

■ POUR LA SCIENCE

Mars 1997

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

Médicaments et animaux
transgéniques

Le petit père Hadamard

Dessin et cécité

Les druides

Le réfrigérateur
d'Einstein

Les rayons
cosmiques

La maladie
de Parkinson

Turbulence et superordinateurs

Canada \$ 8.75

Bloc-notes de Didier Nordon

Jeu-concours

Galette et probabilité
par Pierre Tougne

Tribune des lecteurs

Point de vue

Les coûts de l'informatique
par Bernard Beauzamy

Les inattendus de la science

Les inattendus du gène
par Pierre Douzou



Présence de l'histoire

Histoire de la contraception
par François Chast

Science et gastronomie

Dépotoir médiéval

Science et finance

L'espérance nulle du spéculateur
par Christian Walter

Perspectives scientifiques :

Maillet paléolithique

Laser à atomes

L'arpenteur de l'Univers

Antiadhésifs adhérents

La fécondité dans le monde

La partition de données

Agrégats neurotoxiques

RMN et vipères

Graine et dynamo

Chats et souris à la Schrödinger

Hibernation originelle

Savoir technique

La sûreté des ascenseurs



Archimède

Du courant dans les roches
par Pascal Bernard



Logique et calcul

Les mélanges de cartes
par Jean-Paul Delahaye

L'image du mois

Les insectes orfèvres



Analyses de livres

– *Le génie génétique. De l'animal à l'homme?*
– *La quête de l'unité (l'aventure de la physique)*

– *La médecine du XXI^e siècle*
– *Microcosmos, le peuple de l'herbe*

5

6

7

9

10

14

20

22

24

97

100

102

108

110

Le pouvoir des druides

38

par Jean-Louis Brunaux

Les prêtres celtes, qui célébraient leur culte dans de vastes sanctuaires, n'étaient pas de simples magiciens. Ils détenaient une partie du pouvoir politique en Gaule avant la conquête romaine.



Les superordinateurs analysent la turbulence

46

par Parviz Moin et John Kim

Seuls les ordinateurs les plus puissants parviennent à décrire les écoulements turbulents simples. Dans certains cas, les calculs révèlent des possibilités de commander la turbulence.

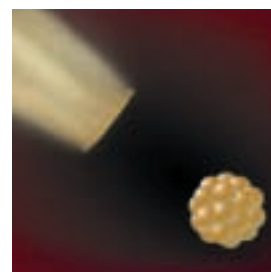


Les rayons cosmiques

54

par James Cronin, Thomas Gaisser et Simon Swordy

Ces noyaux atomiques provenant de l'espace ont une énergie supérieure à celle que pourraient communiquer les plus gros accélérateurs de particules. Les astrophysiciens recherchent leur origine.



La maladie de Parkinson

60

par Moussa Youdim et Peter Riederer

Les radicaux libres, des molécules extrêmement réactives, participeraient à la dégénérescence des neurones responsables de cette maladie fréquente.



Des animaux transgéniques produisent des médicaments

70

par W. Velander, H. Lubon
et W. Drohan

Les femelles de mammifères qui ont été dotées de gènes humains produisent dans leur lait des protéines humaines que l'on peut utiliser comme médicaments.



Comment les aveugles dessinent

76

par John Kennedy

Pour dessiner, les aveugles utilisent les mêmes conventions que ceux qui voient. L'analyse des dessins exécutés par les aveugles révèle que le cerveau traite de la même façon des informations provenant de la vue et du toucher.



Les réfrigérateurs d'Einstein et de Szilard

82

par Gene Dannen

Dans les années 1920, deux physiciens théoriciens visionnaires unirent leurs efforts pour perfectionner les réfrigérateurs domestiques.



Le petit père Hadamard

88

par Laurent Schwartz

Prototype du savant distrait, le mathématicien Jacques Hadamard fut au cœur de l'activité mathématique française pendant presque un siècle.



Le centenaire du théorème des nombres premiers

93

par Michel Balazard

En 1896, Jacques Hadamard et Charles-Jean de la Vallée-Poussin démontrent indépendamment le théorème des nombres premiers.

