils fourniront des indices complémentaires sur la violation de la symétrie CP.

Ces usines à mésons B confirmeront-elles la validité du Modèle standard et aideront-elles à en déterminer les paramètres restants ? Ou bien réfuteront-elles ses prévisions ? Comprendrons-nous enfin pourquoi notre Univers est composé d'une majorité de matière ?

for Beauty in Modern Physics, Macmillan Publishing, 1986.

Robert G. SACHS, *The Physics of Time Reversal*, University of Chicago Press, 1987.

Martin GARDNER, *The New Ambidextrous Universe : Symmetry and Asymmetry from Mirror Reflections to Superstrings*, W.H. Freeman and Company, 1990.

Derrière la Voie lactée

RENÉE KRAAN-KORTEWEG • OFER LAHAV

Près d'un cinquième de l'Univers échappe à l'observation, dissimulé par les étoiles et par les poussières de la Voie lactée. Depuis quelques années, les astronomes voient à travers cette matière.

1. LE DISQUE DE LA VOIE LACTÉE, sorte de crêpe cosmique contenant des étoiles, des poussières et du gaz, a une masse 100 milliards de fois supérieure à celle du Soleil. Ce disque nous cache un cinquième de l'Univers. Parmi les objets dissimulés, la galaxie sphéroïdale naine du Sagittaire, représentée ici vue de dessous (*figure principale*) et vue du dessus (*cartouche supérieur*) du plan de la Voie lactée (le dessus et le dessous étant respectivement l'hémisphère Nord galactique et l'hémisphère Sud galactique). Du Système solaire, la direction de la galaxie naine est presque totalement bloquée par le bulbe d'étoiles qui entoure le centre de notre Galaxie. Bien que la galaxie naine du Sagittaire soit la galaxie la plus proche de nous, elle n'a été découverte qu'il y a quatre ans. Une autre galaxie cachée, Dwingeloo 1, est représentée dans le cartouche.

BULBE GALACTIQUE

GALAXIE NAIN DU SAGITTAIRE



La nuit, à la campagne, une large bande lumineuse traverse le ciel : elle provient des centaines de milliards d'étoiles de notre Galaxie, la Voie lactée, ainsi que des grains de poussières interstellaires qui diffusent leur lumière. Nous sommes à environ 28 000 années-lumière du centre de la Galaxie, au milieu d'un de ses bras spiraux. Bien que superbe, la Voie lactée gêne les astronomes qui étudient l'Univers extragalactique : elle bloque la lumière en provenance de 20 pour cent du cosmos, une portion du ciel pourtant particulièrement intéressante.

En effet, quelque part derrière le disque se trouvent des parties importantes des deux plus grandes structures de l'espace proche : le superamas de galaxies des constellations de Persée et des Poissons, et le «Grand Attracteur», une gigantesque concentration de matière dont l'existence a été déduite des mouvements de milliers de galaxies à travers l'espace. Les observations révèlent également un nombre alléchant de galaxies brillantes et proches, dans la direction du disque ; beaucoup d'autres passent vraisemblablement inaperçues. Sans la connaissance de cet angle mort, l'inventaire de notre région de l'Univers ne peut être exhaustif et plusieurs questions fondamentales de la cosmologie demeurent ouvertes : quelles sont les dimensions des structures cosmiques, comment se sont-elles formées et quelle est la densité totale de matière dans l'Univers ?

Depuis quelques années, les astronomes disposent de techniques pour percer ce voile de lumière et de poussières, et pour reconstituer l'Univers caché à partir de ses effets sur les



Dans les années 1920, les astronomes commencèrent à distinguer les galaxies extérieures à la Voie lactée des nébuleuses de notre Galaxie (les nébuleuses sont des rassemblements de quelques milliers d'étoiles situées dans la Galaxie). Les galaxies étaient visibles dans toutes les régions du ciel, excepté dans la direction de la Voie lactée, qui fut ainsi nommée la zone d'exclusion (*voir la figure 6*). Aujourd'hui, les astronomes savent que les galaxies extérieures se composent de

Les astronomes étudièrent d'abord peu la zone d'exclusion, se concentrant sur des régions non obscurcies du ciel. Puis, il y a 20 ans, une observation cruciale montra que l'astronomie ratait peut-être quelque chose. Des mesures du fond diffus cosmologique, un rayonnement issu d'un événement qui s'est déroulé peu après le Big Bang, révélaient une asymétrie dipolaire : ce rayonnement était environ 0,1 pour cent plus chaud que la moyenne dans une direction du ciel, et plus froid de la même proportion dans la direction opposée. Ces mesures, confirmées par le satellite *COBE* en 1989 et en 1990, indiquent que notre Galaxie et ses

Pourquoi le Groupe local se déplace-t-il vers la constellation de l'Hydre? Les galaxies s'assemblent en groupes, réunis en amas qui, eux-mêmes, s'agglomèrent en superamas séparés par des régions dépourvues de galaxies. Si la matière est répartie irrégulièrement autour du Groupe local, elle peut exercer une attraction gravitationnelle dans une direction.



spirale visible comme un fond peu brillant dans la constellation de Cassiopée (*page suivante*). En revanche, la galaxie sphéroïdale naine du Sagittaire ne peut être distinguée directement : ses étoiles sont

Des galaxies peuvent-elles s'attirer mutuellement sur les distances énormes qui les séparent? Très facilement, car les galaxies sont si massives qu'elles agissent à des distances considérables. En proportion, elles sont plus proches les unes des autres que ne le sont les étoiles de notre Galaxie.

Pour estimer théoriquement la vitesse du Groupe local due à l'attraction d'autres galaxies, les astronomes additionnent toutes les forces gravitationnelles des galaxies connues. La direction de la vitesse résultante est décalée de 20 degrés par rapport à la direction de l'asymétrie cosmologique observée, mais ces estimations demeurent imprécises, en partie parce qu'elles ne prennent pas en compte les galaxies situées derrière la zone d'exclusion.

Comment expliquer ce décalage entre la direction du dipôle cosmologique et celle de la vitesse estimée? En

postulant l'existence d'attracteurs. Un groupe d'astronomes a utilisé les mouvements de centaines de galaxies pour déduire l'existence du Grand Attracteur, situé à environ 200 millions d'années-lumière de notre Galaxie (voir *Un Grand Attracteur attire-t-il notre Galaxie?*, par Alan Dressler, *Pour la Science*, novembre 1987). Le Groupe local de galaxies semble être tirailé entre ce Grand Attracteur et le superamas de Persée-Poissons, à l'opposé du ciel et à une distance semblable. Pour déterminer lequel de ces mastodontes galactiques l'emportera, les astronomes doivent comptabiliser la masse de toutes les parties cachées de ces structures.

Ces deux structures appartiennent à une longue chaîne de galaxies, nommée «Plan supergalactique». Dans l'Univers, la fréquence de formation d'une structure aussi colossale dépend de la nature de la matière sombre qui

constitue l'essentiel de la masse de l'Univers. De telles chaînes de galaxies sont plus probables dans un Univers dominé par des particules de matière sombre chaude (comme des neutrinos massifs) que dans un Univers dont la matière sombre est froide (comme des axions ou d'autres particules hypothétiques). Toutefois, les astronomes ne peuvent distinguer entre ces deux hypothèses sans une cartographie complète de ces structures.

Les galaxies proches ne doivent pas être négligées dans le décompte : comme la gravité est plus intense à petite distance, une force notable est engendrée par les galaxies les plus proches, même si elles sont peu massives. Or, cinq des huit galaxies apparemment les plus brillantes se trouvent dans la zone d'exclusion : elles sont si proches et si lumineuses qu'elles brillent à travers notre Galaxie. Ces galaxies appartiennent aux groupes de galaxies Centaure A et IC342, proches voisins du Groupe local. En plus de ces groupes que les astronomes décèlent, probablement beaucoup d'autres, dont la lumière est entièrement bloquée, nous échappent.

Lever le voile

Notre position pourrait être pire : si nous habitons la galaxie d'Andromède à une position similaire à la nôtre (aux deux tiers du centre), la proportion obscurcie du ciel ne serait pas très différente, mais nous perdrons notre vision claire de l'amas de galaxies le plus proche, dans la constellation de la Vierge. Cependant, même les plus optimistes d'entre nous jugent que nous ne sommes pas si bien placés. Comme l'orbite du Soleil autour du centre galactique est inclinée par rapport au plan galactique, le Système solaire est tantôt au-dessus, tantôt au-dessous du plan galactique. Aujourd'hui, nous ne sommes qu'à 40 années-lumière au-dessus du plan. Si nous étions nés voici 15 millions d'années, nous nous trouverions à près de 300 années-lumière au-dessus du plan – au-delà de la couche d'extinction la plus épaisse – et nous distinguerions une bonne partie de la zone d'exclusion actuelle. Dans 35 millions d'années, le Système solaire aura traversé le disque galactique et se retrouvera de l'autre côté.

Comment connaître le ciel extragalactique situé derrière la zone



mélangées à celles de la Voie lactée et doivent être identifiées une à une (page précédente). Dans l'image reconstruite de cette galaxie naine, la Voie lactée traverse le centre de l'image horizontalement.

d'exclusion? On peut d'abord étudier soigneusement les images en lumière visible, parce que la poussière ne masque pas toutes les galaxies de la zone : certaines se dévoilent, mais elles paraissent d'autant plus faibles et plus petites qu'elles sont proches du plan galactique. L'apparence curieuse de

ces galaxies et la grande densité des étoiles à l'avant-plan déroutent les programmes automatiques de détection de galaxies. Pour détecter ces objets étranges et faibles, rien ne vaut l'œil. Le recensement photographique de l'Observatoire du mont Palomar et sa contrepartie pour l'hémisphère

austral, effectués dans les années 1950, sont réétudiés avec soin depuis dix ans. Les astronomes ont couvert une fraction importante de la zone d'exclusion, identifiant 50 000 nouvelles galaxies.

Dans les régions où l'extinction de la lumière par les poussières est trop importante, les galaxies sont complètement obscurcies, et des méthodes spéciales de détection s'imposent. L'une d'elles consiste à observer des longueurs d'onde supérieures, car plus la longueur d'onde est grande, moins le rayonnement interagit avec les particules microscopiques de poussières. Le rayonnement de longueur d'onde égale à 21 centimètres, émis par l'hydrogène neutre, est idéal à cet égard : il est abondant dans les galaxies spirales riches en gaz, dans les galaxies intrinsèquement peu lumineuses et dans les galaxies naines – c'est-à-dire la plupart des galaxies, hormis les galaxies elliptiques pauvres en gaz.

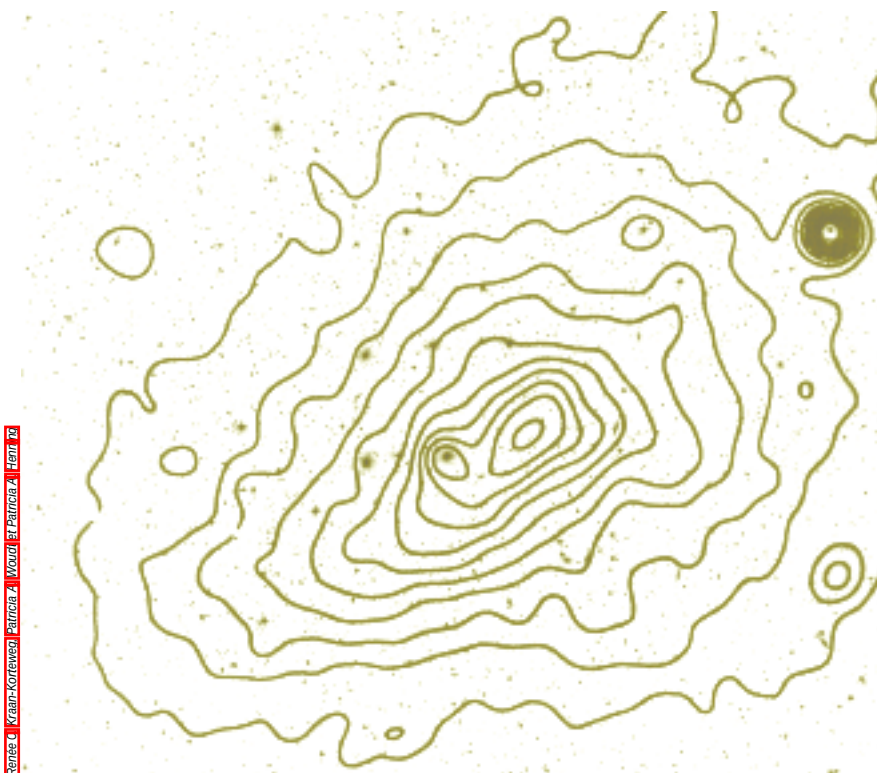
En 1987, Patricia Henning, de l'Université du Nouveau-Mexique, et Frank Kerr, de l'Université du Maryland, ont commencé l'étude de la zone d'exclusion à la longueur d'onde de 21 centimètres. À l'aide du radiotélescope de Green Bank, en Virginie occidentale, ils ont détecté 18 nouvelles galaxies. Malheureusement, le télescope s'effondra avant l'achèvement du projet (voir la figure 5). Une équipe internationale dont nous faisons partie commença alors une étude plus systématique, à l'aide du radiotélescope de 25 mètres de diamètre de Dwingeloo, aux Pays-Bas. Nous voulions cartographier toutes les galaxies spirales dans la portion septentrionale de la zone d'exclusion, jusqu'à une distance de 175 millions d'années-lumière. Nous avons déjà découvert plus de 40 galaxies.

Depuis 1997, une autre étude est dirigée par Lister Staveley-Smith et par l'un de nous (R. Kraan-Korteweg). C'est un recensement des galaxies situées derrière la Voie lactée australe, avec une sensibilité accrue. À l'aide d'un instrument spécial, adapté au radiotélescope de Parkes, en Australie, nous verrons des galaxies jusqu'à 500 millions d'années-lumière. Plus de 100 galaxies ont déjà été détectées, et plusieurs milliers d'autres sont attendues.

Les ondes radio ne sont pas les seules qui traversent la zone d'exclusion : les rayonnements infrarouges,



3. L'OPACITÉ DE LA VOIE LACTÉE dépend de la longueur d'onde. Les rayonnements de grande longueur d'onde, tels les rayonnements radio et infrarouge, sont assez peu atténués, mais les ondes plus courtes (l'infrarouge proche, le visible et l'ultraviolet) sont absorbées par les poussières et par les nuages de gaz au sein de notre Galaxie. Aux très courtes longueurs d'onde, pour les rayons X par exemple, le gaz redevient transparent.



4. LE NOYAU DU GRAND ATTRACTEUR est l'amas de galaxies Abell 3627. Il apparaît en lumière visible (arrière-plan) et en rayons X (contours noirs). Plus de 100 galaxies apparaissent sur ce négatif, dont la plupart des points sont des étoiles de notre Galaxie. Les contours concentriques serrés (en haut, à droite) indiquent une galaxie brillante de l'amas.

sont également moins absorbés par les poussières que la lumière visible. Au début des années 1980, le satellite *IRAS* dressa un catalogue des objets qui émettent des infrarouges lointains (ceux dont les longueurs d'onde sont proches de celles du rayonnement radio, comprises entre 10 et 100 micromètres). Dans ce catalogue, plusieurs objets pouvaient être des galaxies spirales et des galaxies à flambées d'étoiles (des galaxies où de grandes quantités d'étoiles se forment rapidement). Cependant, en se fondant uniquement sur l'intensité du rayonnement infrarouge, on ne distingue pas les galaxies d'objets galactiques qui émettent un rayonnement d'intensité analogue (*IRAS* ne faisait pas d'images). Pour les distinguer, on utilise des caméras sensibles à l'infrarouge proche (entre 0,8 et 50 micromètres), grâce aux images desquelles on vérifie si les candidats *IRAS* sont bien des galaxies.

Deux autres recensements systématiques dans l'infrarouge proche s'achèveront en l'an 2001 : un projet américain de recensement de tout le ciel, à une longueur d'onde de deux micromètres, et le projet européen DENIS qui dresse un catalogue du ciel austral. Dans ces deux projets, on prend des images numériques dans trois bandes spectrales qui sondent la population des étoiles les plus vieilles des galaxies. De ces recensements émergent les galaxies elliptiques que l'on trouve au centre des concentrations galactiques denses ; ils complètent donc les observations dans l'infrarouge lointain et celles à 21 centimètres, qui dévoilent principalement les galaxies spirales. Une étude préliminaire a confirmé que les recensements dans l'infrarouge proche révèlent des galaxies qui n'apparaissent pas sur les photographies en lumière visible. Malheureusement, ni le visible ni l'infrarouge ne peuvent identifier de galaxies dans les parties les plus épaisses du plan galactique.

On peut aussi éviter l'obscurcissement par la Voie lactée en observant les rayonnements de très courtes longueurs d'onde, tels les rayons X. Les amas de galaxies denses émettent quantité des rayons X qui traversent facilement la Voie lactée. Toutefois, aucune étude à ces longueurs d'onde, qui pourrait utiliser, par exemple, des données du satellite *ROSAT*, n'est en cours.

Simultanément, les astronomes recourent à des moyens indirects pour explorer la zone d'exclusion. Les techniques de traitement du signal, utilisées habituellement par les ingénieurs sur des données « bruitées » ou incomplètes, ont été employées avec succès par des chercheurs de l'Université hébraïque et par l'un de nous (O. Lahav) pour prédire l'existence

d'amas comme celui de la Poupe ou des Voiles, ainsi que la continuation du Plan supergalactique à travers la zone d'exclusion. En mesurant les vitesses de galaxies adjacentes à la zone d'exclusion, on peut prédire la répartition de masse dans cette dernière. Grâce à cette méthode, nous avons prédit que le centre du Grand Attracteur se trouve sur une ligne reliant les constellations



5. CE RADIOTÉLESCOPE de 91 mètres de diamètre (*en haut*) fonctionnait à Green Bank, en Virginie. Le 16 novembre 1988, il s'est effondré (*en bas*) : une plaque métallique du support principal avait cédé. L'antenne sera remplacée par un paraboloïde de 110 mètres sur 100. Contrairement aux antennes circulaires classiques, le nouveau télescope ne possèdera aucun étau de support lui bloquant la vue du ciel.

Richard Paves / JPL, Université du Nord, JPL, Astronomie Observation

du Centaure et du Paon. Cependant, ces méthodes de reconstruction ne révèlent que les structures à très grande échelle : elles ratent les galaxies individuelles et les amas plus petits.

La proie de la Voie lactée

Les méthodes précitées ouvrent lentement à l'étude astronomique le cinquième caché de l'Univers. Une découverte des plus surprenantes est intervenue en 1994, lorsque trois astronomes qui étudiaient des étoiles de la Voie lactée ont accidentellement découvert une galaxie naine sur le pas de notre porte. Cette «naine du Sagittaire» est la galaxie la plus proche connue : elle est située à seulement 80 000 années-lumière du Système solaire, soit moins de la moitié de la distance de la deuxième galaxie la plus proche, le Grand Nuage de Magellan. En fait, elle est presque dans notre Galaxie, de l'autre côté du centre galactique.

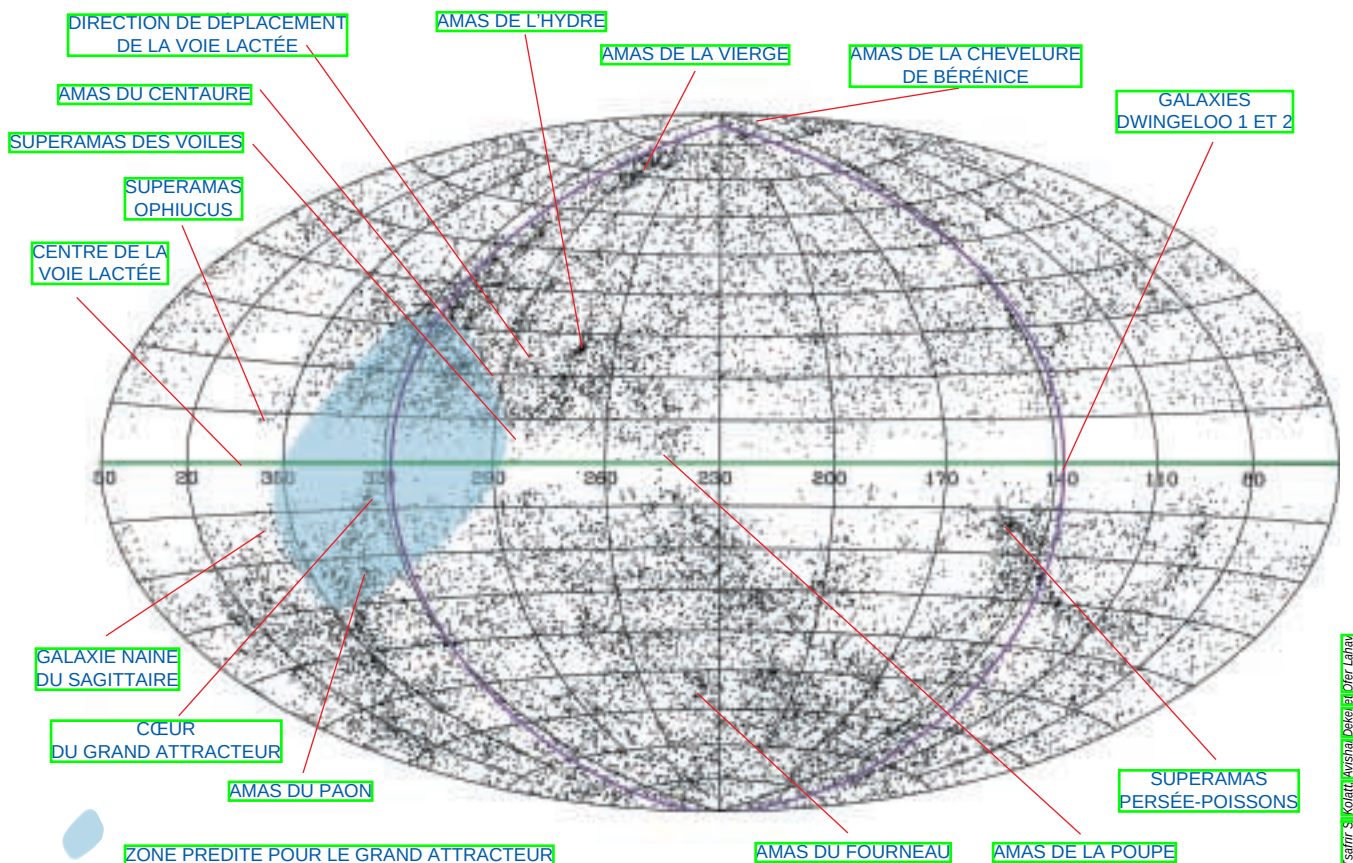
Comme la naine du Sagittaire se trouve directement derrière le bulbe central de la Voie lactée, on ne peut la voir sur des images directes. Les

astrophysiciens l'ont détectée en analysant les vitesses des étoiles : ils ont remarqué un groupe d'étoiles qui se mouvaient différemment des étoiles de notre Galaxie. En notant avec précision la position de ces étoiles et leur vitesse, en cherchant d'autres étoiles à la même distance et en compensant la lumière des étoiles connues situées à l'avant-plan, ils ont identifié la naine du Sagittaire (voir la figure 2). Elle s'étend sur au moins 20 degrés d'angle, de sorte qu'elle est la structure apparente la plus grande du ciel, après la Voie lactée elle-même. Son diamètre angulaire correspond à une taille d'au moins 28 000 années-lumière, environ un cinquième de la taille de notre Galaxie, même si elle est 1 000 fois moins massive que la Voie lactée.

Selon de nombreux modèles de formation des galaxies, les grandes galaxies se forment par agrégation de galaxies plus petites. Un tel mécanisme reste vraisemblablement à l'œuvre aujourd'hui, il a cependant rarement été observé. La galaxie naine du Sagittaire semble avoir été perturbée par les forces de marées engendrées par la Voie

lactée, mais son noyau paraît intact. Après une dizaine de rotations autour de notre Galaxie, cette galaxie a été peu modifiée, ce qui indique que sa cohésion est assurée par de grandes quantités de matière sombre (par opposition à la matière lumineuse, telle que les étoiles ou les nuages de gaz). Bien que stable, cette galaxie naine sera tout de même engloutie par notre Galaxie, d'ici un milliard d'années. Sa découverte montre que des fusions de galaxies se produisent encore aujourd'hui et qu'elles ne détruisent pas nécessairement le disque de la galaxie la plus grande.