L. Schwartz, Hadamard, et les druides

Le mathématicien Laurent Schwartz est une figure emblématique. Politique, il a su, alors qu'il était professeur à l'École Polytechnique, s'opposer à la répression en Algérie et combattre, sa vie durant, les abus de pouvoirs des institutions. Mathématicien, il fut membre de Bourbaki et reçut la plus haute récompense du monde mathématique, la médaille Fields. Les 10 000 étudiants à qui il a enseigné les distributions témoignent de ses qualités de professeur. Qualités quelquefois trompeuses : ses élèves avaient le sentiment de tout comprendre pendant le cours, mais le retour à la réalité des notes (aux deux sens du mot) amenait des traumatismes.

Aussi, qui d'autre que Laurent Schwartz (Voir *Le petit père Hadamard*, page 88) pourrait-il mieux décrire la vie et l'œuvre de Jacques Hadamard, son grand-oncle ? Jacques Hadamard était une figure colorée, puisque, selon certains, il aurait servi de modèle au Savant Cosinus, immortalisé par Christophe. Jacques Hadamard a marqué son époque, d'abord par son séminaire, en un temps où les travaux français étaient trop isolés et où ce séminaire constituait une des rares ouvertures vers l'univers mathématique international, ensuite par quelques articles qui ont fait sa gloire : la convergence des séries de Taylor, le théorème sur la raréfaction des nombres premiers et son analyse des problèmes sensibles aux conditions initiales. Ces derniers problèmes ont eu les prolongements que l'on connaît dans la théorie actuelle du chaos.

Le druide est une figure mythique de notre folklore. Il a longtemps symbolisé, une sagesse antérieure au christianisme, un culte de la nature exprimé par des cérémonies de cueillette qui s'apparentent à la recherche des herbes médicinales, et la résistance contre l'envahisseur romain.

La réalité est modulée : les druides étaient aussi des administrateurs. Certains ont collaboré avec les Romains avant l'inévitable conflit de pouvoir qui entraînera leur perte, et ils partageaient avec les envahisseurs, nombre de traditions culturelles, des sacrifices d'animaux au culte des morts (voir *Le pouvoir des druides*, page 38).

Philippe BOULANGER

Au quatrième top-model

Déjà l'an 2000 s'estompe dans le passé...

Voici quelques années, le Centre Pompidou a installé un immense dispositif lumineux indiquant à chaque instant le nombre de secondes qui nous séparent de l'instant 0 de l'an 2000. Au début, cette belle démonstration de notre puissance fut une attraction. Ce gadget – mesurer une durée de plusieurs années à l'aide de l'unité la moins adaptée à cela – était absolument inutile et inutilisable, parfaitement puéril, mais nous avions la volonté tant technique que financière de la réaliser quand même.

Aujourd'hui, ce dispositif n'attire plus guère le regard ; c'est tout juste s'il ne disparaît pas derrière les aguichants placards publicitaires de la mode féminine. Si ça se trouve, il n'y aura personne devant lui pour contempler la survenue du 0 fatidique quand le compte à rebours s'achèvera.

Que la signification d'une expression se change en son opposé est banal. En général, les superlatifs en font les frais. Au XVII^e siècle, le mot « formidable » – conformément à son étymologie – évoquait la peur ; dans ma jeunesse, il désignait au contraire ce qui est attirant, « super » ; je ne sais s'il garde un sens aujourd'hui.

Il y a des mots qui devraient donner l'exemple, et ne pas être sujet aux dérives langagières promises aux vulgaires superlatifs. Que « rigueur » se comporte avec rigueur ! Instaurons donc une commission de discipline chargée de surveiller et punir les mots qui se montrent indignes de la haute mission qui est la leur.

À titre de châtiement, et pour une durée de six mois, le mot « rigueur » sera orthographié ryghœurre.

Un exemple riche

My tailor is rich. C'est sûrement vrai : depuis le temps qu'on le dit ! Je serais curieux de savoir quel « fait de société » a jadis rendu populaire pareille formulation. Voici cependant une autre phrase qui, quoique plus difficile à prononcer pour un francophone, mériterait de devenir elle aussi légendaire : *My dictionary is rich*.

Le Dictionnaire français-anglais et anglais-français de *Robert & Collins* est bien fait. Pour aider l'utilisateur à mieux saisir le sens des mots et la façon de les employer dans la langue étrangère, il recourt à de nombreux exemples tirés des

situations les plus familières. Ainsi, allons voir au verbe *to realize*. Les deux principales traductions en français sont : se rendre compte ; réaliser (au sens financier du terme). Exemple d'emploi : *How much did your Rembrandt realize* ? Phrase que le dictionnaire traduit fort dignement par : Combien votre Rembrandt vous a-t-il rapporté ? (Volontiers familier, j'aurais plutôt traduit par : T'en as tiré combien, de ton Rembrandt ?, mais je ne suis pas homme à donner des leçons au *Robert & Collins*.)