La galaxie du Sagittaire n'est que l'une des nombreuses surprises procurées par l'étude de la zone d'exclusion. En août 1994, nous avons examiné les spectres produits par la raie à 21 centimètres de l'hydrogène. Nous avons choisi une région où de nombreuses structures filamenteuses constituées de galaxies disparaissent derrière la zone d'exclusion et où réside le groupe de galaxies IC342, proche de notre Galaxie. Nous avons assez vite trouvé un spectre curieux dans la direction de la constellation



6. TRENTE MILLE GALAXIES, prélevées dans trois catalogues astronomiques classiques, sont représentées par des points sur cette carte. Les galaxies apparaissent partout dans le ciel, sauf dans la zone d'ex-

clusion, qui correspond au plan de la Voie lactée (ligne verte, au centre). En dehors de cette zone, les galaxies semblent se rassembler près d'une ligne qui délimite le Plan supergalactique (ligne violette).

Abell 3627

Lorsque George Abell découvre l'amas de galaxies Abell 3627, au bord de la Voie lactée, il mentionne dans son catalogue : « Assez riche en galaxies spirales. » Toutefois, il ne voyait, sur ses plaques photographiques, que les galaxies les plus importantes, la lumière des galaxies plus petites étant absorbée par la poussière et le gaz de notre Galaxie, derrière laquelle se trouve cet amas. Ce sont les galaxies plus petites et moins brillantes qui ont été découvertes récemment.

Pour s'assurer que les galaxies repérées sur les plaques photographiques appartiennent bien à l'amas, il a fallu mesurer leur vitesse d'éloignement, car les vitesses des galaxies qui appartiennent à un même amas sont réparties autour d'une vitesse moyenne. Pour ce faire, Renée Kraan-Korteweg a travaillé avec notre équipe de l'Observatoire de Paris. Nous avons utilisé le positionneur automatique de fibres MEFOS installé

sur le télescope de 3,60 mètres de diamètre de l'Observatoire européen austral, à La Silla (Chili).

À l'aide de cet instrument, nous enregistrons simultanément le spectre de 30 galaxies : les 30 bras portant les fibres optiques étaient positionnés automatiquement en regard de la lumière parvenant des objets choisis à l'avance. L'instrument n'étant efficace que dans les zones de grande densité de galaxies, des mesures complémentaires pour les régions plus clairsemées ont été entreprises au télescope de 1,93 mètre de diamètre situé en Afrique du Sud et au radiotélescope de Perkes, en Australie. Les vitesses ainsi mesurées ont permis de montrer que les galaxies découvertes dans cette région appartenaient bien à l'amas, ce qui faisait de lui un amas très massif qui pouvait être le cœur du Grand Attracteur, si longtemps recherché.

Chantal BALKOWSKI, DARC,
Observatoire de Paris

de Cassiopée, qui se révéla être une nouvelle galaxie voisine.

George Hau, de l'Université de Cambridge, identifia alors un objet qui émettait une très faible lumière visible, superposée au signal radio. Peu de temps après, des images plus sensibles obtenues par différents télescopes révélèrent la forme de cette galaxie : une barre avec des bras spiraux à ses extrémités (voir la figure 2). Si elle n'était pas obscurcie par le plan de la Voie lactée, cette galaxie – nommée Dwingeloo 1 – serait l'une des dix les plus brillantes du ciel. D'après sa vitesse de rotation, elle est environ trois fois moins massive que la Voie lactée : elle a une masse analogue à M33, la troisième en masse du Groupe local, après la Voie lactée et Andromède.

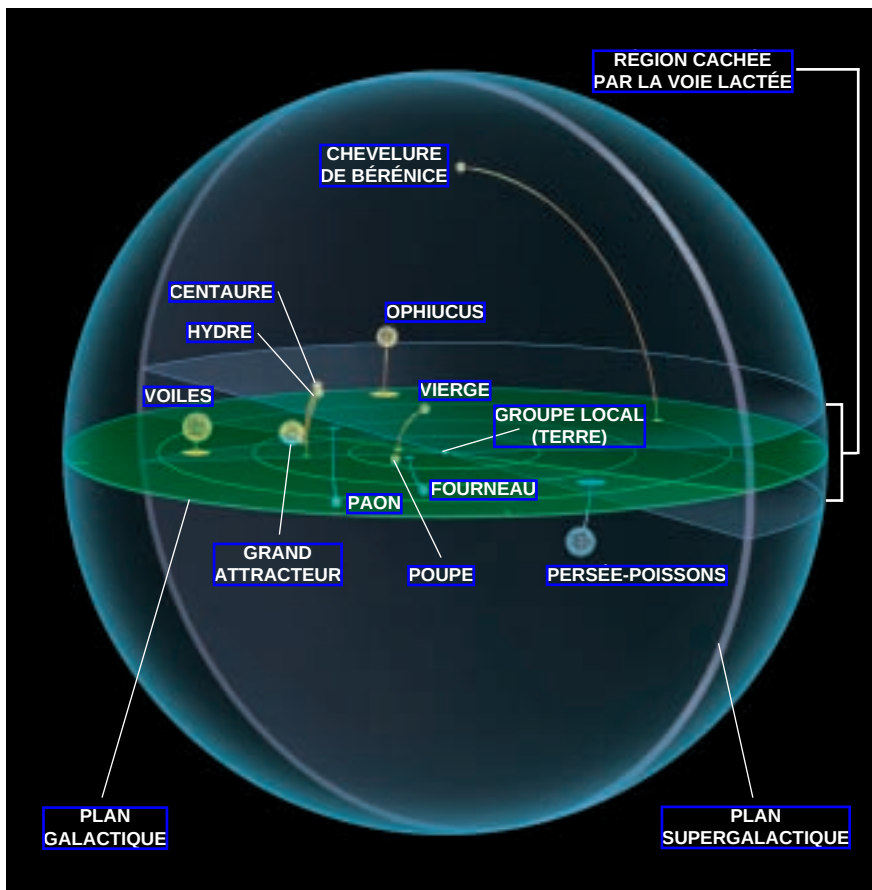
Des observations complémentaires de Dwingeloo 1 à l'aide du radiotélescope de Westerbork, aux Pays-Bas, révélèrent une autre galaxie située à un tiers de degré d'angle de la première : Dwingeloo 2, une galaxie naine deux fois plus petite et dix fois moins massive que Dwingeloo 1, est à dix millions d'années-lumière de nous, juste au-delà du Groupe local. Elle semble associée au groupe

de galaxies IC342. Plus tard, deux autres galaxies situées dans cet ensemble ont été identifiées, grâce à des images de grande sensibilité obtenues dans le visible.

Bien qu'une grande partie de la zone d'exclusion reste à observer, les astronomes savent aujourd'hui qu'il n'existe aucune galaxie de la taille d'Andromède dans notre banlieue galactique. Même s'il est dommage que nous n'ayons pas découvert de galaxies de taille comparable à la nôtre ou à celle d'Andromède, ces résultats éliminent les incertitudes sur la cinématique de notre voisinage immédiat.

Amas et superamas

Les études de la zone d'exclusion ont également rénové les théories de l'Univers plus lointain. À l'aide du radiotélescope de 100 mètres de diamètre d'Effelsberg, en Allemagne, les astronomes ont découvert un nouvel amas à 65 millions d'années-lumière, dans la constellation de la Poupe. Plusieurs autres éléments, dont une analyse des galaxies découvertes par *IRAS*, ont convergé vers la même conclusion : la prise en compte



7. CETTE REPRESENTATION TRIDIMENSIONNELLE de l'Univers local montre la distribution irrégulière des amas de galaxies. Le rayon de la sphère bleue représente 400 millions d'années-lumière ; le plan vert est celui de notre Galaxie, étendu à l'espace intergalactique ; les petits groupes de points sont les amas de galaxies, et les cercles sont leurs projections sur le plan galactique. De nombreux amas de galaxies se trouvent dans le plan supergalactique ou près de lui (en violet). Certains sont dissimulés dans la zone d'exclusion (secteur de part et d'autre du plan galactique).

de l'amas de la Poupe permet un meilleur accord entre le mouvement attendu du Groupe local et le mouvement théorique déduit par le rayonnement du fond cosmologique.

Ces observations pourraient-elles préciser la nature du Grand Attracteur ? Bien que la densité de galaxies visibles augmente dans la direction présumée de cette structure, son cœur a échappé aux recherches. Dans les années 1980, George Abell, alors à l'Université de Californie, a identifié un amas de galaxies situées à peu près à la bonne position ; c'était à l'époque le seul amas connu dans la zone d'exclusion. Toutefois, comme il ne comprenait que 50 galaxies, il ne pouvait s'agir d'un attracteur, encore moins d'un grand attracteur.

Cet amas était pourtant plus massif qu'on ne le pensait : avec Patrick Woudt, de l'Observatoire européen austral à Garching, en Allemagne, nous y avons découvert 600 autres galaxies. Avec des collègues en France

et en Afrique du Sud (voir l'encadré page 81), nous avons obtenu des spectres de ces objets au moyen de divers télescopes situés dans l'hémisphère Sud. Les vitesses mesurées des galaxies suggèrent que l'amas est très massif – équivalent à l'amas de la Chevelure de Bérénice (Coma), un regroupement 10 000 fois plus massif que notre Galaxie. Ainsi les astronomes ont enfin vu le centre du Grand Attracteur. Avec d'autres amas

Renée KRAAN-KORTEWEG enseigne au département d'astronomie de Guanajuato, au Mexique. Ofer LAHAV travaille à l'Institut d'astronomie de l'Université de Cambridge, en Angleterre.

Unveiling Large-Scale Structures behind the Milky Way, sous la direction de Chantal Balkowski et R.C. Kraan-Korteweg, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 67, janvier 1994.
R.A. IBATA, G. GILMORE et M.J. IRWIN, *A Dwarf Satellite Galaxy in Sagittarius*, in

voisins, cette découverte pourrait expliquer complètement les mouvements galactiques observés dans l'Univers proche.

La hiérarchie des structures cosmiques ne s'arrête pas là. Les recherches dans la zone d'exclusion ont identifié des regroupements encore plus grands. Kenichi Wakamatsu, de l'Université de Gifu, au Japon, a identifié un superamas à 370 millions d'années-lumière, dans la constellation d'Ophiucus. Bien que cet amas se trouve derrière le centre galactique, une région extrêmement dense en étoiles, K. Wakamatsu a identifié, sur des relevés photographiques du ciel, des milliers de galaxies qui font partie de cet amas. Le superamas d'Ophiucus pourrait être relié à un autre superamas, situé dans la constellation d'Hercule, ce qui suggère l'existence de structures cohérentes sur des échelles défiant l'imagination, même celle des astronomes.

La zone d'exclusion a gêné des générations d'astronomes. Elle bloquait l'étude de la formation de la Voie lactée, de l'origine du mouvement du Groupe local, de la connexion de chaînes de galaxies, et du nombre réel de galaxies de l'Univers. Les efforts des dix dernières années ont transformé la zone d'exclusion en l'une des régions les plus intéressantes du ciel extragalactique : le mystérieux Grand Attracteur est aujourd'hui bien cartographié, la découverte de la galaxie naine du Sagittaire a montré comment la Voie lactée s'est formée, et les vastes filaments cosmiques posent des questions sur les théories de la matière sombre et de la formation des grandes structures. Derrière ce voile, d'autres surprises attendent peut-être les astronomes, mais les pièces manquantes du ciel extragalactique se mettent en place.

Nature, vol. 370, pp. 194-196, 21 juillet 1994.

Avishai DEKEL, *Dynamics of Cosmic Flows*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 32, pp. 371-418, 1994.

R.C. KRAAN-KORTEWEG et al., *A Nearby Massive Cluster behind the Milky Way*, in *Nature*, vol. 379, pp. 519-521, 8 février 1996.

D. ALLOIN, *Les galaxies*, Flammarion, 1998.

Les choix alimentaires des primates

BRUNO SIMMEN • CLAUDE-MARCEL HLADIK

La comparaison des populations de primates et des populations humaines révèle le fondement biologique des comportements alimentaires de notre espèce.

Pourquoi les divers peuples mangent-ils si différemment? Parce que leurs comportements alimentaires sont forgés par la culture, l'environnement et les adaptations physiologiques. Afin de cerner l'origine des différences, nous rapprocherons des analyses biologiques des systèmes de perception, des explorations cognitives, des études sociologiques et des études ethnologiques. Nous explorerons notamment les bases biologiques du comportement alimentaire humain en nous fondant sur celles des animaux les plus proches de l'homme : les primates. Pour toutes nos analyses, nous tenons compte du contexte dans lequel notre espèce et les autres espèces de primates ont évolué. En effet, à la diversification des espèces qui accompagne celle des habitats correspond une adaptation des systèmes sensoriels aux milieux colonisés.

Dans quelle mesure la perception gustative des populations humaines actuelles reflète-t-elle alors notre héritage de primates? Cette question générale renvoie à une foule de questions particulières : pourquoi aimons-nous généralement les aliments sucrés? Pourquoi l'amer a-t-il une connotation déplaisante? Pourquoi certains d'entre nous sont-ils plus sensibles que d'autres à des molécules sapides?

Les mécanismes adaptatifs ne pouvant être étudiés en action, les comportements alimentaires des primates actuels sont une source d'information irremplaçable. La sélection naturelle ne conserve que les primates qui optimisent leur approvisionnement énergétique, en même temps qu'ils évitent les produits toxiques. Ces comportements

ont été renforcés par l'ajustement de la perception gustative à des environnements qui ont varié au cours des temps géologiques. En retour, les espèces végétales se sont adaptées, par des variations de leur composition en matières nutritives ou en produits toxiques, aux possibilités de discrimination gustative des animaux qui les consommaient et, qui agissaient ainsi comme des disséminateurs de semence et comme des agents déprédateurs.

Les composés végétaux sont bénéfiques ou dangereux, selon les doses consommées, et c'est le rapport coût/bénéfice de ces produits qui doit être pris en compte dans les comparaisons des choix alimentaires des primates non humains, des premiers hominidés ou des populations humaines qui vivent aujourd'hui en économie de subsistance.

Perception et comportement

Plusieurs types de capteurs sensoriels participent à la perception des aliments, mais les voies nerveuses de la gustation, de l'olfaction et de la vision convergent vers certaines zones du cerveau, dites « intégratives ». Nous nous limiterons ici à la présentation de certaines caractéristiques de la perception gustative, notamment des seuils de perception et des réactions comportementales aux stimuli plus forts.

Lors de notre examen des diverses perceptions gustatives, nous n'oublierons pas que les avancées les plus récentes de la physiologie du goût, notamment les travaux d'Annick Faurion, de l'ENSIA, à Massy, ont démontré l'obsolescence de la théorie des

quatre saveurs de base (salé, sucré, acide, amer), qui a prévalu pendant plus d'un demi-siècle : la réglisse n'est ni amère, ni acide, ni sucrée, ni salée ; le monoglutamate de sodium a également un goût original ; et les divers sucres n'ont pas tous la même saveur, par exemple. Les cellules sensorielles des bourgeons du goût réagissent généralement à des molécules de plusieurs types, mais elles se distinguent par une plus ou moins grande affinité pour certaines d'entre elles. Le nerf gustatif périphérique, groupe de fibres nerveuses issues de ces cellules, transmet au cerveau les signaux détectés par toutes les cellules réceptrices, donnant une sorte de signature complexe, qui diffère selon les substances.

Il existe néanmoins des molécules qui engendrent des signaux gustatifs voisins (pour certains sucres, par exemple, ou pour les acides), ce qui rend difficile la discrimination entre les substances, même à forte concentration, aussi bien pour l'espèce humaine que pour les primates non humains.

L'une des réactions gustatives les plus constantes chez les primates est le réflexe gusto-facial, étudié par Jacob Steiner, de l'Université hébraïque d'Hadassa (Israël), en 1984 : chez tous les primates nouveau-nés, les bébés humains compris, une solution amère est toujours rejetée, avec une mimique stéréotypée de la bouche, tandis qu'une solution sucrée est acceptée avec un réflexe de succion et une expression faciale relaxée.

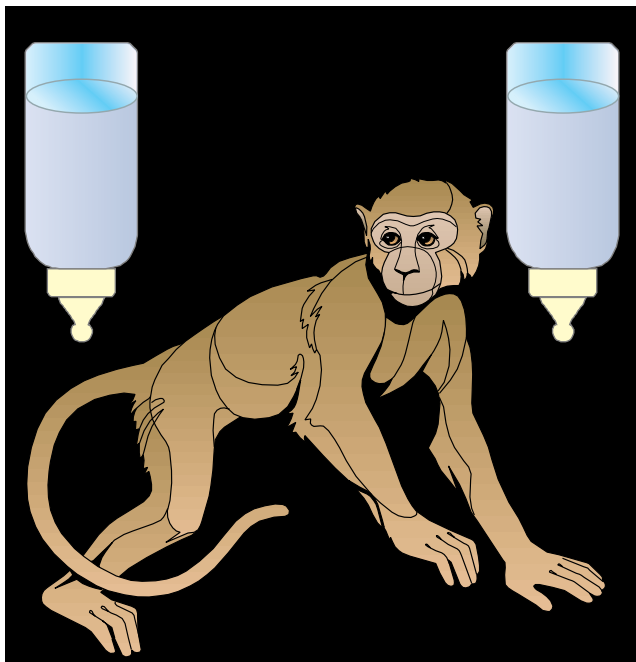
L'apprentissage ou la familiarisation à des stimuli perçus commencent *in utero*. Bien que les recherches dans ce domaine soient encore peu avancées, on observe, par exemple, l'activité du



JEAN-PIERRE LAFITE

1. CE CHIMPANZÉ *Pan troglodytes troglodytes* vit dans la forêt du Gabon. Ce jeune animal, dont la mère mâche des pulpes de fruits, a un oisillon dans la main. Il se prépare à le consommer lentement, avec

des morceaux d'écorce d'arbre. La mère tend à obtenir une quantité d'énergie suffisante, tandis que le choix du jeune, dans ce cas, se fonde davantage sur la récompense associée au plaisir gustatif.



2. ON TESTE LA SENSIBILITÉ gustative des primates non humains en leur présentant simultanément deux biberons, l'un rempli d'eau et l'autre rempli d'une solution contenant la molécule sapide étudiée. Jour après jour, on change la concentration en molécule sapide (on la met, aléatoirement, dans le biberon de gauche ou dans le biberon de droite), et l'on mesure la plus petite concentration à partir de laquelle le



singe ne manifeste plus de préférence. Pour obtenir une mesure de la sensibilité humaine, on fait goûter en aveugle des rangées de solutions. Dans chaque rangée, les diverses solutions contiennent des molécules différentes ; la concentration augmente régulièrement de la première à la dernière rangée. On demande aux sujets d'indiquer quand ils reconnaissent la molécule sapide.

fœtus quand on injecte des composés *in utero*. Les mimiques faciales du nouveau-né correspondent à un véritable réflexe, puisqu'elles existent même chez des nourrissons « anencéphales », c'est-à-dire dont le cerveau est dépourvu d'aires associatives.

Le caractère hédonique (plaisir ou déplaisir) associé au goût d'un aliment est présent dès la naissance et, probablement, *in utero* ; après plusieurs expériences alimentaires, les animaux apprennent à discriminer les aliments qui suscitent des réactions positives de leur organisme de ceux qui leur nuisent.

Les préférences et les aversions pour un goût ne sont pas fixées une fois pour toutes. Plusieurs mécanismes physiologiques viennent en moduler l'intensité à des phases distinctes après l'ingestion d'un aliment. Les neurophysiologistes ont ainsi beaucoup étudié le phénomène de satiété orale, qui est une altération rapide de la nature plaisante du goût d'un aliment avant même que des capteurs de l'estomac donnent le signal du rassasiement ; autrement dit, la perception d'un goût peut déjà constituer une première forme de rassasiement. D'autre part, dans les minutes ou dans les heures qui suivent, la stimulation des récepteurs du

duodénum par l'aliment ingéré modifie l'appréciation de cet aliment : une préférence peut même se transformer en aversion ; c'est le phénomène d'alliesthésie. Les variations de glycémie (la concentration en glucose dans le sang), associées aux états de faim ou de satiété, modulent également l'appréciation des aliments.

À ces mécanismes génétiquement programmés s'ajoutent toujours des réactions conditionnées, c'est-à-dire résultant d'un apprentissage, qui modifient considérablement la nature de la perception gustative. Le plus extraordinaire de ces mécanismes est celui de l'aversion gustative conditionnée, découvert en 1966 par John Garcia et Robert Koelling : une aversion pour n'importe quel goût particulier survient parfois, naturellement, après une expérience alimentaire désagréable (nausée) ; et l'on peut provoquer une aversion gustative chez le singe si l'on déclenche artificiellement une nausée après la consommation d'un aliment. De tels processus étant communs à tous les mammifères, ce ne sont pas eux qui expliquent les différences de niches alimentaires. Aussi avons-nous recherché chez les primates des mécanismes adaptatifs qui ont conduit à la différenciation de la perception gustative.

Les fruits et les sucres

La plupart des primates non humains se nourrissent de fruits. Leur appareil digestif est adapté, d'un point de vue morphologique et fonctionnel, à l'utilisation des pulpes des fruits des phanérogames (les plantes à fleurs), qui ont évolué parallèlement aux primates depuis la fin de l'ère secondaire. Les pulpes des fruits, malgré leurs compositions variables selon les espèces végétales et selon le degré de maturité, contiennent des sucres solubles, principalement du fructose, du glucose et du saccharose. Les travaux que nous avons effectués sur les seuils de perception du saccharose pour 33 espèces de primates non humains ont été initialement entrepris avec Dieter Glaser, de l'Université de Zurich. Ces seuils, mesurés par des « tests de préférence » sont les concentrations minimales des produits en solution qui restent attrayantes pour les animaux (elles sont comprises entre 6 et 330 millimoles par litre pour les primates testés). Dans notre laboratoire, Göran Hellekant, de l'Université de Madison, a ensuite confirmé que les seuils mis en évidence par ces tests de préférence diffèrent peu des concentrations les plus faibles qui déclenchent une activité électrique d'un des nerfs de la gustation.

Si la plupart des fruits pulpeux sont appréciés par la grande majorité des primates, nous avons découvert que l'attrance sensorielle pour les sucres diffère selon les espèces : l'acuité gustative augmente avec la masse corporelle des différentes espèces, celles de grand format ayant les seuils de perception les plus faibles. Cette relation allométrique, c'est-à-dire entre la taille et un trait particulier, a été observée pour le saccharose, mais nous l'avons retrouvée pour le fructose, bien que nous ayons testé moins d'espèces dans ce cas.

Les pressions de sélection expliquent probablement cette tendance. Contrairement aux primates de petite taille, dont les besoins énergétiques sont assurés par la consommation d'un petit volume d'aliments, la plupart des grandes espèces doivent compléter leur régime avec des fruits contenant peu de sucres. Chez ces espèces, une bonne perception des sucres solubles favorise la diversification du régime alimentaire.

Certaines espèces ont un comportement que la relation allométrique n'explique pas seule, parce qu'elles ont une stratégie alimentaire particulière. Par exemple, chez les macaques ou chez les singes capucins, la recherche des ressources disséminées sur de vastes territoires nécessite un important investissement énergétique, mais ces animaux ne consomment que des aliments à densité énergétique élevée.

Au contraire, des primates tels que les langurs et les hurleurs consomment des feuillages et des fruits verts, abondants et peu dispersés, dont l'énergie n'est récupérée qu'après fermentation dans le tractus digestif ; ces aliments sont peu énergétiques, mais les animaux dépensent peu d'énergie pour les trouver.