Pareille « mise en situation » relève-t-elle de l'humour anglais ? Non. L'équipe qui a rédigé le dictionnaire est au-dessus de tout soupçon, puisqu'elle comporte autant de Français que d'Anglais. Jamais les premiers n'auraient laissé les seconds donner libre cours à une fantaisie trop marquée par leur esprit national. La phrase est à prendre au sérieux. C'est donc le moment ou jamais de recourir à un anglicisme et de s'étonner : « Un Rembrandt ? Mazette ! Je n'avais pas réalisé à quel point ça enrichissait, d'écrire un dictionnaire. »

Rigueur autoréférentielle

Vous lisez un ouvrage dont certaines positions diffèrent des vôtres. Vous dites : « Quand l'auteur affirme ceci, je puis le suivre à la rigueur. Mais quand il en déduit cela, je ne suis absolument plus d'accord. »

Que signifie l'expression « à la rigueur » au début de votre propos ? Elle signifie « sans rigueur ». Vous pouvez accepter la position du livre, à condition de ne pas regarder de près ses conséquences.

«Chacun sait que...»

La fréquence de cette constatation le prouve : Chacun est omniscient. Chacun sait ceci. Chacun sait cela... Chacun sait tout !

En quelle circonstance un auteur recourt-il à l'expression « Chacun sait que... » ? Lorsqu'il est sur le point de rappeler un fait dont personne n'a jamais entendu parler, sauf deux individus : lui-même, et l'un de ses collègues devant lequel il ne veut surtout pas avoir l'air de découvrir aujourd'hui ce que le collègue savait hier.

« Chacun sait que la légende de saint Laurent sur son gril provient d'une erreur de scribe médiéval qui, recopiant un manuscrit, a sauté distraitemment une page et est ainsi passé, sans transition, d'une vie de saint à une recette de cuisine », lit-on dans un ouvrage de Jacques Roubaud (*Mathématique*, éditions du Seuil, 1997, p. 250). L'information est savoureuse (c'est le cas de le dire). Pour une fois, le sourire se substitue à l'horreur : mieux vaut être confondu avec une recette que subir le supplice du gril. Mais...

Mais... Chacun sait que Jacques Roubaud n'est pas ennemi des facéties ! Son explication a un petit côté « trop vraisemblable pour être vraie » qui me tracasse... Je ne sais que croire... Alors ? Je ne vois qu'une solution pour sortir de ma perplexité : demander à Chacun, la prochaine fois que je le rencontrerai.

Balivernes de publicitaire

Dans son ouvrage finement intitulé *Le futur a de l'avenir* (éditions Ramsay, 1996), Jacques Séguela semble ignorer la prudence et le conditionnel. Pour décrire l'avenir, il recourt à une espèce de « futur passé », temps cher à ceux pour qui l'avenir n'a plus de secrets.

Ainsi : « Les langues s'apprendront en réalité virtuelle, les élèves étant directement immergés dans le pays correspondant. L'histoire remontera le temps en image ; la géographie vous emmènera au bout du monde ; les mathématiques se feront ludiques ; la chimie et la physique vous plongeront en direct dans les grandes inventions. Vous serez un jour Lavoisier, un jour Marconi, un jour Einstein » (p. 247). Certaines « prévisions » de Séguela sont si délirantes que le lecteur en vient à se dire que non, ce n'est pas possible : pour pouvoir écrire des balivernes de ce calibre, il faut qu'il y croie !

Séguela manie également le présent de l'indicatif. Ainsi, un chapitre s'intitule : « Savoir n'est pas savoir si personne ne sait que l'on sait » – titre qui, dans la table des matières, se transforme en : « Savoir n'est pas savoir, si personne ne sait ce que l'on sait ». Ô livre hâtif et profonde remarque !