Pour expliquer la persistance de ces deux stratégies ainsi que des stratégies intermédiaires, l'un d'entre nous (C.-M. Hladik) a proposé une théorie qui fait intervenir l'intensité, variable selon les espèces, de la perception des sucres et d'autres nutriments solubles : une grande acuité gustative induit une forte récompense sensorielle, renforçant la motivation et l'efficacité de la quête alimentaires chez les primates à forte dépense énergétique (cas du singe capucin). Inversement une réaction de faible intensité aux stimuli gustatifs suffit aux animaux à faible investissement énergétique (cas des langurs), pour lesquels la réaction à long terme de l'organisme,

après satiété, jouerait un rôle plus important dans la régulation de la prise alimentaire à faible densité calorique.

La coévolution des primates et des plantes

Comment ces stratégies se sont-elles établies ? Cette question s'apparente à la suivante : comment la discrimination des produits de l'environnement détermine-t-elle la coévolution des végétaux et des primates qui les consomment ? D. Glaser et ses collègues ont trouvé un élément de réponse en observant une dichotomie remarquable entre les primates du Nouveau Monde (Platyrrhiniens) et les primates de l'Ancien Monde (Catarrhiniens). Certaines substances qui ont un goût sucré (par exemple, la thaumatococcine, une protéine perçue par l'homme comme très sucrée) et qui sont présentes dans la pulpe des fruits de quelques espèces végétales d'Afrique tropicale ne sont perçues que par les Catarrhiniens. C'est la preuve que les plantes qui synthétisent ces substances ont coévolué avec les Catarrhiniens, et non avec les Platyrrhiniens, depuis la séparation des plaques continentales du Nouveau Monde et de l'Ancien Monde, il y a 30 millions d'années.

Dans des environnements forestiers qui ont évolué séparément, les phanérogyames à fruits pulpeux ont été sélectionnés par les consommateurs, qui sont également les disséminateurs des graines, pour aboutir à des formes de plus en plus riches en sucres. Dès lors, des végétaux sont avantagés s'ils ont des gènes qui codent une protéine dont

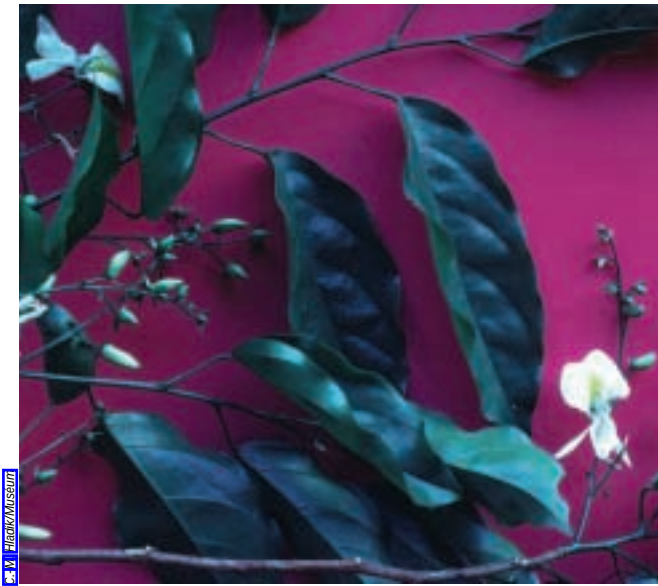
le goût est perçu par les primates comme proche de celui du sucre, surtout si des quantités infimes de produits provoquent une sensation très sucrée. Ce processus ne fonctionne que si le modèle, en l'occurrence des végétaux contenant véritablement des sucres, est plus abondant que l'espèce mimétique. Certes les primates obtiennent une récompense sensorielle, mais ils sont trompés par la forme chimique qui reproduit le goût du sucre, et ils contribuent à la dissémination des semences sans obtenir d'apport énergétique.

Quels primates sommes-nous, du point de vue de la détection des sucres ? Chez l'homme, on mesure les seuils de perception par un protocole différent de celui qui est appliqué aux animaux : au cours des tests, on propose aux sujets humains testés jusqu'à dix substances couvrant un large spectre de qualités gustatives connues. Ceux-ci doivent reconnaître le goût des substances dans des solutions dont on augmente progressivement la concentration en commençant toujours par les solutions les plus diluées.

Le seuil de reconnaissance mesuré par ce test diffère du seuil de détection qui indique la capacité des individus à distinguer, mais sans connaître le goût, une solution sapide par rapport à de l'eau. La valeur obtenue dépend de la répétition des tests (les individus parviennent à reconnaître des saveurs de moins en moins concentrées). Cependant les seuils mesurés dans le système de présentation, aléatoire et en aveugle, correspondent probablement aux concentrations minimales



3. CE SAJOU CAPUCIN observé dans la forêt de Barro Colorado, à Panama, a une stratégie de forte dépense énergétique qu'il équilibre par l'ingestion de nombreux fruits sucrés. Par exemple, il consomme les gousses de cet *inga*, à l'intérieur desquelles il trouve une pulpe sucrée enrobant les graines. Celles-ci traversent son tube digestif sans dommage et sont ensuite disséminées avec les fèces.



4. LE *BAPHIA* (à gauche) est l'une des nourritures végétales les plus riches consommées par le chimpanzé. Ces jeunes pousses contiennent 55 pour cent de protéines. À l'opposé, les feuilles des deux espèces du genre *Alluaudia*, du Sud de Madagascar (à droite), sont



reconnues : un produit amer, telle la quinine, déclenche un rejet immédiat quand il est en concentrations perceptibles, alors qu'il a des qualités gustatives différentes de l'amertume quand il est en concentration tout juste inférieure à celle du seuil.

Pour les populations humaines dont on a déterminé le seuil de gustation des sucres en solution, on retrouve des valeurs qui correspondent généralement à la relation allométrique établie pour les autres primates. Des différences ont cependant été observées. Par exemple, certaines populations des forêts tropicales ont une moins bonne acuité gustative que les populations des milieux plus ouverts, vivant en économie de subsistance. Ces différences pourraient s'expliquer, au moins en partie, par les pressions de sélection qu'exercent les divers environnements : dans les forêts tropicales, l'abondance des fruits contenant beaucoup de sucres provoque une pression de sélection moins forte que dans les savanes, où les concentrations inférieures en sucres dans les fruits résultent d'une moindre diversité d'espèces végétales.

Énergie sans goût

Si la perception des sucres solubles contribue à l'optimisation des apports énergétiques, on ne peut pas généraliser ce mécanisme aux autres nutriments à densité énergétique élevée : de nombreuses substances n'ont pas de

goût caractéristique (pour l'homme et, probablement aussi, pour les autres primates) et présentent plutôt une caractéristique tactile. C'est le cas des graisses présentes dans certains fruits, des amidons qui abondent dans les tubercules et dans les graines (dont celles des graminées, qui constituent aujourd'hui la plus grande partie de l'alimentation du genre humain) et des gommages végétales exsudées le long des troncs d'arbres.

L'apparente imperfection de la réaction gustative à des produits naturels si importants pour l'espèce aurait une explication d'ordre évolutif : alors que les sucres, toujours présents dans les cycles métaboliques des plantes, ont pu se concentrer assez tôt dans la pulpe des fruits des premiers angiospermes, les fruits à pulpe grasse consommés par de nombreux primates seraient issus d'un processus d'évolution plus récent ; l'évolution n'aurait pas encore engendré des mécanismes de reconnaissance gustative de ces molécules. En revanche, cette forme d'énergie condensée apporte un bénéfice nutritionnel à plus long terme que dans le cas des sucres simples : elle engendre, lors de la digestion, une sensation de bien-être qui serait progressivement associée, par conditionnement, aux caractéristiques gustatives de l'aliment.

Ce conditionnement a peut-être lieu pour d'autres nutriments primordiaux, tels les protéines et les acides aminés : il n'existe pas de relation entre le

rôle des acides aminés essentiels et leur appréciation sensorielle, qui, en solution aqueuse, est positive ou négative selon les primates considérés (certains acides aminés sont amers pour l'homme). Les primates couvrent leurs besoins en protéines soit en consommant des feuillages ou des graines, soit en mangeant de la matière animale. Là encore, il est vraisemblable que, lorsqu'un singe capucin ou un chimpanzé casse des graines dures pour en extraire les amandes, ce qui nécessite à la fois une dépense d'énergie et une bonne coordination motrice, l'effet immédiat d'une récompense sensorielle entre en jeu : l'effet bénéfique des nutriments, décelé par les récepteurs du tractus digestif, est associé au goût de l'aliment, ce qui conditionne une attraction gustative et renforce le comportement des primates.

Chez des chimpanzés qui partagent les proies animales en les consommant par petites bouchées, le plaisir des contacts sociaux s'ajoute à celui de la dégustation ; soulignons que l'appartenance ou l'exclusion d'un groupe social représentant parfois des situations de récompense ou de punition parallèles à celles qui prévalent lors des mécanismes purement psychophysiologiques de conditionnement. Dans la plupart des sociétés humaines, ces contacts sociaux au cours des repas sont très importants : des enfants peuvent même transformer en préférence leur dégoût

pour un plat cuisiné lorsqu'ils observent un aîné respecté qui en consomme.

En ce qui concerne les apports minéraux, on considère que la capacité à percevoir le goût du chlorure de sodium et l'attraction gustative que ce sel exerce chez certaines espèces sont une forme d'adaptation. Cependant il ne semble pas exister de risque de carence en sodium dans le régime des primates, notamment dans les forêts tropicales, où les produits consommés apportent des quantités supérieures aux besoins de l'organisme : le chlorure de sodium est présent à faible concentration dans la plupart des végétaux (moins de 0,5 pour cent du poids sec, soit 20 millimoles dans les extraits aqueux). Sauf cas particulier, par exemple les pétioles à concentration élevée en chlorure de sodium de certaines espèces végétales sélectionnées par les chimpanzés au Gabon, les concentrations correspondent à des intensités imperceptibles pour la plupart des primates, dont les seuils gustatifs se situent entre 5 et 500 millimoles par litre.

Le rapport coût/bénéfice des aliments

Dans ces conditions où le risque de carence est improbable, en quoi la consommation de terre, ou géophagie, observée chez plusieurs espèces de primates, contribuerait-elle à équilibrer les apports en éléments minéraux? En fait,

les minéraux consommés par les primates, principalement les argiles, joueraient un rôle important comme adsorbant des tanins, des molécules abondantes dans les végétaux et qui présentent une toxicité. Cet effet bénéfique des argiles explique vraisemblablement la plupart des observations de géophagie, d'autant que l'analyse des échantillons de sol ne révèle pas de concentrations en tanins supérieures à celles qui sont trouvées dans les végétaux, et que ce comportement intervient au cours des périodes où les primates consomment de grandes quantités de feuillages riches en tanins.

En formant des liaisons stables avec les protéines des feuillages et des fruits, dont les cellules sont broyées en cours de mastication, les tanins réduisent la digestibilité des aliments. Ils ne protègent toutefois les espèces végétales contre les consommateurs que lorsqu'ils sont présents à fortes doses, et les diverses espèces de primates les tolèrent à des degrés différents. Les études de l'un des plus petits primates, le microcèbe, ont montré que les concentrations voisines de 0,4 gramme par litre, qui correspondent approximativement au seuil gustatif, sont partiellement rejetées. En revanche, des concentrations en tanins bien supérieures, dans les fruits immatures, sont acceptées par les chimpanzés.

Toutefois les tanins sont généralement consommés en association avec

des sucres. Au cours de la maturation des fruits, la concentration en tanins diminue en même temps que se concentrent les sucres ; de plus, les tanins peuvent être tolérés si les concentrations en sucres sont assez fortes.

Ainsi nous avons observé que le ouistiti *Callithrix jacchus* et le singe de Goeldi *Callimico goeldii*, deux espèces d'Amérique du Sud, présentant un même seuil de perception du fructose, acceptent des concentrations en tanins de 0,4 gramme par litre quand ces tanins sont dans une solution peu sucrée, mais supportent des concentrations en tanins qui atteignent 2 grammes par litre quand la solution est très sucrée.

Cette variabilité de réactions face à des solutions qui incluent à la fois des substances bénéfiques et des composés relativement toxiques pour l'organisme est certainement un phénomène courant dans la nature, où les aliments ont des compositions variables selon la localisation, le climat, la période de l'année, etc.

On doit tenir compte de ce phénomène pour interpréter le comportement de néophobie (de néo-, «nouveau», et phobie, «qui a peur»), qui limite les animaux – et l'homme – à des aliments familiers. En évitant la consommation d'aliments étrangers, la néophobie est une adaptation utile : elle protège contre des substances très toxiques mais insipides ; cependant, c'est par un système d'essais répétés et de conditionnements



5. LES MACAQUES A TOQUES du Sri Lanka complètent leur alimentation avec les pétioles des feuilles d'un *Strychnos* contenant des alcaloïdes. Or ces primates très sensibles aux alcaloïdes amers ne disposent



pas de mécanisme de détoxication assez efficace pour tolérer des produits comme la strychnine ou la brucine. En fait, la plante consommée, *Strychnos potatorum*, ne renferme pas d'alcaloïdes de ce type.

que des préférences stables pour des aliments nouveaux s'élaborent.

On voit ainsi que c'est le rapport coût/bénéfice qui importe dans la décision d'ingestion. Le cerveau intègre, dans son évaluation des aliments, des particularités génétiques, des conditionnements et des influences de l'environnement socio-culturel.

L'analyse effectuée pour les substances astringentes s'applique également aux substances amères (principalement les alcaloïdes), aux terpènes (aromatiques), aux saponines (basiques), aux acides forts. Toutes ces molécules déclenchent un réflexe gusto-facial de rejet dont la valeur adaptative est bien compréhensible en regard de la nocivité de ces produits. Toutefois les primates les consomment parfois lorsqu'ils sont associés à des nutriments utiles. Ces molécules servent ainsi de critère de reconnaissance pour des aliments dont la qualité nutritive ne peut être corrélée à une perception plaisante immédiate.

Les primates choisissent souvent de ne consommer que les parties végétales à faible teneur en alcaloïdes ou en tanins, mais on connaît quelques exceptions intéressantes : dans la forêt dense du Gabon, 14 pour cent des végétaux (sur 382 espèces testées) ont une réaction positive aux tests de détection des alcaloïdes ; or Annette Hladik et l'un d'entre nous (C.-M. Hladik) ont trouvé une proportion quasi identique (15 pour cent) d'espèces susceptibles de renfermer des alcaloïdes, parmi celles que le chimpanzé consomme.

Cette absence apparente de sélectivité du chimpanzé indique que, dans cet environnement forestier, de tels produits ne présentent généralement pas plus de toxicité que la caféine d'une tasse de café. Les observations faites par Michael Huffman, de l'Université de Kyoto, sur les chimpanzés de montagne consommant le jus très amer des tiges de *Vernonia amygdalina*, normalement non consommées par des animaux en bonne santé, montrent même que l'aversion pour ces produits peut être inversée.

Les seuils de réaction gustative des primates à la quinine, très amère, varient considérablement selon les espèces : de 0,8 à 800 micromoles par litre. Ces grandes différences de sensibilité ne dépendent pas de la taille corporelle, comme dans le cas des sucres, mais plutôt des habitats. Par exemple, deux ouistitis consomment les gommex exsudées d'une écorce qu'ils perforent à l'aide de leurs incisives, ce qui les place en contact



6. LES PROPITHEQUES de la forêt galerie du Sud de Madagascar se nourrissent des feuilles d'un *Vernonia*, riches en tanins. Ces feuilles ne sont pas consommées par les autres espèces de primates qui occupent le même habitat et qui perçoivent davantage l'astringence de ces tanins.

avec les substances de défense, comme la quinine, présente dans l'écorce du quinquina. Cependant une des espèces très sensibles à la quinine, *Callithrix argentata*, vit dans les forêts à faible biodiversité, tandis que l'autre, *Cebuella pygmaea*, habite les forêts denses humides, beaucoup plus diversifiées. Dans chacun de ces milieux, les défenses biochimiques des plantes ont évolué de façon bien différente : en forêt dense, les alcaloïdes sont plus rarement toxiques, et les ouistitis risquent peu en consommant des plantes amères ; au contraire, dans les forêts à faible diversité, les végétaux se défendent efficacement contre les prédateurs par leurs alcaloïdes toxiques, et les animaux qui ont une bonne sensibilité gustative minimisent leur risque d'empoisonnement.

Chez les populations humaines dont l'alimentation dépend encore largement des ressources du milieu naturel, la variation des seuils de perception de la quinine est limitée, avec un seuil médian proche de 25 micromoles par litre. La faible différence de sensibilité mesurée entre les Pygmées Aka et les populations plus sensibles s'expliquerait par le faible risque que présente, de ce point de vue, l'environnement forestier tropical. Parmi les substances dont le goût est défini comme amer, seuls des composés comme le phénylthiocarbamide

et quelques autres composés voisins de l'urée sont perçus de façon très différente par deux groupes, que l'on a nommé les «goûteurs» et les «non-goûteurs». Ce polymorphisme, observé dès 1949, a des bases génétiques. De nombreuses recherches sur la fréquence des «goûteurs» ont été faites dans diverses populations. Il a été montré, par exemple, que l'amertume des glycosides cyanogéniques du manioc est moins évitée par les «non-goûteurs» que par les «goûteurs». Or les glycosides que consomment les «non-goûteurs», qui les perçoivent peu, protègent partiellement contre le parasite du paludisme, *Plasmodium falciparum*, dont ils bloquent le développement. En revanche, la consommation de ces produits en trop grande quantité a des effets antithyroïdiens, ce qui explique que certaines populations sujettes au goitre en raison d'un environnement appauvri en iode comportent davantage de «goûteurs» que de «non-goûteurs» (les «non-goûteurs» sont désavantagés).

La nature adaptative des réactions à l'amertume du phénylthiocarbamide doit ainsi s'interpréter en fonction des risques présentés par un environnement particulier. Un phénomène analogue se retrouve pour de nombreux autres produits. Ainsi la sensibilité particulière des Inuits de l'Arctique vis-à-vis du chlorure de sodium par rapport à d'autres populations, et leur perception de ce sel comme néfaste, correspondent au risque de surconsommation de sel qui accompagne l'absorption de grandes quantités d'eau salée.

En effet, chez ces populations arctiques, le régime essentiellement carné impose une forte consommation d'eau, laquelle permet l'élimination de l'urée. Toutefois, l'eau, recueillie par fonte de blocs de glace extraits de la banquise, n'est pas exempte de sel, et une perception accrue du sel contribue à en limiter l'absorption.

La perception des acides

Enfin, le goût des acides forts provoque une vive réaction de rejet, avec une composante douloureuse. Cette réaction peut être également considérée comme adaptative, en raison des risques que ferait courir la variation de l'acidité du milieu interne, notamment lors de la consommation des fruits tels que les citrons ou les limes, dont le pH est souvent inférieur à deux (le pH mesure l'acidité : il est compris entre 0, pour les

acides forts et concentrés, et 14, pour les bases fortes et concentrées).

Chez les primates non humains, les seuils de perception connus pour l'acide citrique (présent dans le citron) diffèrent peu de ceux qui ont été relevés chez des populations humaines, dont la médiane est comprise entre 1,5 et 4 millimoles par litre. Le cas du singe de nuit (*Aotus trivirgatus*), qui consomme de nombreux fruits acides, semble singulier : il apprécie spécifiquement la saveur de l'acide citrique, évitée par les autres espèces.

De subtiles différences entre espèces vivant à Sumatra dans un même habitat ont été observées par Peter Ungar, de l'Université de l'Arkansas : alors que les gibbons *Hylobates lar* consomment des fruits extrêmement acides (pH jusqu'à 1,5), les orangs-outangs *Pongo pygmaeus* et les macaques *Macaca fascicularis* utilisent surtout des fruits dont le pH est compris entre 4 et 5, et les langurs *Presbytis thomasi* évitent les fruits acides, ne choisissant que des espèces dont le pH est supérieur à 5. Pourquoi ces différences ? Chez les langurs, comme chez toutes les espèces dont l'estomac compartimenté se rapproche de celui des ruminants, une acidification détruirait la flore symbiotique nécessaire à la digestion de la cellulose.

Sachant que le pH augmente (l'acidité diminue) à mesure que les sucres s'accumulent au cours de la maturation des fruits et que l'addition de sucre à une solution acide en diminue l'acidité apparente, on comprend que les pulpes des fruits mûrs soient aussi attractives pour de nombreux primates que le sont les boissons gazeuses acidulées pour les jeunes humains. Cette préférence pour les produits sucrés légèrement acides pourrait favoriser la recherche de l'acide ascorbique (vitamine C).

Alimentation et médecine

Cette dualité de la perception gustative, pouvant conduire selon les environnements et les concentrations en substances toxiques et en nutriments, soit à l'évitement, soit à la consommation, permet d'introduire une nouvelle dimension dans l'analyse des aliments et des médicaments. Ainsi Thomas Struhsaker et de ses collègues de l'Université de Duke ont observé la consommation de charbon de bois par une population de colobes : ces animaux survivent dans un habitat appauvri, où des espèces végétales les plus abondantes renferment des



7. LE SINGE HURLEUR de la forêt tropicale d'Amérique centrale, consomme le feuillage d'un arbre du genre *Cecropia*. Les feuilles ont un faible pouvoir nutritif, mais l'espèce, peu mobile, a des besoins énergétiques limités. Les pétioles de ces feuilles contiennent, par ailleurs, des quantités importantes de chlorure de sodium, couvrant les besoins nutritionnels.

concentrations élevées en tanins dans leur feuillage. L'adsorption des tanins par les charbons, analogue au mécanisme décrit pour les argiles, semble la seule possibilité pour parvenir à l'équilibre nutritionnel et à la colonisation de tels habitats.

Peut-on parler d'utilisation médicamenteuse des produits de l'environnement ? M. Huffman a montré que les chimpanzés apprennent que des substances amères, généralement à

éviter, ont parfois des effets bénéfiques, en leur permettant de se débarrasser des parasites intestinaux. Le terme de « pharmacognosie » a d'ailleurs été introduit pour décrire le fait que les animaux se soignent.

En fait, une explication satisfaisante de ces comportements doit d'abord rendre compte des mécanismes du conditionnement opérant par l'effet bénéfique de l'ingestion, sans nécessairement faire appel aux hypothèses cognitivistes que le terme de pharmacognosie implique. Jusqu'à présent, la relation de la sensibilité gustative avec les préférences alimentaires chez l'homme n'a pu être établie que pour des composés amers : les individus les plus sensibles à l'amertume sont ceux qui manifestent le plus souvent des aversions alimentaires.

Le déterminisme socioculturel des comportements n'a pas toujours été pris en compte à sa juste mesure. La subtilité des comportements alimentaires des primates non humains et la plasticité des systèmes sensoriels à la base de ces comportements sont difficiles à préciser. L'impact des apprentissages précoces, notamment au cours de la maturation du jeune primate, est mal connu, alors que ces apprentissages pourraient se révéler déterminants dans l'orientation des préférences et des aversions alimentaires ultérieures. La référence au modèle des primates non humains reste une approche indispensable à la reconnaissance des caractéristiques biologiques de notre propre perception et de ses fondements évolutifs. Sans cette connaissance du fond commun à tous les primates, il semble difficile de prendre la mesure exacte des différences culturelles entre les populations humaines.

Bruno SIMMEN est chercheur CNRS (Eco-Anthropologie) au Laboratoire d'écologie générale du Muséum national d'histoire naturelle, à Brunoy. Claude-Marcel HLADIK est professeur au Muséum national d'histoire naturelle.

D. GLASER et al., *The Taste Responses in Primates to the Proteins Thaumatin and Monellin and their Phylogenetic Applications*, in *Folia Primatologica*, n° 29, 1978.

J. E. STEINER et D. GLASER, *Differential Behavioral Responses to Taste Stimuli in Non-Human Primates*, in *Journal of Human Evolution*, n° 13, 1984.

C.-M. HLADIK et B. SIMMEN, *Taste Perception and Feeding Behavior in Non-*

Human Primates and Human Populations, in *Evolutionary Anthropology*, vol. 5, n° 2, 1996.

C.-M. HLADIK, *Composition chimique des fruits et perception gustative : interactions et tendances évolutives dans les forêts tropicales*, in *L'alimentation en forêt tropicale*, UNESCO, Paris, 1996.

B. SIMMEN et C.-M. HLADIK, *Sweet and Bitter Taste Discrimination in Primates : Scaling Effects across Species*, in *Folia Primatologica*, n° 69, 1998.

C.-M. HLADIK, *Aliments et médicaments : des « traditions » chez les chimpanzés et de leurs interprétations*, in *La culture est-elle naturelle ?*, Éditions Errance, Paris, 1998.

Les molécules biologiques dans l'eau

1. MODELISATION D'UNE PROTEINE (l'inhibiteur de la trypsine pancréatique bovine) entourée d'eau (sphères vertes et blanches). Bien que l'eau complique beaucoup les calculs, elle est indispensable à la bonne compréhension du fonctionnement des molécules biologiques.

Les modélisations par ordinateur montrent l'influence de l'eau sur la structure et la dynamique des molécules biologiques.

MARK GERSTEIN • MICHAEL LEVITT

Au cours de l'été 1986, l'un de nous (M. Levitt) a dépensé plus de deux millions de francs pour une minuscule goutte d'eau. Il avait à peine de quoi mouiller une tête d'épingle, et l'eau n'était même pas réelle : à l'aide d'un puissant ordinateur, il calcula pendant deux semaines comment des molécules d'eau interagissent avec une protéine, modifiant sa structure et son mouvement.

La protéine étudiée était l'inhibiteur de la trypsine pancréatique bovine. Elle intéresse beaucoup les biologistes, car elle est petite, donc plus facile à étudier que la plupart des autres protéines. En 1977, Martin Karplus et ses collègues de l'Université Harvard avaient modélisé cette protéine, mais seulement dans le vide, sans interaction avec d'autres molécules. Personne ne savait comment l'inhibiteur de la trypsine pancréatique bovine se comporte quand la protéine est entourée de milliers de molécules d'eau, dans les cellules vivantes.

M. Levitt et sa collègue Ruth Sharon ont finalement découvert que le modèle dans le vide était inapproprié. Après eux, plusieurs équipes ont étudié la structure d'autres molécules biologiques dans leur milieu aqueux naturel.

Aujourd'hui, les ordinateurs de bureau mettent moins de deux heures pour modéliser des protéines telles que l'inhibiteur de la trypsine pancréatique bovine et ses molécules d'eau associées (l'expérience coûte alors moins de dix francs). Les biologistes ont simulé les structures dans l'eau de plus de 50 protéines et acides nucléiques tels que l'ADN.

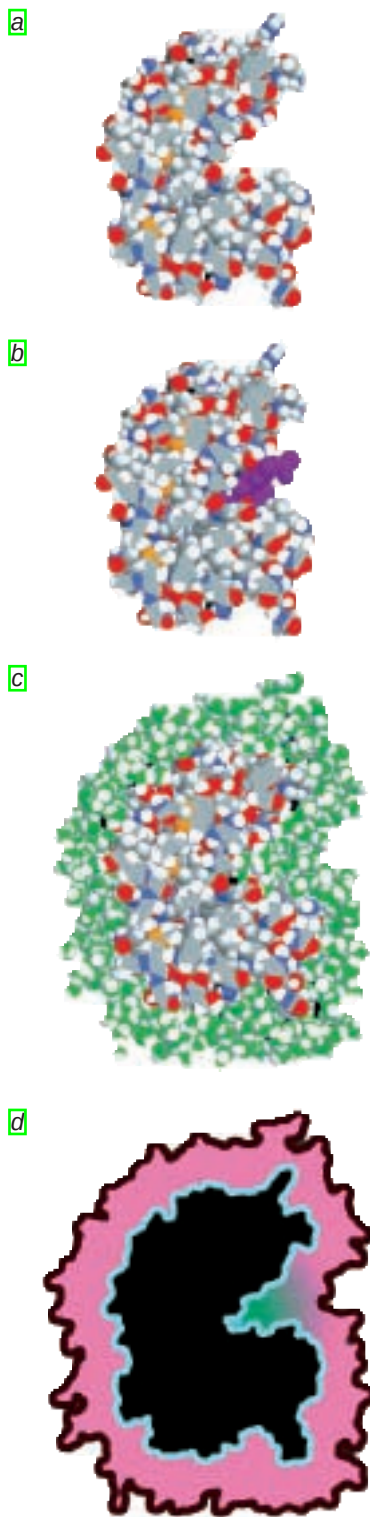
Pourquoi la compréhension des effets de l'eau sur la forme des molécules biologiques est-elle si importante ? D'une part, les mécanismes moléculaires essentiels à la vie dépendent de la structure moléculaire et de ses interactions avec son milieu. D'autre part, la compréhension de la structure des molécules biologiques en milieu aqueux aidera les pharmaciens à concevoir de nouveaux médicaments capables de bloquer ou de faciliter diverses réactions biochimiques.

L'eau virtuelle

Une molécule d'eau (H_2O) est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. Chaque atome d'hydrogène apporte un électron sur une couche externe qui en contient jusqu'à deux, et l'atome d'oxygène apporte huit électrons, dont six électrons sur sa couche externe, qui en comporte huit au maximum. Les atomes se lient en mettant en commun leurs électrons, ce qui complète leur couche externe : l'atome d'oxygène met en commun deux électrons, chacun avec un atome d'hydrogène, de sorte que l'atome d'oxygène a alors huit électrons sur sa couche externe et que chaque atome d'hydrogène a alors deux électrons sur sa couche externe. Les quatre électrons restants de l'atome d'oxygène se regroupent par paires. Au total, la molécule d'eau a une forme de tétraèdre dont l'atome d'oxygène occupe le centre. Les deux atomes d'hydrogène et les deux paires d'électrons s'orientent chacun vers un des quatre sommets (voir la figure 3). Comme les électrons des atomes d'hydrogène sont plus souvent autour de l'atome d'oxygène qu'autour de leurs propres noyaux chargés, la molécule est polaire : elle a deux «nuages» de faible charge négative autour de l'atome d'oxygène, et ses deux atomes d'hydrogène restent avec de faibles charges positives. Au total, toutefois, ces deux types de charges s'équilibrent, et les molécules d'eau sont électriquement neutres.

Les chimistes représentent souvent les molécules d'eau sous forme d'un V (voir la figure 4). Chaque côté du V correspond à une liaison oxygène-hydrogène d'environ un dix-millionième de millimètre de longueur. L'angle formé par les deux cotés du V est proche de 105 degrés.

La polarité de l'eau favorise certaines interactions entre les molécules d'eau : chaque atome d'hydrogène, chargé positivement, d'une molécule d'eau est attiré par un atome d'oxygène, chargé négativement, d'une autre molécule. Ces interactions sont des liaisons



2. LE LYSOZYME est une enzyme qui tue les bactéries en décomposant les molécules de sucre de leur paroi. Son site actif se situe dans le sillon principal de la protéine (a). La forme du sillon s'adapte aux molécules (sphères violettes) qu'elle clive (b). La modélisation (c) de l'interaction de l'eau (sphères blanches et vertes) et du sillon permet aux chercheurs d'établir une carte du site actif (d). La zone verte indique les molécules d'eau facilement déplacées. De telles cartes sont fondamentales dans la conception de nouveaux médicaments inhibiteurs ou activateurs d'une enzyme.

hydrogène. Chaque molécule d'eau liquide forme quatre liaisons hydrogène. Cependant, le nombre de liaisons hydrogène autour d'une molécule d'eau liquide semble pouvoir varier entre trois et six, avec une moyenne de 4,5. Cette variabilité s'explique par la structure aléatoire et fluctuante de l'eau liquide, à la différence de la glace où les molécules d'eau se disposent selon un arrangement tétraédrique régulier. Le maintien d'une structure tétraédrique impose aux molécules d'eau une conformation plus lâche que celle de la plupart des autres liquides, tels les huiles ou l'azote liquide.

Pour simuler un volume d'eau, on doit représenter deux types de forces : intramoléculaires et intermoléculaires. On modélise les interactions des atomes, dans une molécule d'eau, par des forces à court rayon d'action, semblables à des ressorts : ces forces correspondent aux liaisons chimiques entre chaque atome d'hydrogène et l'atome d'oxygène de la molécule. Les forces intramoléculaires imposent des valeurs précises aux longueurs des liaisons entre l'oxygène et les atomes d'hydrogène, et à l'angle formé par ces liaisons. D'autre part, on modélise les interactions de plusieurs molécules d'eau par des forces électriques à plus longue portée.

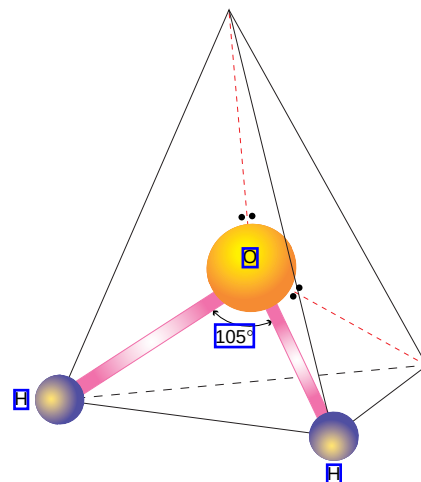
Les forces intermoléculaires ont un comportement différent : leur intensité diminue lorsque la distance augmente. Elles résultent de l'attraction des charges opposées et de la répulsion de charges identiques. Ces interactions engendrent les liaisons hydrogène, ainsi que des forces attractives plus faibles, nommées forces de Van der Waals.

Biologie simulée

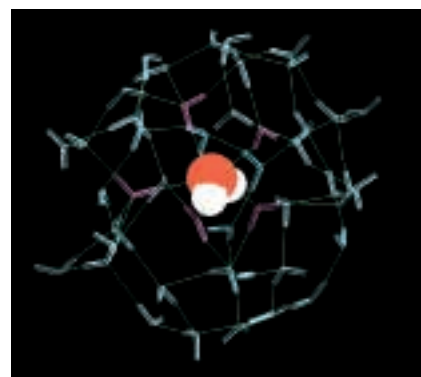
À la fin des années 1960, aux Laboratoires *Bell*, Aneesur Rahman et Frank Stillinger ont été les premiers à modéliser des molécules d'eau par ordinateur. Ils ont simulé le mouvement de 216 molécules d'eau dans une boîte rectangulaire pendant cinq milliardièmes de milliseconde (216 molécules s'agencent en un parallélépipède de six molécules de hauteur, de six molécules de largeur et de six molécules de profondeur). La simulation a reproduit quantitativement la plupart des propriétés de l'eau, telles que sa structure moyenne, sa vitesse de diffusion et sa température d'évaporation.

L'eau est importante dans les organismes vivants, parce qu'elle forme des

liaisons hydrogène avec d'autres molécules d'eau, et aussi parce qu'elle interagit avec divers types de molécules biologiques. Parce qu'elle est polaire, l'eau se lie à d'autres molécules polaires ou chargées, tels les acides, les sels, les sucres, et diverses régions des protéines et de l'ADN. Grâce à ces interactions, l'eau dissout les molécules polaires, ainsi qualifiées d'hydrophiles, ce qui signifie étymologiquement «qui aiment



3. LA MOLECULE D'EAU s'inscrit dans un tétraèdre dont le centre est occupé par l'atome d'oxygène (sphère orange). Deux des six électrons de la couche externe de l'oxygène sont mis en commun dans deux liaisons «covalentes» (barres roses) avec ceux des deux atomes d'hydrogène (sphères violettes). Ainsi les atomes ont leurs couches externes complètes. Les deux paires d'électrons restantes (points noirs) autour du noyau d'oxygène sont orientées vers les deux sommets.



4. LES LIAISONS HYDROGENE confèrent à l'eau ses propriétés particulières. Dans ce modèle d'eau liquide, la molécule centrale (sphères rouge et blanches) a formé des liaisons hydrogène (lignes vertes) avec cinq autres molécules d'eau (représentées par des V roses). Les atomes d'hydrogène de cette molécule (blancs) se lient à des atomes d'oxygène de deux autres molécules d'eau, et son atome d'oxygène (rouge) est lié à un atome d'hydrogène de trois autres molécules d'eau. Chaque molécule d'eau liquide crée en moyenne 4,5 liaisons hydrogène.

l'eau». En revanche, l'eau se lie très peu avec les molécules non polaires, telles que les graisses, ce qui explique que l'eau et l'huile ne se mélangent pas à l'équilibre (les molécules non polaires sont hydrophobes, étymologiquement «qui n'aiment pas l'eau»).

Certaines molécules biologiques, par exemple les protéines et l'ADN, contiennent à la fois des parties hydrophiles et des parties hydrophobes, organisées en longues chaînes. La structure tridimensionnelle de ces molécules résulte du repliement des chaînes sur elles-mêmes, de sorte que les groupes hydrophiles sont en surface, où ils interagissent parfois avec l'eau, et les groupes hydrophobes sont enfouis à l'intérieur de la molécule, à l'abri de l'eau. Dès 1959, Walter Kauzmann indiqua que cet effet hydrophobe détermine le repliement de la protéine ; il est aujourd'hui encore très étudié (voir *Les mécanismes du repliement des protéines*, par Frederic Richards, *Pour la Science*, mars 1991).

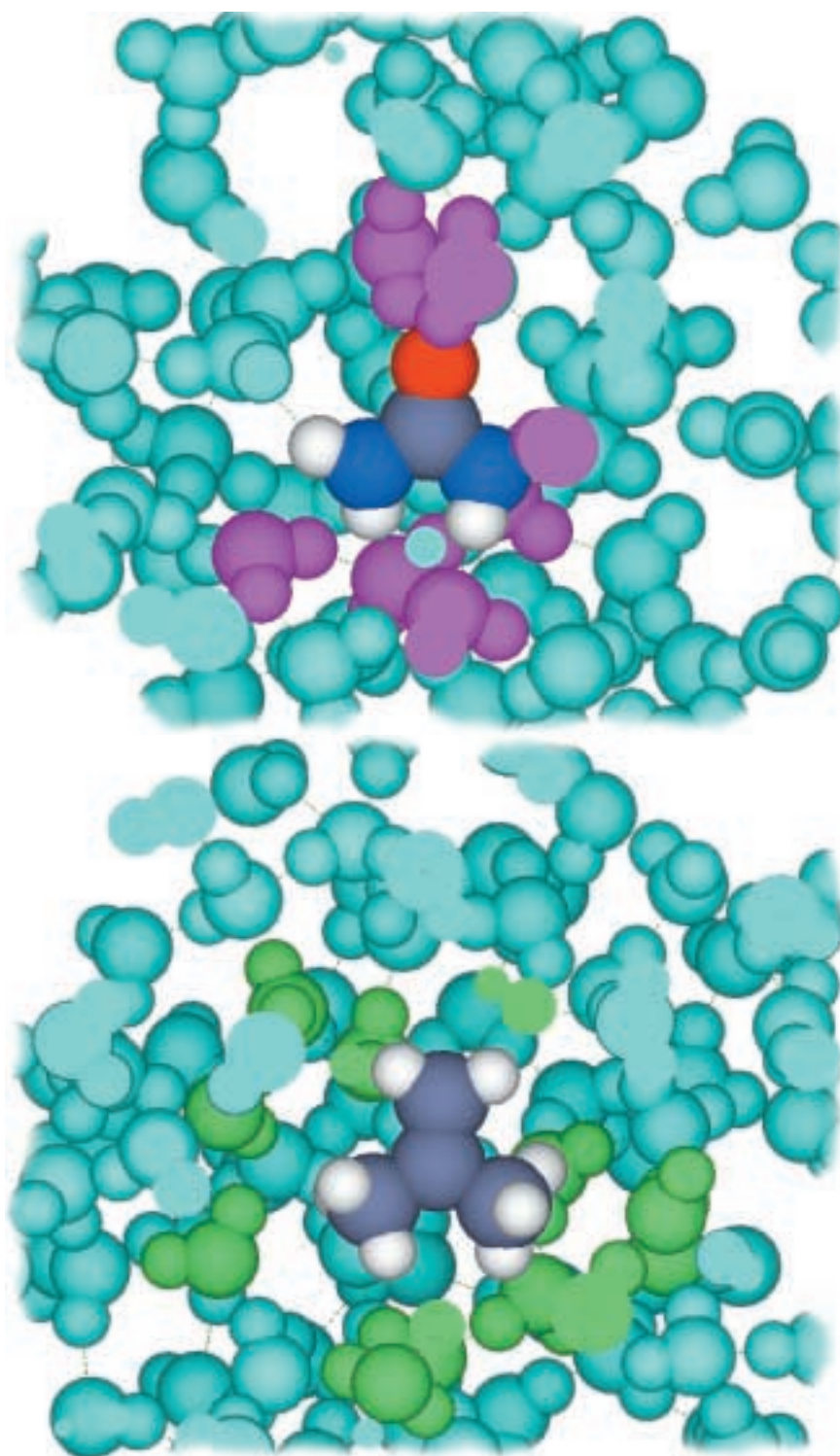
Les modélisations distinguent trois types d'eau : l'eau «ordonnée», qui entoure les molécules biologiques, interagissant fortement avec elles, l'eau «de masse», qui est au-delà et les molécules d'eau, qui sont enfouies dans les molécules biologiques. Une seule cellule contient des milliards de molécules d'eau, qui emplissent tous les espaces non occupés par des molécules biologiques. Au total, le corps humain contient environ 60 pour cent d'eau.

Comment modéliser les interactions des trois types d'eau avec les atomes d'une molécule biologique ? Nous spécifions tout d'abord les interactions élémentaires de tous les atomes, puis nous laissons le système évoluer selon les lois de la physique newtonienne. Une telle simulation requiert deux ingrédients fondamentaux : d'une part, la définition des interactions inter- et intramoléculaires de l'eau et des molécules biologiques ; d'autre part, la planification de leurs mouvements au cours du temps, c'est-à-dire la dynamique moléculaire.

Au cours de l'évolution d'un volume d'eau qui contient des molécules biologiques, chaque atome bouge. Sa position à chaque instant se détermine par rapport à sa position à l'instant précédent : on ajoute la distance parcourue entre les deux instants considérés. Quand aucune force n'agit sur l'atome, la distance qu'il parcourt est le produit du temps d'évolution par sa vitesse à la position précédente. Toutefois, les

forces exercées par les autres atomes ont généralement une résultante qui accélère l'atome. Quand les forces sont constantes pendant le laps de temps, nous calculons la nouvelle vitesse par l'application des lois de Newton (la

variation de la vitesse est proportionnelle à la force). Puis nous utilisons cette vitesse actualisée pour calculer la nouvelle position de l'atome. Les interactions, nombreuses dans un liquide, empêchent les atomes de se déplacer



5. DES MOLECULES aux formes semblables réagissent différemment avec l'eau selon qu'elles sont polaires ou non, c'est-à-dire selon qu'elles ont ou non une charge électrique partielle sur certains de leurs atomes. L'urée, une molécule polaire présente dans l'urine, forme des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau (sphères violettes, en haut). En revanche, l'isobutène, apolaire, ne forme pas de telles liaisons ; les molécules d'eau créent des liaisons hydrogène entre elles et produisent une structure en forme de cage (sphères vertes, en bas).

notablement. Le temps utilisé est très court, de l'ordre d'une femtoseconde (un millionième de milliardième de seconde), pendant lequel une molécule d'eau ne bouge que de 1/500 de son diamètre.

Une longue simulation de tous les atomes d'une molécule biologique, avec son eau ordonnée, requiert de nombreux calculs à chaque laps de temps et produit une quantité de données considérable. Par exemple, pour simuler le mouvement d'une petite protéine dans l'eau, on doit calculer un demi-million de séries de coordonnées cartésiennes par nanoseconde (un milliardième de seconde); chacune décrit la position d'environ 10 000 atomes. La visualisation détaillée d'une telle simulation permet de voir chaque molécule tourner, se déplacer et vibrer pendant des millions d'images.

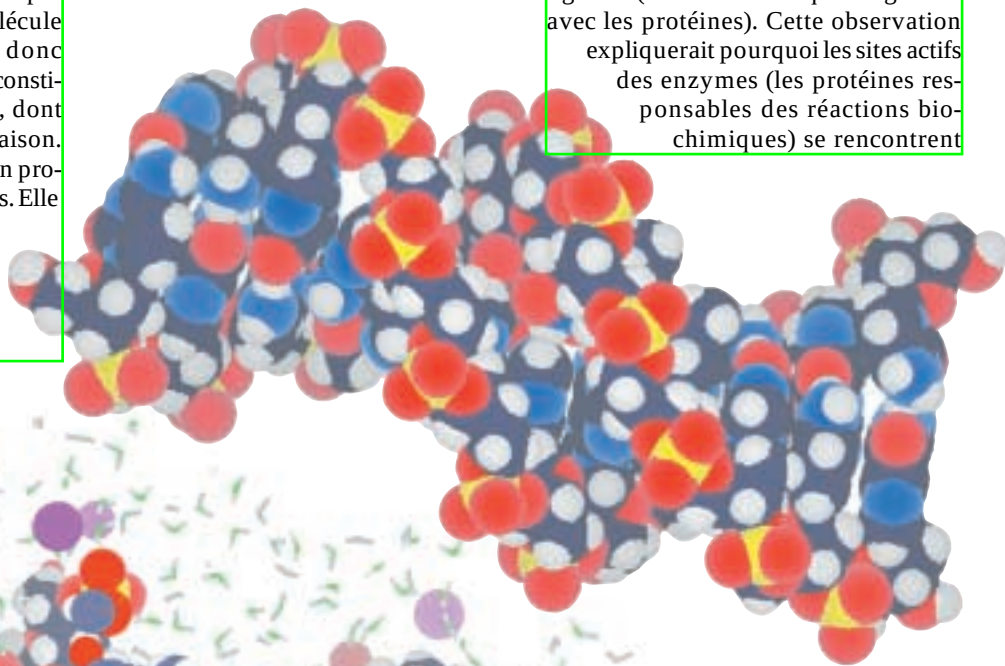
Comment l'eau détermine-t-elle la dynamique moléculaire? Pour répondre à cette question, examinons deux petites molécules organiques, l'isobutène et l'urée, qui ont des formes similaires, mais des propriétés chimiques différentes. L'isobutène, un combustible produit par raffinage du pétrole, est une molécule en forme de Y, non polaire (et donc hydrophobe), dont le squelette est constitué de quatre atomes de carbone, dont deux sont liés par une double liaison. L'urée, excrétée dans l'urine, est un produit du métabolisme des protéines. Elle a aussi une forme en Y, avec un groupe carbonyle (C=O) lié à deux groupes amine (NH₂). L'urée est une molécule polaire, c'est-à-dire hydrophile.

Les simulations de la dynamique moléculaire de l'isobutène et de l'urée montrent que l'eau se comporte de manière différente autour des deux molécules (voir la figure 5). Les molécules d'eau forment des liaisons hydrogène avec l'atome d'oxygène et les atomes d'hydrogène de l'urée. En revanche, les molécules d'eau autour de l'isobutène, hydrophobe, ne créent des liaisons hydrogène qu'entre elles. Elles forment ainsi une cage d'eau, qui entoure la molécule. Ce type d'études éclaire le comportement de l'eau autour des molécules biologiques plus complexes, telles que les protéines et les acides nucléiques. Par exemple, l'eau est indispensable au maintien de la structure de l'ADN. Les premières tentatives de modélisation de la dynamique moléculaire de l'ADN dans le vide ont échoué, car les forces répulsives entre les groupes phosphate, chargés négativement, qui constituent, avec des molécules de sucre, le squelette de la double hélice d'ADN, disloquent la molécule après seulement 50 picosecondes (un milliardième de milliseconde).

À la fin des années 1980, à Londres, M. Levitt et Miriam Hirshberg ont obtenu une modélisation de l'ADN de 500 picosecondes en «ajoutant» des molécules d'eau qui ont stabilisé la structure de la double hélice grâce à la formation de liaisons hydrogène avec les groupes phosphate (voir la figure 6). Les simulations ultérieures d'ADN en milieu aqueux ont montré que les molécules d'eau interagissent avec la plupart des parties de la double hélice d'ADN, y compris avec les paires de bases qui constituent le code génétique.