JEU-CONCOURS

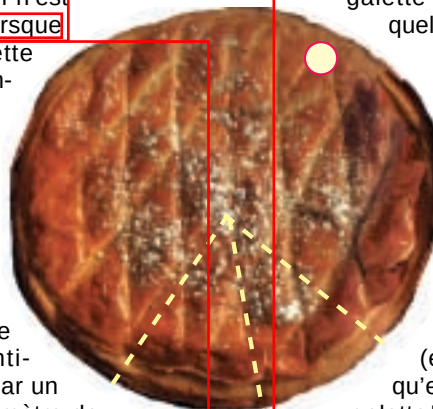
N°33

GALETTE ET PROBABILITÉ

A l'Épiphanie, rien n'est plus agaçant, lorsque

l'on coupe la galette des rois, que de tomber sur la fève. C'est pourquoi nous chercherons ce mois-ci la probabilité d'éviter ce désagrément. Pour cela, nous modéliserons la galette par un disque de rayon 20 centimètres et la fève par un disque de un centimètre de rayon que le boulanger aura pris soin de disposer tangent à la périphérie du disque. Si l'on découpe cette galette en dix parties égales, quelle est la probabilité que l'on évite la fève?

Maintenant plaçons-nous du point de vue du boulanger dont un client mathématicien lui commande une galette pour dix personnes, telle qu'il ait neuf chances sur dix de la découper sans rencontrer la fève. Si ce client de surcroît est écossais et exige une



galette de rayon minimum, quel devra être ce rayon?

Enfin, hors concours, j'invite les lecteurs à rechercher la probabilité moyenne d'éviter la fève si le boulanger place la fève de un centimètre de façon aléatoire équiprobable dans la galette (en évitant cependant qu'elle ne dépasse de la galette!) de rayon 20 centimètres que l'on découpe pour dix personnes.

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à Pour la Science, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de mars 1997 dix gagnants tirés au sort recevront un livre de la Bibliothèque Pour la Science.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°31

Vu l'ampleur du nombre de bonnes réponses, il ne fait aucun doute que les lecteurs de *Pour la Science* feraient d'excellents chefs de gare! Pour ceux qui n'ont pas voulu révéler leur talent caché, voici la solution. On part de la remarque suivante : si n est le numéro de la première locomotive du convoi à former, il faut rentrer d'abord les locomotives de 1 à n sur la voie principale, puis sortir n par la droite. Maintenant si le numéro de la deuxième locomotive du convoi à former est l'un des nombres 2, 3 ... $n-2$, on ne pourra le faire car les locomotives 1 et $n-1$ empêcheront de la sortir. Ainsi, si le convoi commence par 5 suivi de 3, on ne pourra la sortir car $1 < 3 < 4$, d'où les six impossibilités 53(124).

En exploitant systématiquement cette idée, on trouve facilement les

solutions, soit 53(124), 52(134), 542(13), 513(24), 42(135), 452(13), 352(14), 253(14) et 153(24). Bien qu'il ne soit pas évident que cette procédure couvre tous les cas d'impossibilités, le fait que leur nombre est de 30 nous garantit que ce sont les seuls, car il existe une formule de récurrence donnant le nombre a_n de convois possibles de n locomotives qui est la suivante : $na_n = 3(2n-3)a_{n-1} - (n-3)a_{n-2}$ $n \geq 2$. À ce sujet, Madame Asquin a trouvé la formule explicite suivante :

$$a_n = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-2} \binom{n-1}{i} \binom{n-1}{i+1} 2^{i+1}$$

où $\binom{n}{i}$ est le coefficient binomial égal à :

$$\frac{n!}{(n-i)! i!}$$

Réponse mathématique

Didier Nordon m'a fait l'honneur de commenter la page de couverture de mon récent ouvrage sur les mathématiques (voir *Bloc-notes, Pour la Science*, janvier 1997). Comment peut-on publier des lignes aussi fielleuses que vides sur le fond ? Est-ce le titre qui fait la valeur d'un ouvrage ou bien ce qu'il tente d'apporter au lecteur ?

Celui-ci verra que je me suis efforcé de défendre les mathématiques, parfois injustement attaquées, et de les promouvoir. M'appuyant sur les écrits d'Henri Poincaré, j'ai notamment rappelé leur intérêt essentiel pour la formation de l'esprit. Je me suis efforcé de les faire comprendre et accepter, soit en décrivant de manière littéraire plusieurs de leurs aspects, soit en essayant d'apporter, de façon aussi peu formelle que possible, des compléments d'intelligibilité à certains chapitres de base de l'enseignement.

Le titre original, *Essais sur l'intelligibilité des mathématiques*, est devenu, de manière plus sobre, *Comprendre les mathématiques*. Le titre de ce livre et son sous-titre n'ont pas choqué les mathématiciens ni les philosophes, académiciens ou non, français ou non, qui m'avaient adressé un courrier fort agréable à lire.