En revanche, l'eau ne pénètre pas jusqu'au cœur hydrophobe des protéines. Par conséquent, les simulations des protéines avec l'eau n'ont concerné que la surface de la protéine, qui est plus exposée que l'intérieur.

L'interaction des molécules d'eau et de la surface des protéines dépend de leur géométrie particulière et, notamment, des profonds sillons de la surface des protéines. Les molécules d'eau liées par les liaisons hydrogène se lient mal à ces sillons, de sorte qu'elles sont facilement remplacées par des ligands (les molécules qui réagissent avec les protéines). Cette observation expliquerait pourquoi les sites actifs des enzymes (les protéines responsables des réactions biochimiques) se rencontrent



6. LA DOUBLE HÉLICE DE L'ADN (en haut) est composée de deux montants torsadés autour des paires de bases (sphères grises, bleues, rouges et blanches); chaque montant est une alternance de sucres et de groupes phosphate (sphères rouges et jaunes). Une image extraite d'une simulation de l'ADN en milieu aqueux (en bas) montre que les molécules d'eau (V verts) s'immiscent jusqu'au centre de la double hélice de l'ADN et la stabilisent. Les sphères violettes représentent des ions sodium en solution.



7. LES HELICES ALPHA sont des motifs fréquents dans les protéines. Elles se déroulent plus facilement dans l'eau, car les molécules d'eau remplacent les liaisons hydrogène (lignes vertes) qui maintiennent normalement l'hélice. Une molécule d'eau (verte) relie ici un atome d'oxygène (rouge) à un groupe azote-hydrogène (bleu), qui habituellement forment à eux seuls une liaison hydrogène dans l'hélice repliée.

souvent dans des sillons (voir la figure 2). D'autre part, comme la disposition des molécules d'eau dans un site actif vide reproduit souvent la géométrie et la structure du substrat de l'enzyme, on utilise parfois les simulations pour concevoir des médicaments.

Biologie réelle

Faute de techniques expérimentales adaptées et précises, on apprécie mal la fidélité des simulations de molécules biologiques en milieu aqueux : on compare des résultats expérimentaux aux seules valeurs moyennes et globales obtenues par simulations.

La diffraction des neutrons et la diffraction des rayons X sont parmi les techniques le plus souvent utilisées pour la vérification des structures obtenues par simulation des molécules biologiques en milieu aqueux. Dans une expérience de diffraction des neutrons, un faisceau de neutrons est dirigé sur un petit échantillon cristallisé ; on enregistre la manière dont les neutrons sont dispersés par les molécules de l'échantillon. Chaque espace entre les molécules agit comme une petite fente qui produit un motif de diffraction caractéristique. L'analyse de ces motifs détermine l'espace-ment des molécules. Les résultats obtenus par la diffraction des neutrons sont proches des résultats moyens des simulations par ordinateur ; les distances coïncident.

On compare également la dynamique et le comportement prévus par les simulations moléculaires aux propriétés observées en laboratoire. Par exemple, la plupart des protéines contiennent au moins une «hélice alpha», une structure due à l'enroulement de la chaîne d'acides aminés en

raison de liaisons hydrogène entre des atomes de cette même chaîne. Grâce à des expériences, nous savons aujourd'hui que le chauffage des protéines déroule ces hélices alpha. Cependant, lors des premières tentatives de simulation du comportement d'une seule hélice alpha dans le vide à des températures élevées, l'hélice demeurerait intacte. En «ajoutant» de l'eau à la simulation, M. Levitt et Valerie Daggett, de l'Université de Washington, ont réussi à modéliser le comportement réel de l'hélice alpha (voir la figure 7).

Ces simulations par ordinateur fournissent de plus en plus d'informations sur la forme de diverses molécules biologiques et sur leur fonctionnement dans les organismes vivants. Cependant, les capacités de l'informatique et le coût d'utilisation des superordinateurs limitent en permanence les simulations de molécules biologiques en milieu aqueux. Quand les chimistes et les biologistes publient des modèles de molécules biologiques dans des revues, ils dessinent en général leurs modèles avec des couleurs vives sur un fond noir. Nous savons aujourd'hui que ce fond est aussi important que les molécules elles-mêmes et qu'il devrait avoir la couleur de l'eau.

Mark GERSTEIN est professeur adjoint à l'Université Yale. Michael LEVITT est professeur à l'Université de Stanford.

Michael LEVITT et Britt H. PARK, *Water: New You See It, New You Don't*, in *Structure*, vol. 1, n° 4, pp. 223-226, 15 décembre 1993.

Mark GERSTEIN et Cyrus CHOTHIA, *Packing at the Protein-Water Interface*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 93, n° 19, pp. 10167-10172, 17 septembre 1996.

L'UNIVERS DES SCIENCES

L'UNIVERS DES SCIENCES

LES ÉTOILES

Vie et mort des soleils lointains

POUR LA SCIENCE



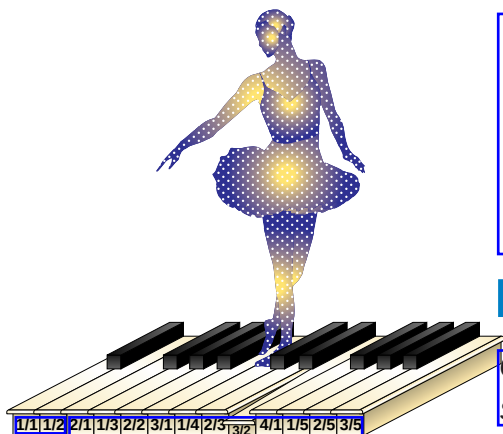
LES ÉTOILES

Ce livre expose l'origine et la nature de nos connaissances sur les étoiles, avant de les décrire dans leur dynamique et leur devenir. Les objets célestes les plus insolites, géantes rouges, supernovae, pulsars et trous noirs, s'insèrent alors naturellement dans le récit de l'évolution stellaire.

272 pages - 220 F
code 1892

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p.98



Négligeable, mais troublant

JEAN-PAUL DELAHAYE

Certains ensembles infinis et partout denses sont négligeables... et ce n'est pas un paradoxe.

Le point n'a pas d'épaisseur : en enlevant successivement des points à une droite, nous ne la vidons jamais. Nous pouvons même en enlever 1 000 milliards sans y créer de trou véritable : un être se déplaçant dans ce qui reste, en faisant des pas aussi petits que l'on veut, pourra toujours aller de n'importe quel point à n'importe quel autre (voir la figure 1).

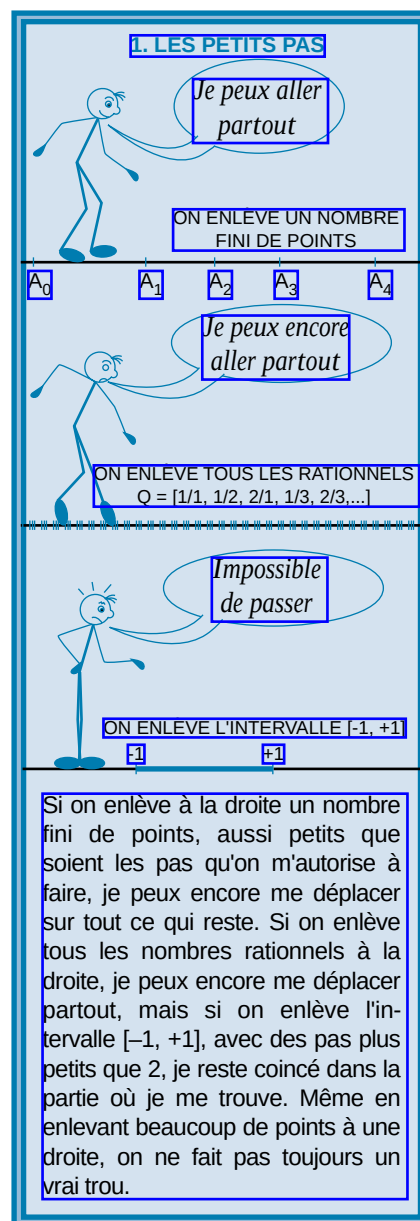
C'est seulement quand nous enlevons un intervalle complet à une droite que le déplacement des êtres aux trop petites jambes est impossible. En ôtant par exemple l'intervalle $[-1, +1]$ (tous les nombres compris entre -1 et $+1$), nous interdisons le passage de la partie positive à la partie négative à un marcheur dont les pas sont de longueur inférieure à 2, car il ne peut franchir le trou central, trop large.

Même la suppression d'un ensemble infini, comme l'ensemble des nombres rationnels (quotients de deux entiers), ne gêne pas la démarche à petits pas des êtres minuscules. Aussi n'est-ce pas la finitude ou l'infinitude qui permet d'élucider le problème : d'autres notions sont nécessaires pour étudier quels sont les trous négligeables de l'ensemble des nombres réels. Quelles sont ces notions ? Pouvons-nous examiner ce qui reste des ensembles « quand on leur a presque tout enlevé » ?

Le domaine des mathématiques, dénommé topologie de la droite réelle ou théorie du continu, s'est constitué pour traiter ce sujet. Cette théorie est troublante : alors que tout s'y développe de manière parfaitement rationnelle, le visiteur s'y trouve vite confronté à des situations presque paradoxales où l'intuition hésite et vacille.

La crainte de tomber sur des contradictions et l'idée préconçue que la compréhension de l'infini pris comme un tout (ce qu'on appelle l'infini actuel) était réservée à Dieu, ont longtemps paralysé les mathématiciens. Ce n'est qu'au XIX^e siècle que Bernhard Bolzano (1781-1848), Karl Weierstrass (1815-1897), Richard

Dedekind (1831-1916) et Georg Cantor (1845-1918) ont découvert que l'on peut classer et comparer les sous-ensembles infinis de l'ensemble des nombres réels sans rencontrer de contradictions. Ce fut



un émerveillement qui bouleversa les mathématiciens et en troubla gravement certains (Cantor est mort fou). Cela fait déjà un siècle que nous avons pénétré cet univers dangereux, et nous n'avons pas rencontré de paradoxes fatals. Après une période d'instabilité et de doute au début du XX^e siècle – période appelée « crise des fondements » –, les mathématiciens ont mis au point une théorie des ensembles qui apparaît inébranlable et sert de support à la topologie.

Est-il néanmoins si sûr que tout soit bien résolu ? Certains logiciens et philosophes soutiennent que nous sommes toujours au bord du précipice. L'heuristique de Borel que nous allons présenter et que les résultats récents de mathématiques expérimentales rendent vraisemblable est une des marques flagrantes de cette étrangeté du monde de la topologie.

LE NÉGLIGEABLE

L'heuristique de Borel se fonde sur la notion d'ensemble négligeable (ou ensemble de mesure nulle). Par définition, un sous-ensemble de l'ensemble des nombres réels est négligeable si on peut l'enfermer dans une suite – finie ou infinie – d'intervalles dont la longueur totale est aussi petite qu'on veut. Cette définition a été formulée pour la première fois en 1881 par A. Harnack dans un travail sur l'intégrale de Riemann, mais c'est Borel, en 1894, qui établira la théorie complète des ensembles mesurables.

Un point A à lui seul est un ensemble négligeable, car on peut l'enfermer dans l'intervalle $[A - 1/100, A + 1/100]$ qui a pour longueur $1/50$ (la longueur de l'intervalle $[a, b]$ des nombres compris entre a et b est $b - a$). En prenant $1/1\,000$ à la place de $1/100$, on enfermerait A dans un intervalle de longueur $1/500$, et finalement, quelle que soit la longueur L positive qu'on se donne, A peut être enfermé dans un intervalle de longueur L : $[A - L/2, A + L/2]$. Un ensemble fini de points, par exemple

$A_1, A_2, \dots, A_i$, est aussi un ensemble négligeable, car on peut enfermer chaque point au centre d'un intervalle de longueur aussi petite que l'on désire, et la longueur totale sera aussi petite qu'on le souhaite.

Et les ensembles infinis ? Prenons un ensemble infini de points numérotés par les nombres entiers $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots$. Un tel ensemble est un ensemble infini dénombrable, et l'on sait que l'ensemble des nombres rationnels est un ensemble infini dénombrable (voir la figure 2). Un tel ensemble est-il négligeable ? Oui ! Voyons pourquoi. Nous allons d'abord enfermer l'ensemble de tous les points A_i dans une suite d'intervalles de longueur totale 2. Pour cela, nous prendrons l'intervalle $[A_0 - 1/2, A_0 + 1/2]$ qui contient A_0 , puis $[A_1 - 1/4, A_1 + 1/4]$ qui contient A_1 , puis $[A_2 - 1/8, A_2 + 1/8]$ qui contient A_2 , etc. La longueur du premier intervalle est 1, la longueur du second est $1/2$, la longueur du troisième est $1/4$, etc. Au total, la longueur cumulée de tous les intervalles qui enferment les A_i est donc $1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + \dots$ somme infinie qui vaut exactement 2. Pour nous persuader que $1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + \dots = 2$, nous calculons : $1 + 1/2 = 2 - 1/2$; $1 + 1/2 + 1/4 = 2 - 1/4$; $1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 = 2 - 1/8$, etc. L'écart avec 2 diminue de plus en plus ; à l'infini, il est nul.

Il est donc possible d'enfermer tout l'ensemble infini des A_i dans une suite d'intervalles de longueur totale 2. Si nous réduisons maintenant la longueur de tous les intervalles d'un facteur 100 avec les points A_i toujours au centre de chacun, la longueur cumulée des intervalles est 100 fois plus petite que précédemment, c'est-à-dire $2/100 = 1/50$. Le procédé de rétrécissement est général, et nous pouvons donc construire une suite d'intervalles qui enfermera tous les A_i et dont la somme des longueurs sera $1/500$, ou $1/500\,000$, ou n'importe quel nombre aussi petit que nous le souhaitons. Cela signifie exactement que l'ensemble infini des A_i est négligeable.

Ce n'est pas troublant si nous pensons par exemple à $A_i = i$, car cela signifie que l'ensemble des nombres entiers est une partie négligeable des nombres réels, ce que notre intuition nous suggérerait déjà. En revanche, le résultat est beaucoup plus troublant quand A_i est l'ensemble des nombres rationnels.

Alors que les nombres rationnels sont partout en nombre infini (entre deux nombres réels, il y a toujours une infinité de nombres rationnels, voir la figure 2b), il est possible de les enfermer tous dans une suite d'intervalles dont la longueur totale est $1/1\,000$. Cela semble paradoxal : l'ensemble des nombres rationnels, quoique infini et partout dense (au voisinage d'un nombre réel, il y a un nombre

2. INFINI DÉNOMBRABLE ET PARTOUT DENSE

(a) L'ensemble des nombres rationnels est dénombrable (c'est-à-dire peut être mis en correspondance terme à terme avec l'ensemble des entiers).

On prend les fractions irréductibles dont la somme du numérateur et du dénominateur fait 2. Il n'y a que $1/1$, on l'associe à l'entier 0. On prend ensuite toutes les fractions irréductibles dont la somme du numérateur et du dénominateur fait 3. Il y a $2/1$ et $1/2$. On les associe à 1 et 2. Etc.

$1/1$	$2/1$	$1/2$	$3/1$	$1/3$	$4/1$	$3/2$	$2/3$	$1/4$
0	1	2	3	4	5	6	7	8

Dans cette liste, tout nombre rationnel positif apparaît. Les nombres rationnels constituent un ensemble infini dénombrable.

En revanche, Cantor a découvert que l'ensemble des nombres réels n'est pas dénombrable : c'est un infini plus gros. Il est impossible de numéroté les réels avec les entiers, comme nous venons de le faire pour les rationnels.

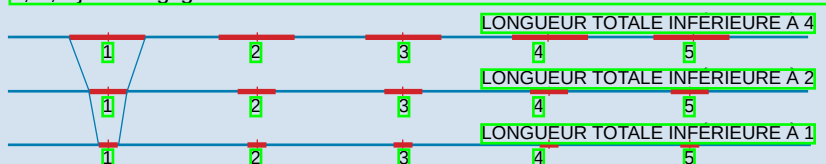
(b) L'ensemble des nombres rationnels est partout dense dans $\mathbb{R}$.

Entre deux nombres réels a, b quelconques, il y a toujours un nombre rationnel. En effet, si a et b sont différents, leurs développements décimaux sont différents à partir d'un certain chiffre, par exemple : $a = 0,183466345\dots$, $b = 0,183472128\dots$. Le rationnel $0,18347 = 18347/100\,000$ est entre a et b .

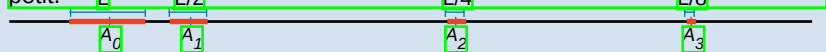
Entre deux nombres réels différents, il y a une infinité de nombres rationnels ; ici, on pourrait prendre $0,18347$; $0,183472$; $0,1834721$; $0,183472128$.

3. ENSEMBLES NEGLIGEABLES

Un ensemble est négligeable si on peut le recouvrir avec des intervalles dont la longueur totale est aussi petite qu'on le veut. Ainsi, l'ensemble $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ est négligeable.



L'ensemble $\mathbb{Q}$ des nombres rationnels est négligeable, car, en utilisant des intervalles de longueur $L/2, L/4, L/8$, etc., on peut enfermer tous les nombres rationnels dans un intervalle de longueur L choisi arbitrairement petit.



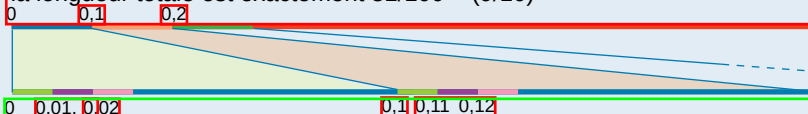
4. ENSEMBLE TRIADIQUE DE CANTOR



L'ensemble triadique de Cantor s'obtient en partant de l'intervalle $[0,1]$ auquel on enlève le tiers médian. On enlève à nouveau le tiers médian à chacun des deux intervalles qui restaient, puis on recommence indéfiniment. Ce qui reste à l'infini est non dénombrable et négligeable. L'ensemble de Cantor est l'ensemble de nombres dont le développement en base 3 ne comporte que des 0 et des 2, comme : $0,02200202200\dots$ (le tiers médian enlevé à la première étape correspond aux nombres dont le premier chiffre est un 1 ; les tiers enlevés à la seconde étape correspondent aux nombres dont le second chiffre est un 1 ; etc.). En associant à ce nombre de l'ensemble triadique de Cantor le nombre réel dont l'écriture en base 2 est $0,0110010101100\dots$ (on a remplacé les 2 par des 1), on définit une correspondance élément par élément entre les réels compris entre 0 et 1 et l'ensemble de Cantor. Ainsi l'ensemble de Cantor n'est pas dénombrable, mais il est négligeable : à l'étape n de sa construction, il peut être enfermé dans un ensemble d'intervalles de longueur totale $(2/3)^n$, quantité qui tend vers 0 quand n tend vers l'infini.

5. UN CAS PARTICULIER DU THÉOREME DE BOREL

Les nombres qui ne sont pas univers forment une partie négligeable. Montrons d'abord que les nombres réels entre 0 et 1 qui n'ont pas de "0" dans leur développement décimal forment un ensemble négligeable. Tous les nombres dont le premier chiffre après la virgule n'est pas "0" constituent exactement l'intervalle $[1/10, 1]$, de longueur totale $9/10$. De la même façon, en découpant l'intervalle $[0, 1]$ en 100 intervalles de longueur $1/100$ correspondant aux nombres commençant par 0,00 0,01 0,02 ... 0,99, on voit que les nombres qui n'ont de 0 ni en première position ni en seconde position constituent un ensemble d'intervalles dont la longueur totale est exactement $81/100 = (9/10)^2$



De la même façon, en découpant en petits intervalles, on voit que les nombres n'ayant de "0" dans aucune des positions $1, 2, \dots, m$, après la virgule, constituent des intervalles dont la longueur totale est $(9/10)^m$. Cela montre que les nombres entre 0 et 1 n'ayant pas de "0" dans leur développement décimal forment un ensemble négligeable. Il en va de même pour les nombres n'ayant pas de "1", etc., ou n'ayant pas la séquence "123" ou "1998", etc. (utiliser le même raisonnement avec la base 100, 1 000 etc., avec $x, 10x, 100x$, etc.). Comme une réunion dénombrable d'ensembles négligeables l'est aussi, on voit que les nombres qui ne sont pas univers constituent un ensemble négligeable.

rationnel aussi proche qu'on le désire) serait négligeable! Dur à avaler!

L'explication de cette apparente difficulté n'est-elle pas que la notion mathématique d'ensemble négligeable est mal formulée et qu'on peut démontrer de n'importe ensemble qu'il est négligeable?

Non. Il existe des ensembles qui ne sont pas négligeables, par exemple l'intervalle $[-1, +1]$ (ou n'importe quel intervalle $[a, b]$ avec a inférieur à b). Si vous recouvrez les points de $[-1, +1]$ par une suite d'intervalles, comme nous l'avons fait pour l'ensemble des A_n , alors vous

découvrirez toujours que la longueur cumulée des intervalles utilisés dépasse 2 : l'intervalle $[-1, +1]$ n'est pas négligeable.

Plus on l'étudie, plus on l'aime! La définition mathématique d'ensemble négligeable formalise notre notion intuitive d'ensemble de peu d'importance. La situation est caractéristique d'un progrès scientifique : notre intuition est confirmée sur les ensembles finis (ces ensembles sont négligeables) et sur l'ensemble constitué par l'intervalle $[-1, +1]$ (cet ensemble n'est pas négligeable). Appliquée à d'autres ensembles (comme celui

des rationnels), la conclusion étonne dans un premier temps, mais n'amène aucune véritable difficulté.

L'adoption de la définition formelle d'ensembles négligeables est maintenant universelle et ne choque plus. Les fonctions continues, mais n'ayant de dérivée en aucun point (qui résultent aussi des progrès de notre compréhension du continu), contredisaient aussi nos intuitions initiales, et pourtant elles ont perdu tout pouvoir scandaleux aujourd'hui.

L'étude des ensembles négligeables conduit à quelques propriétés attendues et inattendues. Un sous-ensemble d'un ensemble négligeable est négligeable. La réunion de deux ensembles négligeables l'est encore. Le complémentaire d'un ensemble négligeable ne l'est jamais et est partout dense ; ce dernier résultat correspond à l'idée naturelle que, si l'on enlève un ensemble négligeable à l'ensemble des réels, on obtient quelque chose qui est presque tout. Plus étonnante est la propriété que la réunion d'une infinité numérotée $E_0, E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$ d'ensembles négligeables est un ensemble négligeable : nous verrons plus loin qu'elle a des conséquences remarquables.

La notion d'ensemble négligeable ne coïncide pas exactement avec la notion d'ensemble «fini ou infini dénombrable» élaborée à la même époque par Cantor. Le monde des nombres est plus subtil : certains ensembles infinis non dénombrables (donc déjà assez gros) sont négligeables. Le plus célèbre ensemble non dénombrable négligeable est l'ensemble triadique de Cantor, qui est l'ensemble des nombres réels compris entre 0 et 1 dont l'écriture en base 3 peut se faire sans utiliser le 1 (voir la figure 4). Avec le résultat de Borel, nous allons rencontrer bien d'autres ensembles infinis non dénombrables négligeables.

UN NOMBRE EST PRESQUE CERTAINEMENT ÉTONNANT!

Un nombre réel est un nombre normal en base 10 si, dans son développement en base 10 : les 10 chiffres apparaissent en proportion équilibrée (10 pour cent de chaque) ; les 100 paires possibles de chiffres (00, 01, 02, 99) apparaissent aussi en proportion équilibrée (chacune apparaît avec la fréquence de 1 pour cent) ; les 1 000 triplets de chiffres (000, 001, 999) apparaissent en proportion équilibrée (chacun apparaît avec une fréquence de 0,1 pour cent) ; etc.

Un résultat, démontré par Émile Borel en 1909, nous conduit au bord du paradoxe : l'ensemble des nombres réels qui ne sont pas normaux en base 10 est négligeable (quoique aussi non dénombrable).

5. LE NOMBRE DE CHAMPERNOWNE EN DIVERSES BASES

SUR 1 000 CHIFFRES

BASE 2 : CH = 0,0001111110011010110111010011011...

NOMBRE DE 0 : 499

NOMBRE DE 1 : 499

BASE 3 : CH = 0,0100222222222222121022021000022...

NOMBRE DE 0 : 339

NOMBRE DE 1 : 326

NOMBRE DE 2 : 335

BASE 4 : CH = 0,0133212231310313222020333220013001222120332...

NOMBRE DE 0 : 246

NOMBRE DE 1 : 247

NOMBRE DE 2 : 261

NOMBRE DE 3 : 246

BASE 5 : CH = 0,0302040012323112114114102121314414423002412...

NOMBRE DE 0 : 217

NOMBRE DE 1 : 204

NOMBRE DE 2 : 183

NOMBRE DE 3 : 192

NOMBRE DE 4 : 204

BASE 10 : CH = 0,123456789101112131415...

0 : 66

1 : 177

2 : 177

3 : 148

4 : 77

5 : 77

6 : 77

7 : 67

8 : 67

9 : 67

Le nombre de Champernowne, constitué par la suite des entiers, est "par construction" normal en base 10 et, selon Borel, il est presque certainement normal dans toutes les bases. On le vérifie sur les fréquences en base 1, 2, 3, 4, 5 et 10 où, bien que prouvée, l'égalisation est moins apparente.

Assez naturellement, on dit d'une propriété qui est vérifiée pour tout nombre réel, sauf pour ceux appartenant à un ensemble négligeable, qu'elle est *presque certaine*, et donc que le résultat de Borel peut s'exprimer en huit mots : être normal en base 10 est presque certain.

Une interprétation probabiliste du résultat de Borel est possible : en tirant au hasard les décimales d'un nombre réel avec un système équitable (qui ne favorise aucun chiffre), on obtient un nombre normal en base 10, avec une probabilité de 100 pour cent. Les versions probabilistes ou topologiques du résultat de Borel sont profondément surprenantes : être normal est une propriété tellement forte (pour être normal, il faut se soumettre simultanément à une infinité de contraintes) qu'on reste interloqué du résultat de Borel : tous les nombres réels, sauf une partie négligeable d'entre eux, satisfont cette infinité de contraintes que le hasard produit avec certitude ! La version topologique possède l'avantage de ne pas faire appel à l'idée irréaliste d'une série infinie de tirages au sort.

Il résulte du théorème de Borel que la propriété être équiréparti en base 10 (avoir autant de 0 que de 1, que de 9 dans son développement décimal) est presque certaine. De même encore, être un nombre-univers en base 10 (posséder un développement décimal qui contient toutes les séquences finies possibles de chiffres) est une propriété presque certaine.

Quand on change de base de numération, les résultats précédents restent vrais, et donc «être normal en base 2», «être normal en base 3», etc., sont toutes des propriétés presque certaines. Le fait évoqué plus haut qu'une réunion dénombrable d'ensembles négligeables est encore un ensemble négligeable se traduit en la propriété que la conjonction d'une infinité dénombrable de propriétés presque certaines l'est aussi. Les propriétés «être normal dans toutes les bases de numération simultanément», «être univers dans toutes les bases simultanément» ou «être équiréparti dans toutes les bases simultanément» sont donc presque certaines.

Mis sous cette forme ultime, le résultat de Borel dépasse les bornes du raisonnable. En effet, alors qu'on connaît des nombres normaux en base 10 comme le nombre de Champernowne 0,123456789101112... (voir *Champernowne et quelques autres*, par Jean-Paul Delahaye, *Pour la Science*, décembre 1998), on ne connaît de manière explicite aucun nombre normal en toute base.

PRESQUE PARTOUT, MAIS INTROUVABLE!

Si ce n'est pas un paradoxe, cela y ressemble : bien qu'un nombre soit presque certainement normal en toute base simultanément, on ne sait définir de manière explicite aucun nombre dont on puisse prouver qu'il est normal en toute base : les nombres normaux en toute base sont tout (à un ensemble négligeable près), mais on n'en a aucun !

Le seul début d'exception est fourni par la théorie algorithmique de l'information, qui permet de définir un nombre nor-

mal en toute base (le nombre Oméga de Chaitin), mais dont il est impossible de connaître les décimales. Ce nombre n'est pas donné par une méthode qui en permette le calcul et ne peut donc pas satisfaire notre désir de connaître vraiment un nombre normal en toute base (on peut d'ailleurs s'interroger sur la réalité de nombres, comme le nombre Oméga, mathématiquement bien définis, mais dont les décimales sont par principe incalculables).

Le mathématicien, en étudiant sur un plan abstrait l'existence des nombres normaux, prouve de façon parfaitement rigoureuse que les nombres normaux dans toute base sont infiniment majoritaires ; pourtant, le mathématicien ne réussit pas même à en expliciter un seul !

VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES

On pourrait en conséquence avoir des doutes concernant le sens de ce que démontrent les mathématiciens. D'où l'idée de tester expérimentalement, pour des nombres particuliers, ce que le résultat de Borel énonce sur un plan général. Si nous prenons un nombre au hasard sans tricher, c'est-à-dire sans en fixer nous-mêmes les chiffres (directement ou indirectement) par une règle artificielle, comme nous le faisons quand nous définissons le nombre de Champernowne, nous devrions tomber sur un nombre normal en base 10, et en n'importe quelle base. C'est effectivement ce que nous constatons, par exemple avec $\sqrt{2}$, avec π , avec e , etc. Tous ces nombres sont expérimentalement des nombres normaux en toute base.

Le théorème de Borel suggère aussi qu'en prenant un nombre artificiel en base 10, comme le nombre de Champernowne et en l'écrivant en base 2, ou 3, etc., on trouvera un nombre normal en base 2 ou 3, etc. De même, en prenant un nombre artificiel non normal en base 10 (comme le nombre de Liouville $L = 0,1100010$, des 1 en position $1!, 2!, 3!, \dots$), il sera normal une fois écrit en base 2, 3, etc. Sauf exception conçue exprès, quelle que soit la base B choisie et quel que soit le nombre x choisi, on s'attend à ce que x soit normal en base B .

Il faut être attentif aux exceptions, car certaines relations parfaitement connues font qu'un nombre défini pour n'être pas normal en une certaine base ne le sera pas dans une autre. Wolfgang Schmidt a par exemple montré que tout nombre non normal en base n ne le sera pas en base m s'il existe i et j vérifiant que $n^i = m^j$. À condition de tenir compte de ces exceptions faciles à contrôler, nous devons nous attendre à ne rencontrer que des nombres normaux en toute base. Cela nous conduit à formuler le principe abstrait suivant, que je propose de dénommer l'heuristique de Borel :

«Quand on considère un nombre et qu'on l'écrit en une base B , à moins qu'il n'ait été défini par une règle qui en fixe les chiffres en cette base-là, et qui

en empêche exprès la normalité, on obtiendra toujours un nombre normal en base B (et donc équiréparti en base B, et univers en base B).»

En particulier, tout nombre irrationnel algébrique (solution d'une équation polynomiale à coefficients entiers) doit être normal en toute base. Toute constante comme π , e , $\log(3)$ doit être normale en toute base. Tout nombre possédant une expression algébrique simple composée avec ces nombres (par exemple, $e + \pi$, $99 \pi / \log(3)$, $\log(\pi)$, etc., doit être normal en toute base.

Le «doit» de la phrase précédente est très étrange, et cette formulation ne peut que déplaire au mathématicien traditionnel. Ceux que je dépeins par «mathématiciens traditionnels» ne tiennent compte que des vérités démontrées. Or l'écart entre ce que donne l'heuristique de Borel et ce que donne la connaissance mathématique (c'est-à-dire ce qui est démontré) est le plus grand possible : personne ne sait RIEN prouver de ce qu'indique l'heuristique de Borel (pourtant vérifiée numériquement à chaque fois qu'on le tente et pourtant démontrée globalement par Borel il y a presque 100 ans).

La figure 6 indique les développements du nombre de Champernowne en diverses bases ; d'autres expérimentations, faites ces dernières années sur des millions de décimales, confirment aussi l'heuristique de Borel. Une étude de S. Pincus et R. Kalman en 1997 fait exception et prétend détecter des différences subtiles entre les décimales des divers nombres irrationnels qui pourraient peut-être agir sur la normalité. Cette étude doit être éclaircie.

Ces mathématiques qui suggèrent des théorèmes généraux que jamais personne n'arrive à prouver dans aucun cas particulier ne sont-elles pas étranges ? Comment corriger cette anomalie des nombres partout présents, mais introuvables ? Comment arranger les mathématiques pour éviter qu'elles n'autorisent des démonstrations globales ne se traduisant jamais en cas précis ?

QUELS REMÈDES ?

Lorsque l'écart est si grand entre, d'une part, ce qu'on voit expérimentalement ou par le raisonnement global et, d'autre part, ce qu'on réussit à prouver en particulier, il est temps d'être inquiet (comme un physicien le serait si on lui présentait une théorie qui prouverait l'existence de particules partout présentes, mais dont il ne verrait jamais aucune preuve manifeste). L'heuristique de Borel ne crée pas de contradiction explicite, mais la situation est rationnellement insatisfaisante et pourrait signaler un défaut majeur de nos conceptions. Si nous réussissons un jour à trouver des nombres dont nous

8. PROPRIÉTÉS "VRAIES ET FAUSSES"

Si une propriété est vérifiée pour tout nombre, sauf ceux appartenant à un ensemble négligeable, elle est presque certaine (ou presque certainement vraie). Si les nombres qui vérifient la propriété constituent un ensemble négligeable, la propriété est presque certainement fausse.

Propriétés "vraies" :

- être équiréparti en base B,
- être univers en base B,
- être normal en base B,
- être équiréparti en toute base,
- être univers en toute base,
- être normal en toute base,

Propriétés "fausses" :

- être rationnel,
- être algébrique,
- ne pas utiliser de "0" dans son développement décimal.
- appartenir à l'ensemble de Cantor,
- avoir une suite de chiffres programmable par algorithme.
- être définissable dans le système mathématique de la théorie des ensembles.

prouvions qu'ils sont normaux en toute base, ce sera parfait. Nous aurons comblé le trou entre propriétés générales et propriétés particulières. Le quasi-paradoxe sera résolu sans que nous ayons rien à changer dans notre conception, et notre inconfort actuel n'aura été que temporaire et sans signification.

L'attente a déjà été longue, et il est devenu légitime de s'interroger sur la nature de ce quasi-paradoxe : n'appelle-t-il pas une réforme dans notre vision des mathématiques ? Le continu du mathématicien n'est pas celui du physicien, car ce dernier n'accorde aucun sens à l'affirmation qu'il y a une infinité non dénombrable d'instantanés dans une seconde. La méfiance implicite du physicien n'est-elle pas justifiée ?

Puisque le continu du mathématicien se fonde sur la théorie des ensembles (car le continu se construit à partir des opérations de la théorie des ensembles prise comme allant de soi), peut-être faut-il renoncer à la théorie des ensembles ou la réformer ? C'est ce point qu'étudient certains logiciens, comme T. E. Forster, de l'Université de Cambridge, qui formule des théories des ensembles avec l'ensemble de tous les ensembles (dans la théorie usuelle de Cantor, il n'y a pas d'ensemble de tous les ensembles), ou comme E. Nelson, qui propose une théorie dite non standard (à la base d'une conception des infiniment petits), ou comme J. Barwise, qui défend une théorie des hyper-ensembles (permettant l'étude des paradoxes liés aux autoréférences). D'autres encore proposent de

nouveaux axiomes (par exemple portant sur les grands ensembles) : ces nouveaux axiomes, en augmentant le pouvoir de preuve des mathématiques, permettront peut-être de démontrer ces propriétés de normalité.

A l'opposé de ces voies tentant de rendre plus puissante la théorie des ensembles, d'autres recherches remettent en cause la logique usuelle. Les mathématiciens intuitionnistes et constructivistes espèrent, par des raisonnements plus exigeants, conjurer les quasi-paradoxes de l'existence (comme celui résultant de l'heuristique de Borel) et pour cela refusent par principe qu'une démonstration puisse aboutir à un énoncé d'existence («il existe un objet vérifiant telle propriété») sans qu'elle soit accompagnée d'une méthode de construction de l'objet en question. Leurs méthodes sont malheureusement restrictives et compliquent le développement de l'analyse.

On le voit, les nombres normaux, les nombres-univers, les ensembles négligeables et l'heuristique de Borel conduisent à des interrogations sur la nature profonde des mathématiques. Même si beaucoup de mathématiciens refusent de considérer les solutions alternatives avec sérieux et préfèrent attendre sans changer le monde ensembliste adopté au début du xx^e siècle, rien n'assure qu'ils ont raison et que les difficultés du monde ensembliste classique ne resurgiront pas plus gravement encore à l'occasion d'un autre problème.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille. e-mail : delahaye@lil.fr

E. BOREL, *Presque tous les nombres réels sont normaux*, Rend. Circ. Mat. Palermo, 27, pp. 247-271, 1909.

J. BARWISE et L. MOSS, *Vicious Circles*, CSLI Publications, Stanford, Californie, 1996.

J. BORWEIN et P. BORWEIN, *Making Sense of Experimental Mathematics*, CECM, Simon Fraser University, Canada, 1996.

D. CHAMPERNOWNE, *The Construction of Decimal Normal in the Scale of Ten*, in J. London Math. Soc. 8. pp. 254-260, 1933.

J.-P. DELAHAYE, *Le fascinant nombre π* , Éditions Pour La Science-Belin, 1997.

T. FORSTER, *Set Theory with Universal Set*, Oxford Science Publications, Clarendon Press, 1995.

V. KLEE et S. WAGON, *Old and New Unsolved Problems in Plane Geometry and Number Theory*, Mathematical Association of America, Dolciani Mathematical Expositions, n° 11, 1993.

W. SCHMIDT, *On Normal Numbers*, in Pacific Journal of Mathematics, 10, p. 3, 1960.



ROBERT HASS / J. HASS

Bulles de savants

IAN STEWART

A propos de films où les mousses coincent la bulle.

Première devinette : quel solide possède 20 sommets, 30 arêtes et 12 faces, chacune ayant 5 côtés ? Le dodécaèdre. Seconde devinette : quel solide a 22,9 sommets, 34,14 arêtes et 13,39 faces, chacune de 5,103 côtés ? Vous pensez peut-être à un fractal tarabiscoté ? Ce n'est pas la bonne piste : le solide est familier. Recherchez-le en buvant un verre de bière, en prenant une douche ou en faisant la vaisselle.

Même avec ces indications, vous aurez du mal à deviner, car la question était biaisée : le solide en question n'a les propriétés annoncées qu'en moyenne et, de surcroît, ce n'est pas un vrai solide. C'est la mousse, qui est composée de myriades de bulles, lesquelles sont de minuscules polyèdres irréguliers. En moyenne, les bulles d'une mousse ont 22,9 sommets, 34,14 arêtes et 13,39 faces. Une bulle moyenne ressemblerait à un «tridéca-et-des-poussières-èdre».

Les mathématiques des bulles et de la mousse sont nées dans les années 1830, bien après l'invention du savon, lorsque le physicien belge Joseph Plateau plongea des cadres en fils de fer dans de l'eau savonneuse. Malgré 170 années de recherches, on ne comprend pas plusieurs des phénomènes observés par Plateau.

Par exemple, personne n'a démontré la conjecture de la double bulle, qui

stipule que la forme adoptée par deux bulles adjacentes est composée de trois surfaces sphériques (voir la figure 3). En 1995, Joel Hass, de l'Université de Californie, et Roger Schlafly, de la Société Real Software, ont démontré cette conjecture pour deux bulles de même volume.

LES SURFACES MINIMALES

En 1829, Plateau se brûla les yeux alors qu'il observait le Soleil à l'œil nu pendant 25 secondes. Il en resta aveugle, mais continua de contribuer toute sa vie à ce domaine des mathématiques éminemment visuel : la géométrie dans l'espace.

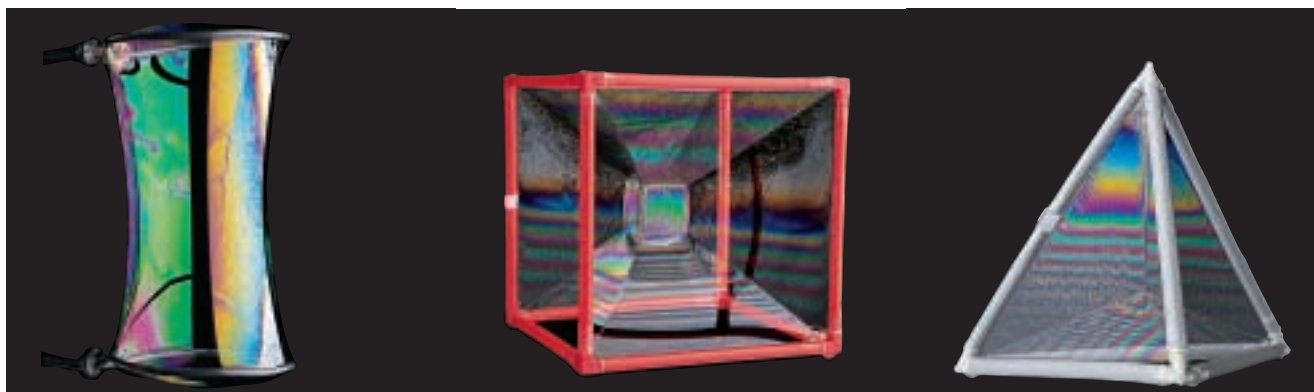
Les bulles et les films de savon appartiennent à la famille mathématique très étudiée des surfaces minimales : des surfaces répondant à certaines contraintes et dont l'aire est minimale. Cette minimisation de l'aire découle du principe universel de minimisation de l'énergie. Puisque l'énergie de tension d'un film de savon est proportionnelle à sa surface, l'énergie des bulles est minimale quand l'aire l'est.

Un film de savon à l'équilibre est comparable à une surface mathématique d'épaisseur nulle : son épaisseur, de l'ordre de un milliardième de mètre, est négligeable. Sans aucune contrainte, une bulle de savon évolue jusqu'à ce que son

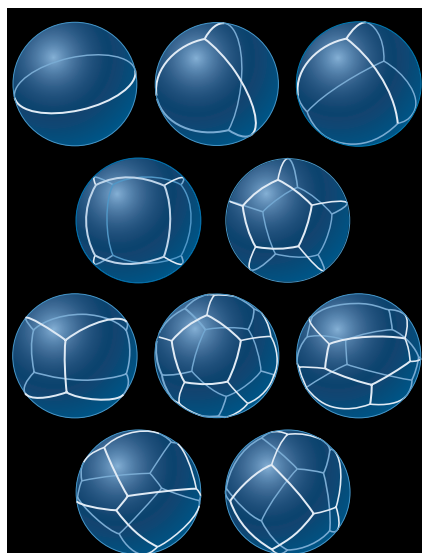
aire soit nulle, mais on leur impose généralement de contenir un volume précis ou d'avoir leur frontière sur une certaine surface ou sur une certaine courbe. Par exemple, une bulle qui se pose sur une table est une demi-sphère : c'est la plus petite surface entourant un volume donné (l'air emprisonné dans la bulle) et ayant sa frontière sur un plan.

Plateau s'est intéressé aux surfaces dont la frontière est une courbe imposée. Il matérialisait les courbes par un fil ou par plusieurs fils soutenus par un cadre. Par exemple, quelle est la surface minimale dont la frontière est formée de deux cercles parallèles, de même rayon ? Le mathématicien suisse Leonhard Euler, le «prince des mathématiques», démontra que la véritable surface minimale ayant une telle frontière n'est pas un cylindre, mais un caténoïde, formé par rotation d'une courbe en U, nommée chaînette, autour de la droite passant par les deux centres des cercles.

La chaînette est la courbe que prend naturellement une chaîne homogène pendue à deux crochets (ici à la même hauteur). Elle ressemble à une parabole avec un rien d'embonpoint près du sommet. Deux fils de fer circulaires plongés dans de l'eau savonneuse illustrent le théorème d'Euler en faisant apparaître le caténoïde dans toute sa splendeur (voir la figure 1).



1. Les films de savon forment toujours des surfaces d'aire minimale. Par exemple, le film de savon s'appuyant sur deux cercles de même axe (à gauche) a une forme de caténoïde. Sur un cadre cubique (au milieu) ou tétraédrique (à droite), des films de savon forment des surfaces quasi planes dont les intersections forment des angles précis.



2. Les règles de Plateau pour les angles formés par les arêtes de bulles adjacentes limitent à dix le nombre d'arrangements possibles. Les sommets sont entourés d'une sphère sur laquelle les faces se coupent à 120 degrés. Parmi les dix formes qui répondent à ce critère, seulement les trois premières sont physiquement possibles, car elles correspondent à des aires minimales.

MATHS COURANT

Richard Courant et Herbert Robbins, pour leur livre *What Is Mathematics ?*, ont effectué certaines des expériences originelles de Plateau en plongeant des polyèdres réguliers en fils dans de l'eau savonneuse. Le cas le plus simple, totalement expliqué, est celui du tétraèdre régulier (quatre faces triangulaires et six arêtes égales), où la surface minimale est la réunion de six triangles qui se rencontrent au centre du tétraèdre (voir la figure 1). Le long des lignes joignant les sommets au centre, les films se rencontrent par trois, formant des angles de 120 degrés entre les faces ; au centre, quatre arêtes font deux à deux des angles de 109 degrés 28 minutes. Ces deux valeurs cruciales interviennent chaque fois que plusieurs films de savon sont en contact et qu'il n'y a pas d'air emprisonné ou que les pressions de part et d'autre de chaque film sont égales et, donc, se neutralisent.

Le solide le plus simple après le tétraèdre est le cube. Il conduit à un arrangement, plus complexe, de 13 surfaces presque planes dont l'analyse est inachevée (voir la figure 1).

Dans une mousse, les films sont faiblement courbés, et sont donc assimilés à des faces planes. Cette approximation n'est plus valable pour les films proches de la surface externe de la mousse. Cette limite explique les étranges valeurs citées au début de cet article.

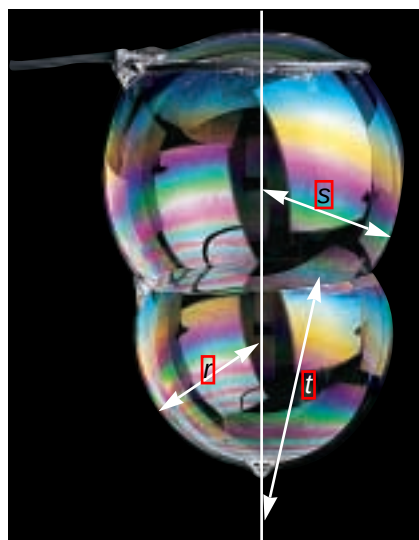
On estime les nombres moyens de sommets, d'arêtes et de faces de toute mousse en admettant que la mousse est constituée d'un grand nombre de polyèdres identiques dont les faces sont des polygones réguliers.

La découverte de l'angle de 120 degrés est souvent attribuée au géomètre Jacob Steiner, en 1837. Cependant, Steiner avait été devancé de deux siècles par Evangelista Torricelli et Francesco Cavalieri. Vers 1640, ces mathématiciens cherchaient le point de l'intérieur d'un triangle donné dont la somme de ses distances aux trois sommets est la plus petite possible. Ils avaient démontré que, lorsque aucun angle n'est supérieur à 120 degrés, c'est le point qui voit les trois côtés sous un angle de 120 degrés. Si l'un des angles du triangle est supérieur à 120 degrés, le point est son sommet. Le problème des films de savon est similaire à celui des triangles.

LES BULLES ET LES SPHÈRES

En 1976, Frederick Almgren, de l'Université de Princeton, et Jean Taylor, de l'Institut de technologie du Massachusetts, ont démontré la seconde valeur (109 degrés 28 minutes) observée par Plateau. Ils ont d'abord considéré les sommets où six faces se croisent le long de quatre arêtes communes – par exemple, les six triangles formés dans un tétraèdre (voir la figure 1). Ils ont montré que les légères courbures observées sur les films de savon sont négligeables. Puis, afin de transformer un problème tridimensionnel à un problème plus simple, ils ont imaginé une petite sphère englobant un ou plusieurs sommets de ce type – par exemple le centre du tétraèdre – et ils ont déterminé les intersections de cette sphère avec les «quasi-plans» des faces. Les films de savon matérialisant une surface minimale, les arcs obtenus sont des «courbes minimales» : leurs longueurs totales sont aussi petites que possible. Par l'analogie sphérique du théorème de Torricelli-Cavalieri, ces arcs doivent toujours se couper suivant des angles de 120 degrés.

F. Almgren et J. Taylor ont prouvé qu'il y a exactement dix configurations distinctes d'arcs (voir la figure 2) satisfaisant ce critère. Ils ont ensuite essayé de diminuer l'aire totale des films à l'intérieur de la boule, en introduisant éventuellement de nouveaux morceaux de film. Quand ils parvenaient à réduire la surface, ils éliminaient le cas considéré, car il ne correspondait pas à une véritable surface minimale. Seules les conformations observées par Plateau ont



3. Les rayons r et s de deux bulles adjacentes et le rayon t de la surface de séparation vérifient la relation simple : $1/r = 1/s + 1/t$.

survécu à ce traitement (les trois premières de la figure 2) : un unique film sur le plan équatorial de la sphère, trois intersections le long de l'axe de la sphère et formant entre eux des angles de 120 degrés, ou six intersections à 109 degrés 28 minutes identiques à celles rencontrées dans le tétraèdre.

La règle des 120 degrés mène à une jolie propriété pour deux bulles adjacentes. Si la conjecture de la double bulle est exacte (voir la figure 3), les trois rayons vérifient une relation simple que l'on confirme expérimentalement. Si r et s sont les rayons des deux bulles, r étant celui de la plus petite et si t est le rayon de la surface séparatrice, alors : $1/r = 1/s + 1/t$.

En 1995, J. Hass et R. Schlafly ont montré que, dans l'hypothèse où les deux bulles sont de même volume, les surfaces sont des parties de sphère. Ils ont utilisé un ordinateur qui a calculé en 20 minutes, 200 260 opérations associées à des possibilités concurrentes.

Dans le cas des volumes inégaux, quelle que soit la configuration minimale de la double bulle, elle doit être une surface de révolution. Le problème se ramène donc à l'étude d'une famille de courbes dans un même plan. Cependant, la réponse reste encore aussi insaisissable que lorsque Plateau, presque aveugle, plongeait ses premières structures en fils dans un récipient d'eau savonneuse.

Stefan HILDEBRANDT et Anthony TROMBA, Mathématiques et formes optimales, Éditions Pour la Science / Belin, 1998.



L'anagyre

JANICK SIMERAY

Des pierres rebelles dont le sens de rotation change sans raison apparente. Une théorie complète du mouvement reste à faire.

Dans les années 1970, en faisant tourner négligemment des pierres de haches sur une table, des archéologues remarquent que celles-ci s'arrêtent de tourner, puis repartent en sens inverse. Depuis cette redécouverte des propriétés de ce qu'on nomme anagyre, objet déjà connu au siècle dernier, les scientifiques se sont évertués à expliquer ce mouvement qui semblait défier les lois de la mécanique. L'analyse qualitative du comportement des anagyres a été établie dès 1896, mais l'analyse quantitative est plus délicate : elle nécessite de prendre en compte le glissement et la dissipation par les frottements.

L'anagyre que nous examinerons est un ellipsoïde aplati, une sorte de ballon de rugby écrasé. Posons-le sur une table, et faisons-le tourner. Lancé dans un sens, l'anagyre fait quelques tours, s'arrête rapidement en oscillant d'avant en arrière selon la plus grande longueur, puis repart en sens inverse. Lancé dans l'autre sens, il tourne longtemps avant d'osciller longitudinalement (oscillation de roulis), alors qu'il est proche de l'arrêt. Parfois, il repart également en sens inverse avant de s'arrêter complètement. Certains anagyres font même plusieurs inversions avant de s'immobiliser (voir la figure 1). Ainsi, les anagyres ont un sens de rotation privilégié.

Comment la table peut-elle transmettre à cet objet, symétrique en apparence, un mouvement de rotation inverse, alors qu'il n'y a entre eux qu'un seul point de contact ? Le comportement paradoxal de l'anagyre laisse croire qu'il viole les lois de la mécanique. C'est une illusion.

Première constatation expérimentale : les inversions dépendent des frottements. Avec un anagyre donné, selon la surface utilisée pour l'expérience, on observe plus ou moins bien les différentes inversions. Si l'inversion principale, consécutive à l'oscillation d'avant en arrière est toujours observée, l'inversion secondaire, consécutive à l'oscillation de roulis, l'est plus rarement.

Le secret de l'anagyre réside dans la distribution de sa masse interne. Dans l'anagyre, la répartition des masses diffère pour les deux axes de symétrie horizontaux de l'ellipsoïde. Pour notre anagyre, cette répartition s'obtient en évitant de manière dissymétrique des parties internes de l'objet (voir la figure 2). On trouve également des anagyres aux formes asymétriques : la répartition asymétrique de la masse est alors immédiatement visible.

Nommons a et b les deux axes horizontaux de l'ellipsoïde. La fonction caractéristique de cette répartition est appelée le moment d'inertie. Lorsque l'anagyre oscille verticalement autour de l'axe b , par exemple, comme c'est le cas juste avant l'inversion principale, le moment d'inertie mis en jeu est relativement important, car les masses

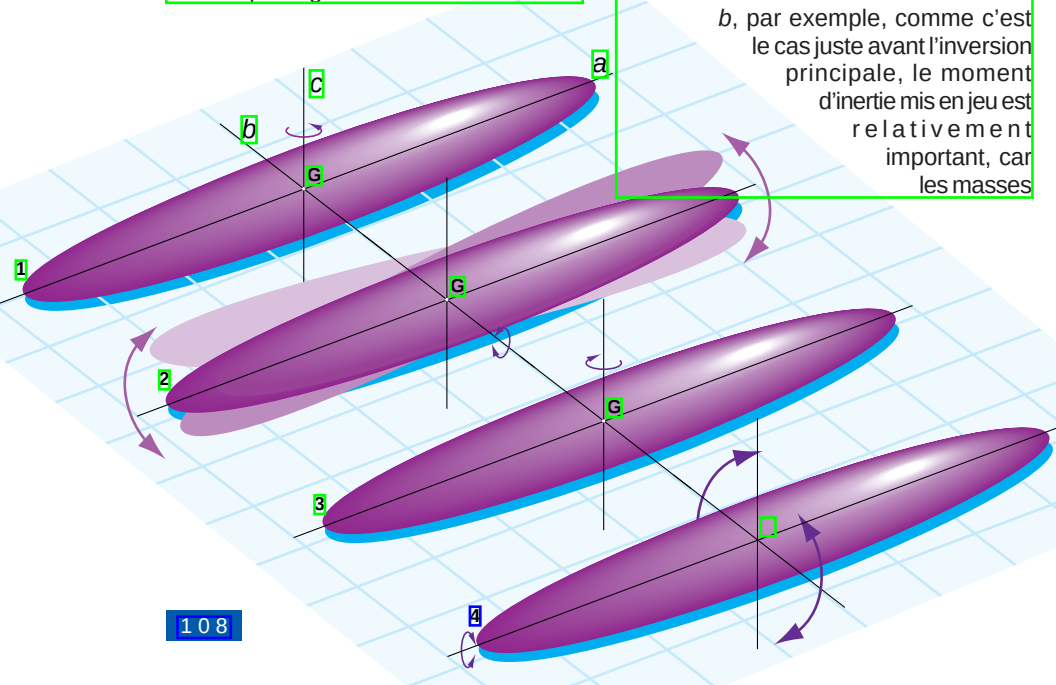
se trouvent assez loin de l'axe. En revanche, lorsque l'anagyre oscille autour de l'axe a , comme il le fait lors d'une inversion secondaire, le moment d'inertie qui intervient est inférieur, car la majeure partie de la masse se trouve proche de l'axe. Cette différence entre les deux moments d'inertie par rapport aux axes principaux détermine le fonctionnement de l'anagyre.

CHANGEMENT DE CAP

De quelle façon ces caractéristiques déclenchent-elles une inversion du sens de rotation ? On rend l'anagyre instable pour des petites perturbations de la rotation autour de l'axe vertical. Si l'anagyre était sphérique ou si la répartition des masses était symétrique par rapport aux axes horizontaux de l'ellipsoïde, une petite perturbation n'aurait que peu d'effets sur la rotation et n'entraînerait pas d'oscillations notables. En revanche, avec une répartition convenable des masses, de petites oscillations, résultant du mouvement de rotation initial de l'objet ou d'irrégularités de la surface de la table, engendrent des oscillations dont l'amplitude croît rapidement. La nature des instabilités qui jouent sur l'anagyre dépend du sens de rotation et de la répartition des masses.

Lançons l'anagyre dans un sens. En raison de la répartition des masses, toute perturbation qui engendre une oscillation autour de l'axe b sera rapidement amplifiée. Les forces de frottement qui agissent sur l'anagyre durant l'oscillation arrêtent la rotation et en déclenchent une autre en sens contraire. Lorsque ce changement de sens est amorcé,

1. Le mouvement d'un anagyre comporte plusieurs phases. Lancé dans le sens antihoraire (1), il se met à osciller rapidement autour de l'axe b (2), après quoi la rotation s'inverse et il tourne dans le sens horaire (3). Après plusieurs tours, cette rotation engendre des oscillations de roulis, autour de l'axe a (4), puis le cycle recommence. En pratique, le nombre d'inversions que l'on peut observer dépend des caractéristiques de l'anagyre et des frottements.



les forces de frottement tendent à empêcher l'oscillation. Ainsi, une rotation dans un sens initial permet aux oscillations autour de l'axe b de s'amplifier rapidement. Ensuite, les forces de frottement qui accompagnent ces oscillations inversent le sens de rotation.

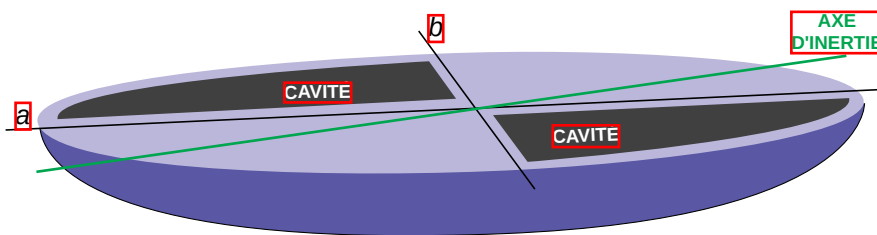
Si la pierre est lancée initialement dans le sens inverse (ou si l'on retourne l'anagyre et qu'on le lance dans le même sens, ce qui revient au même), c'est une autre instabilité qui est favorisée : celle qui accroît les oscillations autour de l'autre axe principal, l'axe a . Cette fois encore, en raison de la répartition des masses, l'amplitude de cette instabilité croît rapidement, et les forces de frottement qui agissent pendant ces oscillations arrêtent le mouvement giratoire et l'inversent. Si cette inversion est moins marquée que l'inversion précédente, c'est que le moment d'inertie associé à l'oscillation de roulis est inférieur.

Ainsi, l'énergie cinétique de rotation de départ diminue au profit de l'énergie potentielle d'oscillation, qui est ensuite convertie à nouveau en énergie cinétique de rotation. Théoriquement, si l'énergie n'était pas dissipée, on pourrait observer une infinité de rotations. En pratique, il existe des anagyres en forme de demi-œuf qui effectuent plus d'une dizaine d'inversions avant de s'arrêter.

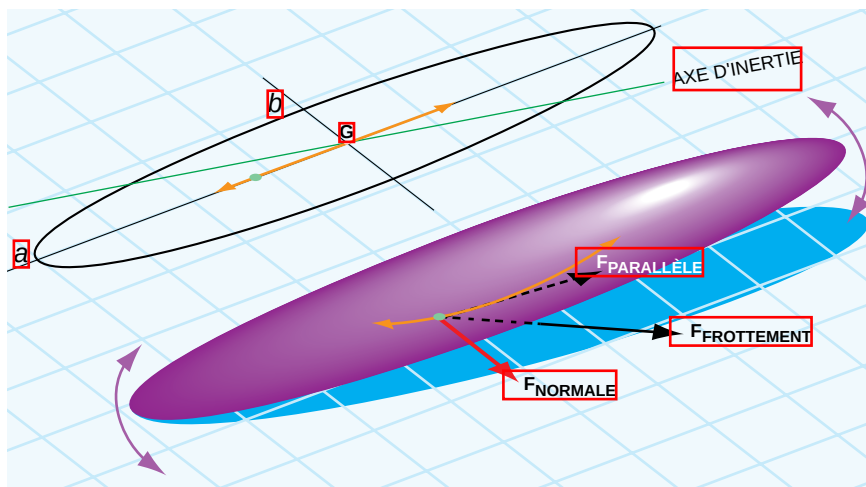
Une autre manière de comprendre l'inversion est de considérer les forces de frottement. Partons de l'oscillation principale d'avant en arrière qui fait suite à une rotation (voir la figure 3). Lorsque l'anagyre oscille de bas en haut, le point de contact entre l'anagyre et la table se déplace sur un segment. En chaque point du segment, la table exerce sur l'anagyre une force de frottement (une réaction) qui prévient le glissement. L'une des composantes de cette force tend à faire tourner l'anagyre autour de son axe vertical dans un sens donné : on dit que cette force engendre un moment par rapport au centre de gravité.

Pour compliquer le tout, le point de contact se déplace. La force change en permanence et le moment exercé par cette force change également. Le moment résultant qui s'exerce sur l'objet durant une oscillation est la moyenne des moments qui s'exercent au cours de l'oscillation. Lorsque l'on calcule cette moyenne, on obtient un moment résultant. Ainsi, par impulsions successives, l'anagyre se met à tourner dans le sens dicté par ce moment. Pour le vérifier, il suffit d'appuyer sur un bout de l'anagyre et de relâcher rapidement, sans lui donner de rotation.

Pour se procurer un anagyre ellipsoïdal, voir la page 33.



2. Des cavités percées de part et d'autre des axes de l'ellipsoïde engendrent une répartition asymétrique de la masse. Ainsi, l'axe d'inertie principal (l'axe autour duquel se répartit la masse) est décalé par rapport à l'axe de symétrie de l'ellipsoïde.



3. Lorsque l'on fait osciller l'anagyre de bas en haut (flèches violettes), le point de contact se déplace sur un segment (en orange). En raison de la répartition des masses, la table exerce sur l'anagyre, en chaque point du segment, une force de réaction qui s'oppose au glissement ($F_{\text{FROTTEMENT}}$). L'une des composantes de cette force (F_{NORMALE}) tend à faire tourner l'anagyre dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

L'oscillation de roulis entraîne une rotation en sens inverse de celle engendrée par l'oscillation de bas en haut. Toutefois, le moment résultant est de moindre amplitude, ce qui explique pourquoi un sens de rotation est privilégié.

Le couplage entre la rotation et les modes d'oscillation varie avec le frottement. Un frottement trop important dissipe si vite la rotation de l'anagyre que celui-ci ne dispose pas d'assez d'énergie pour repartir en sens inverse. Un frottement trop faible limite la réaction, et le moment n'est pas suffisant pour inverser la rotation. Sur du verre, l'effet peut être moindre que sur du formica ou sur du marbre.

L'explication de cette énigme fait apparaître qu'il n'est pas nécessaire de disposer de deux points de contacts pour transmettre un mouvement de rotation à un mobile. Les sports de balles avec effet le montrent aussi (tennis, football). Pourtant, l'explication quantitative du comportement des anagyres, par exemple le calcul du nombre de tours avant l'inversion, nécessite la prise en compte de la dissipation par le frottement solide ainsi que le glissement, voire le frottement aérodynamique.

Si vous voulez construire vous-même votre anagyre, vous pouvez

utiliser du bois ou du plâtre, ou même une demi-coquille d'œuf. Deux ingrédients sont requis. Premièrement, la base tournante doit posséder deux rayons de courbure. Deuxièmement, la répartition des masses doit être décalée par rapport aux axes de symétrie ; pour cela, on peut soit évider des parties, comme pour l'anagyre décrit dans l'article, soit ajouter des masses décalées par rapport à l'axe de symétrie principal. Pour la coquille d'œuf, il suffit de coller des morceaux de chewing-gum de manière asymétrique. Une théorie complète reste à faire et nous publierons les analyses des lecteurs qui étudieront ce problème délicat.

Janick SIMERAY est l'inventeur du modèle d'anagyre à la forme symétrique.

A. GARCIA et M. HUBBARD, *Spin reversal of the rattleback : theory and experiment*, in *Proc. R. Soc. Lond.*, vol. A 418, pp 165-197, 1988.

J. WALKER, *Expérience d'amateur*, in *Pour la Science*, décembre 1979.

G.T. WALKER, *Q. Journal of pure and appl. Math.*, vol. 28, pp. 175-184, 1896.

Évolution

Oiseaux, merveilleux oiseaux. Les dialogues du ciel et de la vie

Hubert Reeves. Éditions du Seuil, 1998.

Un astrophysicien célèbre se penche sur notre planète Terre pour admirer le spectacle de sa vie et en sonder l'histoire ? Je suis d'emblée sous le charme, prêt à emprunter ses brisées. Pourtant les premières pages me déçoivent. En attendais-je trop ? Je poursuis la lecture ; parfois, mais parfois seulement, je suis séduit. Hubert Reeves aurait-il Janus dans sa parenté pour m'infliger ainsi la douche écossaise ? Ou bien l'accès à une vision sereine de ce monde flou et mou qu'est le vivant est-il plus difficile que ne le croient ceux qui ont l'habitude de la froide rigueur des chiffres et des lois de la physique céleste ?

Il est vrai que l'auteur a de l'ambition : il se donne 200 pages pour faire partager l'émerveillement qu'il éprouve au spectacle de la croissance de la complexité à l'échelle cosmique, et pour proposer quelques explications scientifiques de cette complexité. Chemin faisant, il ne refuse pas non plus l'interrogation métaphysique, filigrane de ses rationalisations. Il n'est pas étonnant qu'il ait ainsi trébuché parfois : ne fait-il pas appel aux résultats et aux conclusions de nombreuses disciplines éloignées les unes des autres – et par les méthodes et, surtout, par les vocabulaires ?

Selon le cas, ces faux pas sont des dérives, des boulettes ou des analogies outrées. Par exemple, il qualifie les dinosaures de « monstres » : pourtant, des bêtes qui, des millions d'années durant, ont arpenté le Globe n'ont rien de mythique ni de fantastique. Plus loin, il utilise le terme « faille » pour désigner les rifts africains, fossés d'effondrement qui parcourent le continent et témoignent d'une histoire complexe. Dernier exemple, on ne peut tout de même pas comparer une rencontre sexuelle à celle d'un proton et d'un électron... Parfois on se demande aussi s'il feint ou s'il croit vraiment que certains animaux ont découvert l'écholocation (le système de localisation des proies à l'aide d'échos ultrasonores) ou les

vertus de l'orientation par le champ magnétique terrestre bien avant que nous n'inventions le sonar et que les Chinois ne découvrent la boussole.

Cependant il ne tombe pas dans cet excès d'optimisme qui avait conduit un célèbre spécialiste des tortues à envisager que ces animaux ont une mémoire à la dimension des continents : alors que venait de naître la tectonique des plaques et la dérive des continents, ce zoologiste publia un article sur les migrations de certaines tortues marines qui, parties des côtes brésiliennes, vont pondre sur l'île d'Ascension, à 2 000 kilomètres de là, dans l'Atlantique. Le miracle est bis-annuel, et l'on se demande quelle obscure raison pousse cette gent reptilienne à risquer sa vie pour trouver un havre de paix où engendrer sa progéniture. Laquelle, d'ailleurs, à peine éclos, se jette à l'eau et regagne le Brésil, mais largement plus au Sud du point de départ des parents. En 1974, le zoologiste américain Archie Carr apportait une réponse géologique à la question : voici une centaine de millions d'années, les dames tortues auraient pris l'habitude d'aller pondre de l'autre côté du bras de mer qui les séparait alors de l'Afrique ; dérive des continents aidant, le fossé s'était creusé jusqu'à devenir abyssal, ce qui pour autant ne les avait pas découragées.

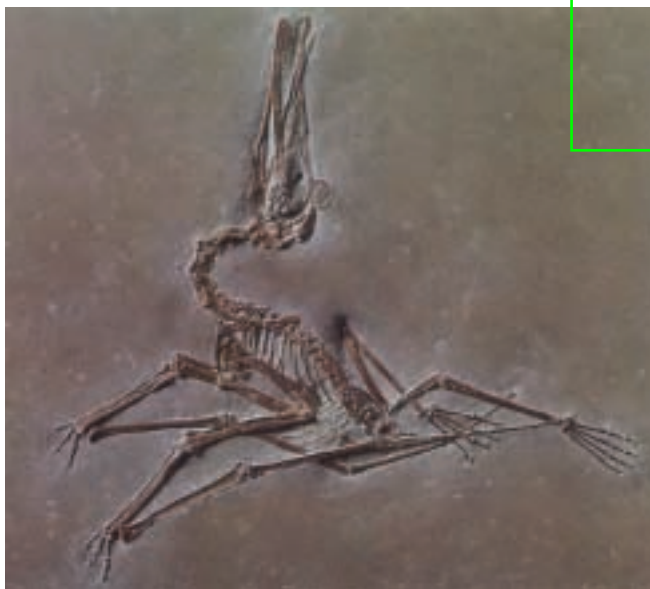
C'est là sans doute une de ces belles théories qui peuvent séduire jusqu'aux plus aguerris – Stephen Jay Gould faillit tomber dans le piège ! – et auxquelles apparemment aucun bouton de guêtre ne fait défaut. Cependant, à partir du moment où une théorie est irréfutable, on se doit de douter, et il vaut mieux la livrer à un scénariste hollywoodien afin que celui-ci en fasse un usage approprié à sa profession... Dans le cas des populations de *Chelonia*

mydas, tortues marines connues dans toutes les mers du Globe, le scénario est d'autant plus improbable qu'au bout du compte, si les populations brésiliennes avaient montré une telle constance et si elles ne s'étaient jamais mêlées aux autres, cet isolement génétique aurait débouché sur la formation de nouvelles espèces bien différentes de leurs congénères.

Quant aux chauves-souris émettrices d'ultrasons qui situent obstacles et proies par les échos que leur système auditif analyse, et possèdent donc des sonars, mais beaucoup plus performants que ceux que nous fabriquons, on peut affirmer sans risque que ce sont des Monsieur Jourdain de l'écholocation.

Poursuivant la lecture, on sera séduit par le chapitre que H. Reeves consacre aux « fermentations de la complexité biologique » ; la discussion qu'il engage à ce propos est intéressante à plus d'un titre. Après tout, rares sont les faits très concrets qui indiquent que le vivant se complexifie au cours du temps. Bien sûr, il est patent que les types de cellules des organismes supérieurs sont bien différents et beaucoup plus nombreux que chez les algues, par exemple, mais l'évaluation pour comparaison de ce nombre chez deux organismes supérieurs relève du défi. Il semble exister une corrélation quasi mécanique entre la taille des organismes et le nombre et la diversité des cellules qu'ils sont susceptibles d'abriter. Aussi doit-on prêter une attention particulière au récent travail de mon collègue paléontologue John Alroy, qui s'est avancé sur le sentier rebattu de la célèbre loi de Cope. Pionnier de l'étude des mammifères du Tertiaire Nord-américain, grand nom de la paléontologie, Edward Drinker Cope avait constaté que les lignées de chevaux et de rhinocéros augmentaient de taille au cours de leur histoire. Depuis lors, nombreux sont les paléontologues qui, étudiant d'autres types de fossiles, ont fait le même constat et usent de cette loi de Cope comme d'un postulat.

Sporadiquement toutefois, des contre-exemples viennent l'ébranler. Est-ce là une tendance évolutive majeure ? N'y a-t-il aucun artefact dans les preuves fossiles qui l'illustrent ? J. Alroy, sans pour autant expliquer le phénomène, vient d'en affirmer la pertinence en montrant qu'au cours des derniers 60 millions d'années la loi de Cope s'appliquait à toutes les lignées mammaliennes Nord-américaines : en moyenne, les espèces filles sont dix pour cent plus grandes que leurs ancêtres. On dira peut-être que



Les oiseaux sont-ils devenus plus complexes depuis l'archéoptéryx ?

c'est là une différence bien minime, mais le fait que cette évolution soit précisément quantifiée, et ce à l'échelle de la classe d'animaux à laquelle nous appartenons, est à mon avis un argument fort en faveur de cette fameuse complexification croissante du vivant.

En revanche, il y a peu de chances que l'on sache un jour si les chauves-souris ou d'autres mammifères qui vivaient voici 50 millions d'années étaient moins perfectionnés que leurs successeurs actuels. On sait seulement que tous ces animaux étaient adaptés à leur milieu. Des conclusions similaires peuvent être tirées de l'étude des oursins, brachiopodes, lamellibranches et autres, qui vivaient voici 300 ou 400 millions d'années, et H. Reeves adopte à ce propos le point de vue «banal» de S.J. Gould et de bien d'autres, qui constatent que, si la vie n'a pu commencer avec des êtres vivants d'une grande complexité, mais a eu des précurseurs simples, on ne peut affirmer pour autant que l'expansion biologique est synonyme de complexification croissante. L'image que donnent les fossiles de cette longue histoire de la vie est bien celle d'une diversification croissante, mais les organismes eux-mêmes, toujours adaptés aux milieux qu'ils occupent, ne sont guère plus complexes les uns que les autres. De surcroît, si l'on considère ces réussites adaptatives remarquables que sont les formes parasites, on est bien obligé de conclure qu'à l'inverse, dans ces cas, la Nature a choisi la voie de la simplification pour leur assurer un avenir...

Enfin je voudrais avertir H. Reeves et autres lecteurs d'un travers singulier propre aux écrits de beaucoup de mes confrères géologues ou paléontologues. Nous promenant sur nos échelles géologiques et leurs millions d'années, nous sommes souvent amenés à constater la simultanéité d'événements géologiques avec des extinctions ou avec des apparitions d'espèces vivantes. Beaucoup concluent que les événements géologiques sont les causes évidentes de ces morts ou de ces naissances. C'est parfois vrai, mais, parfois aussi, la conclusion est hâtive ou constitue un aveu d'ignorance... Alors, chers collègues, lorsque vous lisez de trop belles histoires où des météorites, explosions volcaniques et autres surrections de montagnes entraînent de grands bouleversements des biomasses, gardez-vous de trop d'enthousiasme ! Au bout du compte, ces catastrophes débouchent le plus souvent sur des extinctions ou sur des apparitions qui n'affectent pas tous les types d'organismes, mais seulement certains. Le maître de ballet est la sélection naturelle : c'est en tout cas ce qu'indiquent les mondes fossiles.

Jean-Louis HARTENBERGER

Archéologie

Les lettres de Tanis, la découverte des trésors royaux.

Pierre Montet (avec une présentation de Camille Montet-Beaucour et Jean Yoyotte). Éditions du Rocher, 1998.

En 1939, dans l'Est du delta égyptien, à Tanis, l'égyptologue français Pierre Montet fait une découverte qui transforme la perception que les égyptologues ont de la période historique succédant au Nouvel Empire : jusque là connus seulement par la mention de leur titulature (leur noms), les pharaons qui gouvernèrent l'Égypte entre 1069 et 713 avant notre ère prennent soudain la consistance de dépouille mortelles, entourées de leur mobilier funéraire.

Cette trouvaille, équivalente à celle du tombeau de Toutankhamon en 1922, n'a pas, dans le grand public, le retentissement qu'elle était en droit de susciter. Le déclenchement de la Seconde Guerre mondiale en fut une des causes. Malgré des ouvrages savants publiés après la trouvaille et malgré une grande exposition parisienne (*L'or des pharaons*, en 1987), qui a réparé partiellement cet oubli, il manquait un ouvrage de vulgarisation pour rendre justice aux péripéties de la découverte.

La situation internationale de 1939 contraignit l'épouse de Montet, Théodora, à rester en France pour s'occuper des trois filles du couple. Cette circonstance malheureuse conduisit l'égyptologue à écrire fréquemment à sa femme durant cette campagne d'exception où

il découvrait la nécropole royale de Tanis. Bien plus vivant que le journal de fouilles qu'il tiendra parallèlement, ces lettres offrent le tableau vivant de la recherche, puis de la découverte, par les yeux et par le cœur de celui qui l'a faite.

Ces 48 lettres couvrent les campagnes de 1939-1940, jusqu'à la décision du roi Farouk de prendre en charge la venue de la famille Montet. N'étant initialement pas destinées à devenir publiques, elles possèdent le ton et l'émotion de missives personnelles, traduisant les doutes, les craintes, les joies et l'amour profond de leur auteur pour sa famille et pour son travail. Et si elles ne possèdent pas la rigueur scientifique d'un compte rendu, elles ont le charme de la spontanéité.

À cet égard, cet ouvrage est un bienfait pour les lecteurs, qui apprécieront autant la verve de l'égyptologue que le suspens de ses recherches. Pour accompagner ces missives, une des filles de l'auteur, Camille, retrace la carrière de son père, tandis que Jean Yoyotte, professeur honoraire au Collège de France et ancien directeur de la mission archéologique, commente et explicite ces textes avec l'immense savoir qui est le sien. Une série de photographies en noir et blanc, au tirage médiocre, voire exécrationnel, offre au lecteur des images rares de l'époque, et des vues plus récentes du site actuel. Des appendices (listes des trouvailles) et des glossaires complètent l'ouvrage.

Si la lecture des lettres est un réel bonheur, les renvois aux croquis et aux plans sont bien compliqués et souvent obscurs. L'introduction de Camille Montet-Beaucour tient à la fois du règlement de compte à l'encontre de Georges Goyon, chef des travaux – elle est relayée dans le commentaire scientifique de J. Yoyotte – et de l'hagiographie familiale. L'analyse de J. Yoyotte a le mérite d'éclairer le débat scientifique, aujourd'hui obsolète, de



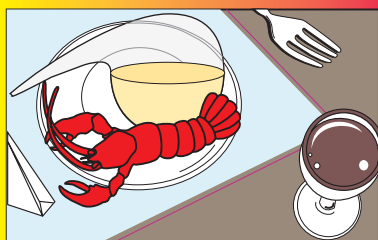
Le grand temple vu vers l'Est. Au premier plan, à gauche, la nécropole royale.

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 22 janvier 1999.

FRANCE

info

Pi-Ramsès, Tanis et Avaris, que Montet refusa systématiquement (confusion entre la capitale des Hyksos, de la ville des Ramsès – Pi-Ramsès –, et la capitale de la Troisième Période intermédiaire, Tanis). Afin d'éclaircir les lettres de Montet, il explique en outre la topographie et la progression des travaux archéologiques, au moment de la découverte. On regrettera cependant, hormis de brèves allusions, le caractère peu stratigraphique des travaux qui nous ont privés d'informations essentielles, mais qui s'expliquent par la nature peu archéologique du fouilleur et par les circonstances de la découverte. Enfin, même si le propos du livre était autre, je regrette que le livre n'évoque pas les fouilles actuelles, conduites par la Mission française des fouilles de Tanis sous la direction de P. Brissaud : bon an mal an, une vingtaine d'archéologues français décodent l'information contenue sous le tell de Tanis, renouvelant fondamentalement la vision historique et topographique de ce site majeur. Moins spectaculaire que la découverte de la nécropole royale, ces travaux ont tout le mérite d'une approche scientifique conforme aux méthodes actuelles. Ils ont été récemment publiés dans *Tanis, travaux récents sur le Tell Sâ el-Hagar* (éditions Noémis, 1998). Ce sont d'ailleurs des photographies de ce nouvel état qui auraient dû être intégrées au cahier des illustrations.

Jean-Luc BOVOT

Astronomie

RedShift 3, CD-Rom Windows 95 et Mac Intosh

Éditions Alsyd Multimédia, 1998.

Lors d'un séjour à la montagne ou à la campagne, loin des lumières nocturnes des grandes villes, la contemplation du ciel étoilé procure toujours un peu de bonheur visuel en même temps qu'elle intrigue ou inquiète, selon les tempéraments. Tous ces astres qui dessinent des formes géométriques que nous reconnaissons – la Grande Ourse, Orion, le triangle formé des trois étoiles très brillantes Deneb, Véga et Altaïr – sont des balises lumineuses dans l'espace. «Et ce point brillant, là, c'est Jupiter? Peut-on voir Saturne, ce soir?» Une heure après, l'aspect est déjà différent ; le ciel a tourné... à moins que ce ne soit la Terre!

Une paire de jumelles fait découvrir tout un fourmillement d'étoiles là où nos yeux seuls ne voyaient rien, et un petit

télescope fait encore mieux. Rien ne remplacera ce regard en direct sur la nature, mais, avant de savoir se repérer aisément sur la voûte céleste, il est possible (et souhaitable) d'assister à des séances de simulation dans un planétarium, où, confortablement installé dans une salle obscure au plafond hémisphérique, on regarde le ballet des planètes, de la Lune et du Soleil, dans le décor des étoiles, cette danse de taches lumineuses reproduisant fidèlement la réalité observée sur un ciel sans nuages.

Depuis une vingtaine d'années, l'informatique a considérablement abrégé la durée des calculs astronomiques, notamment laborieux. Aujourd'hui, nombre de programmes transforment les écrans d'ordinateurs en planétarium personnel. On choisit à volonté le lieu, la date et l'heure d'observation, la direction et le zoom souhaités, et un simple clic simule ce que le télescope permettrait d'observer. Le défilement du temps peut être accéléré lors des animations.

Pour ce qui est du Soleil, des planètes et des étoiles brillantes, la simulation est généralement très correcte, mais ces programmes pèchent souvent par le manque de fidélité du spectacle présenté à l'écran, car la précision des calculs se dégrade considérablement quand on s'éloigne de notre époque ; les programmes simulent difficilement le ciel nocturne d'il y a 1 000 ou 2 000 ans. Ainsi, une tablette d'argile conservée au *British Museum*, à Londres, rapporte qu'à une date correspondant au 15 avril, 136 ans avant notre ère (en l'an -135) eut lieu une éclipse totale, visible à Babylone, trois heures après le lever du Soleil : les planètes apparurent en plein jour, près du Soleil masqué par la Lune. Cet événement précisément décrit, datant de plus de 2 000 ans, est utilisé par les astronomes pour la mesure du ralentissement de la Terre, laquelle ralentit de près de deux millièmes de seconde par jour et par siècle, essentiellement à cause des marées dues à la Lune. Chaque jour dure ainsi 45 nanosecondes (ou milliardièmes de seconde) de plus que le précédent, et le retard accumulé, en progression arithmétique de 45 nanosecondes par jour, atteint trois heures en 2 000 ans par rapport à une rotation rigoureusement uniforme. Les logiciels ordinaires reproduisent rarement cette éclipse totale, et la situent généralement en Europe, bien à l'Ouest de Babylone, où l'éclipse n'aurait été que très partielle.

RedShift 3, lui, reproduit correctement les observations historiques. La grande précision de ce logiciel résulte de l'emploi des éphémérides numériques DE102 du *Jet Propulsion Laboratory*, placées sur le CD-Rom : les 44 siècles s'étendant entre les années -1400 et +3000 sont

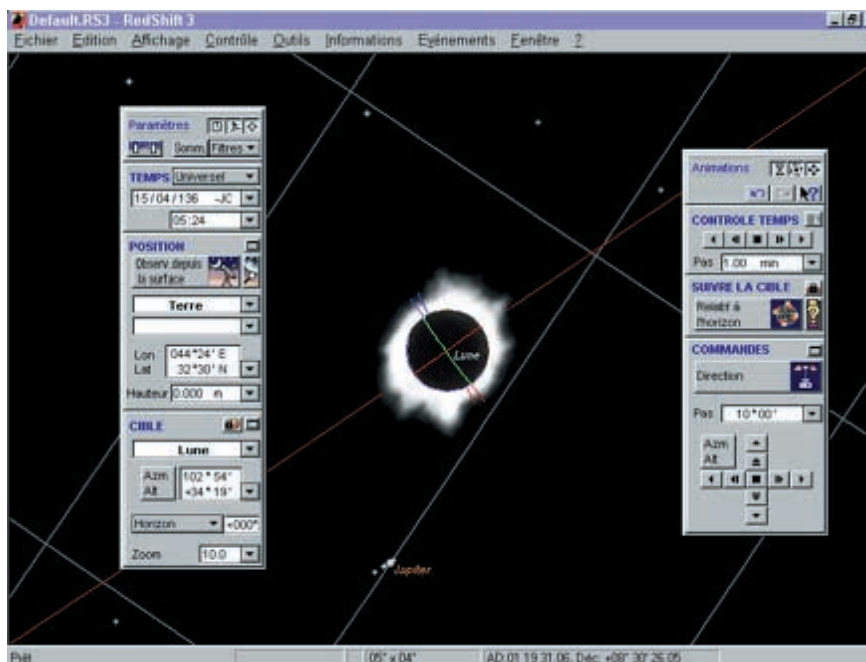
découpés en durées élémentaires (le pas d'intégration), et une interpolation pour la date voulue calcule des coordonnées très précises. Une comparaison avec les éphémérides analytiques du Bureau des longitudes montre que les écarts angulaires sur les positions des astres du Système solaire sont, sur plus de 4 000 ans, inférieurs à quelques secondes de degré (la seconde de degré est l'angle sous lequel on verrait un objet de un millimètre placé à 200 mètres de distance). Cette grande précision est remarquable pour un logiciel grand public.

La version 3 du logiciel (dont le nom anglais signifie «dérégulation vers le rouge», par allusion à l'expansion de l'Univers) inclut également les caractéristiques d'un très grand nombre de comètes, d'astéroïdes et de galaxies, ainsi que celles de plus d'un million d'étoiles qui proviennent des tout nouveaux catalogues astrométriques Hipparcos et Tycho, de l'Agence spatiale européenne (1997) : en plaçant le pointeur de la souris sur tel ou tel astre de l'écran (au graphisme réaliste), on obtient l'identité de l'objet et ses principales caractéristiques astrométriques, ainsi qu'un rapport d'éphémérides (un tableau donnant, jour par jour, la position des astres) et de visibilité, à partir du lieu choisi.

Ce planétarium personnel permet bien d'autres possibilités visuelles ou animées : tous les paramètres sont facilement adaptables, mais, comme ils sont nombreux, il faut un peu de patience avant d'être familiarisé avec leur maniement ; le spectacle obtenu en vaut la peine. Ainsi, en positionnant le lieu d'observation ailleurs que sur la Terre, sur une comète par exemple, on visualise bien son mouvement vers le centre du Système solaire, parmi les planètes, puis le contournement du Soleil à grande vitesse. On peut aussi faire calculer les conjonctions de deux astres, visibles d'un endroit arbitrairement choisi.

Le CD-Rom contient également un module d'enseignement de l'astronomie élémentaire, qui tire habilement parti des possibilités du multimédia. De petites animations schématisées et commentées permettent, mieux qu'un texte, de visualiser les phénomènes célestes familiers : les saisons, les éclipses, les mouvements apparents et des repères de la voûte céleste, ou même la physique du Soleil et des étoiles... Quelques séquences vidéo montrent les vols *Apollo* sur la Lune ou le survol des planètes géantes par la sonde *Voyager 2*, de 1977 à 1989. Un dictionnaire en hypertexte complète cette encyclopédie d'astronomie avec de magnifiques photographies prises par des sondes spatiales ou dans de grands observatoires.

Le programme a été réalisé par une équipe d'astronomes russes qui travaillent



Lors de l'éclipse totale de Soleil observée à Babylone 136 ans avant notre ère, la planète Jupiter était visible à un degré et demi du Soleil masqué par la Lune, laissant voir la couronne solaire. Cette observation, notée précisément à l'époque sur des tablettes d'argile, a permis de déterminer le ralentissement de la rotation de la Terre, essentiellement en raison des marées dues à la Lune. Le logiciel Redshift 3 reproduit ce phénomène.

aujourd'hui pour la Société californienne *Maris Multimedia*. Outil de choix pour un amateur comme pour un professionnel, ce CD-Rom entièrement en français est nettement meilleur que les autres produits du même genre.

Michel TOULMONDE

Médecine

Cerveau de soi, cerveau de l'autre

Pierre Buser. Éditions Odile Jacob.

L'art d'écrire sur la science est difficile, et nombre d'ouvrages parus ces dernières années en témoignent : la voie est étroite entre pédantisme hautain et condescendance vexante, entre hagiographie triomphante et scepticisme mondain, et l'ennui menace souvent le lecteur. Le livre que nous propose Pierre Buser n'en est que plus remarquable, non seulement parce qu'il évite ces écueils, mais aussi parce qu'il traite d'un problème auquel aucun d'entre nous n'est indifférent : celui de la conscience. Celle-ci, précisons-le, consiste en une série d'opérations «de prise en compte de ses propres sensations, pensées, émotions, volontés, désirs,

croyances, communications, par la parole et autres activités linguistiques».

Que dire de nouveau sur ce thème ? Peut-on dépasser les oppositions que la philosophie nous propose, depuis la nuit des temps ? Et que nous apportent aujourd'hui les données encore fragmentaires de la neurobiologie moderne concernant l'esprit et le mental ?

Cet ouvrage est singulier à bien des égards. Celui de son auteur d'abord, qui ne craint pas de considérer que la conscience est un phénomène accessible, qui peut être étudié expérimentalement chez le sujet éveillé, humain ou animal, et qui a acquis cette conviction en participant à l'activité d'un service de neurochirurgie où étaient traités des patients épileptiques. Il est singulier, également, par le nombre de données qu'il présente et qu'il ordonne malgré leur complexité, sans tomber dans le travers d'une «théorie unifiée de la conscience» ; bien que matérialiste, l'auteur n'impose pas ses convictions, mais présente les divers courants de pensée avec une tolérance et une rigueur qui ajoutent au plaisir de la lecture.

Ainsi, au terme de cet essai, P. Buser s'écarte du «scientifiquement correct» et s'interroge sur l'hypnose, cet ensemble de phénomènes qui déroutent cliniciens et scientifiques. Les faits sont têtus : soit les états hypnotiques existent, comme une altération de la conscience, à nulle autre pareille et qu'il faudra un jour expliquer, soit les états hypnotiques sont des artefacts, soit enfin, l'hypnose est faite, tout à

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte, assisté de Anne Gusdorf. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Paul Decaux, Marc Dejardin, Christian Jeanmougin, Marie-Thérèse Landousy, Valérie Martin-Rolland, Claude Olivier, Guy Paulus, Pierre Sonigo, Charles Twist.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Ward Gibbs, Alden Hayaishi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher: Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer: John Hanley. Co-Chairman: Rolf Grisebach. President: Joachim Rosler. Vice-président: Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28.
Téléc : LIBELIN 202978F.
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : Kate Dobson, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon : 01 55 42 84 04.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : Servioli - 5, rue des Chaudronniers - 15 Postale 3663 - CH 01211 Genève

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. 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).

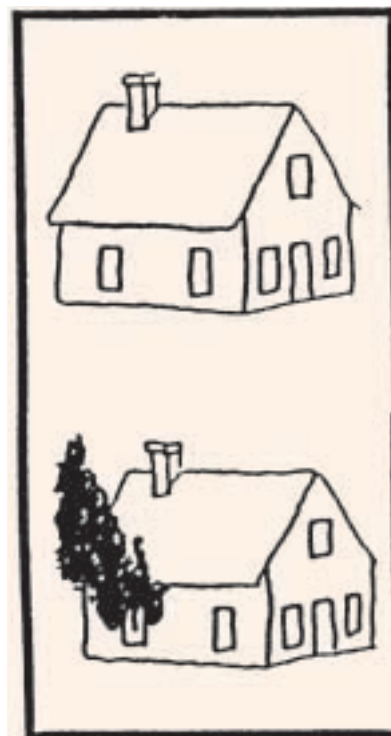
Nos lecteurs trouveront dans ce numéro un encart publicitaire Newsweek et, en pages 18A, 18B, 98A et 98B, des bulletins d'abonnement.

la fois, d'altérations réelles et d'artefacts, qui ont été plus ou moins mélangés au fil du temps et des écrits, et parmi lesquels il conviendra un jour de faire le tri.

De même, il parcourt la «psychobiologie de la méditation». Là encore, la difficulté était redoutable, mais le matérialiste ne peut ignorer ou négliger ces états extraordinaires et mystérieux. D'un de ces historiques dont il semble, heureusement, ne pas pouvoir se passer, l'auteur conclut que le besoin de spiritualité représente, pour un sous-ensemble considérable de l'humanité, une sorte d'impérieuse nécessité ; puisque, écrit-il, les exercices de la pratique méditative se ressemblent très curieusement à travers les religions, c'est qu'ils procèdent d'un besoin psychobiologique fondamental et relèvent de mécanismes physiologiques qu'il tente d'identifier, avant de se ranger à une position qui accepte l'élan religieux de l'autre. Contradiction ? Non ! Remarque d'un sceptique qui ne reconnaît pas la valeur persuasive des arguments scientifiques communs et qui ne peut s'empêcher d'admettre la réalité vivante du mystique, même quand il ne la partage pas.

Une ligne directrice relie les différentes parties de ce livre consacrées aux différents volets qui caractérisent l'activité consciente : la perception, l'attention, les différentes formes de mémoire, l'émotion, l'action motrice, en particulier imaginaire, enfin les activités dites «cognitives» dont font partie le langage, la reconnaissance de la musique ou encore de la perception du temps. En effet, une des expériences où l'exploration à la fois intervient et voit ses limites est la perception de la simultanéité, du passé et du futur immédiats. Dans cette fenêtre temporelle de l'immédiat, les erreurs ne sont pas rares (A objectivement suivi de B est parfois subjectivement perçu comme B suivi de A ; d'une façon plus générale, la date d'un stimulus n'est pas nécessairement perçue à son instant réel par rapport aux repères chronologiques).

Dans chacun de ces domaines, ainsi que dans leurs manifestations pathologiques (hallucinations ou déficits de reconnaissance, comme les agnosies telle l'étonnante «vision aveugle», où des patients atteints de cécité réagissent à des sollicitations visuelles comme si ils les voyaient, mais sans le savoir), P. Buser distingue deux niveaux, et il appuie son argumentation sur les données de l'électrophysiologie, de l'imagerie et de la neuropsychologie. Le premier niveau est celui de la conscience réflexive primaire proprement dite. Le second niveau, qui «double» le précédent, est celui de l'«inconscient cognitif» (que l'auteur distingue peut-être



Des particularités de la conscience apparaissent quand on présente deux dessins de maison à un malade atteint d'héminégligence spatiale, c'est-à-dire qui, en raison d'un déficit cérébral, ignore ce qui se passe dans un de ses champs visuels. Le malade «sait» ce qu'il voit, puisque, s'il déclare ne déceler aucune différence, il choisit la maison qui n'est pas en feu quand on lui demande sa préférence.

rapidement de l'inconscient affectif «des profondeurs», cher aux psychanalystes). Ainsi, dans le cas de la perception ou de l'attention, il existe des mécanismes de pré-attention, automatiques et sous-liminaire, seulement entrouverts sur le conscient. Après avoir été sollicités, ceux-ci peuvent jouer le rôle d'«amorces» qui accroîtront ultérieurement la probabilité de détection d'un stimulus de même catégorie, qu'il s'agisse par exemple d'amorce identitaire (quand un mot présenté prépare à l'identification du même mot) ou d'amorce sémantique (quand la présentation d'un mot prépare à la compréhension d'un autre mot, ayant la même signification).

Voici donc un livre passionnant, anti-réductionniste par excellence. Il ne faut pas seulement le lire, il faut le relire encore pour comprendre son cerveau et celui de l'autre.

Henri KORN

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de Pour la Science est donnée sur notre site Internet, à l'adresse :
<http://www.pourlascience.com>