C.P. BRUTER, Gometz-le-Châtel

Réponse de Didier Nordon

C.P. Bruter ne répond pas aux critiques que je formulais. Son livre est un cours de géométrie classique – niveau seconde année de Premier Cycle universitaire – précédé d'un essai d'une soixantaine de pages. Ni le cours ni l'essai ne me semblent à la hauteur de l'extrême ambition affichée tant par le titre, *Comprendre les mathématiques*, que par le sous-titre, «Les 10 notions fondamentales».

La rigidité du poil

François Pérégé écrit, dans *Le poil*, que «la mélanine rigidifie la structure et détermine ainsi la nervosité et l'élasticité du poil». Si certains poils blancs sont considérés comme plus souples par les peintres, on ne peut en déduire que la mélanine contrôle la souplesse du poil.

Le poil des mammifères, tel le cheveu humain, est un tube de kératine rempli d'une moelle souple et dont les parois sont formées de deux couches. La couche externe est constituée de six épaisseurs de cellules disposées en un arrangement régulier, comme les

tuiles d'une toiture. La couche interne est constituée de faisceaux cylindriques, parallèles au grand axe du cheveu, qui ne sont pas cohérents entre eux. La rigidité du poil est due à l'interaction de ses trois parties.

La mélanine est un pigment synthétisé dans le bulbe pileux et transmis aux cellules qui se différencient petit à petit pour former la tige pileuse. Elle est stockée dans de petites pelotes nommées mélanosomes. La richesse en pigments et le type de mélanine produite déterminent la couleur du cheveu. La mélanine ne participe pas à la rigidité du poil.

Philippe DEPREZ

Réponse de François Pérégé

M. Pomarède, de l'Université de Montpellier, qui a travaillé sur les couleurs des oiseaux, signale que la mélanine rigidifie les plumes. Il me semble logique qu'elle rigidifie aussi les poils. L'eumélanine, noire, est un polymère qui se présente en pelotes, en bâtonnets ou en fuseaux, et s'incruste de manière plus ou moins homogène entre les faisceaux de microfibrilles de kératine. En mécanique des matériaux composites, des granules dispersés dans un faisceau de fibres parallèles apportent de la rigidité.

La structure du poil intervient toutefois aussi. Sinon, pourquoi le poil de la martre kolinski serait-il si rigide, alors qu'il ne contient que de la phaéomélanine, qui ne se présente pas en grosses molécules ?

Véhicules et carburants

Selon Daniel Sperling, le gaz naturel ou le gaz de pétrole liquéfié ne réduisent pas beaucoup les émissions polluantes des véhicules (voir *Les véhicules électriques*, *Pour la Science*, janvier 1997). Toutefois, les principaux composants de ces carburants sont le méthane, le propane et le butane, alcanes légers dont la combustion, correctement menée, ne dégage presque pas de monoxyde de carbone. Contrairement aux essences actuelles, ils ne contiennent ni composés aromatiques ni plomb. On peut facilement supprimer le soufre qui leur est ajouté comme marqueur odorant.

Olivier BOUTRY, Arnouville-lès-Gonesse

La principale difficulté à surmonter pour la généralisation des véhicules électriques est leur faible autonomie et la durée de recharge des batteries. Si l'on calcule le rapport entre l'autonomie et le temps de recharge pour les différentes énergies, on

obtient 4 200 kilomètres par heure pour une voiture à essence, et huit kilomètres par heure pour les véhicules électriques actuels. Il serait souhaitable d'atteindre 25 kilomètres par heure pour un véhicule de livraison urbain, et au moins 200 pour un véhicule routier. Si l'on divise ce rapport par le poids de l'énergie embarquée (carburant ou batterie), un véhicule à essence est 2 000 fois plus performant qu'un véhicule électrique.

Guy BARTHAS, Boulogne Billancourt

Double hélice

Dans *Les inattendus de la double hélice* (voir *Pour la Science*, janvier 1997), Jean Rossier retrace la naissance de la biologie moléculaire. Je souhaite compléter cet historique.

Est-il certain qu'Avery «ne croyait pas tellement lui-même» en la signification de ses travaux sur le principe transformant du pneumocoque ? Avery était modeste, et il a été prudent, dans ses publications scientifiques, sur les interprétations de ses travaux, mais sa correspondance atteste qu'il pensait avoir montré que le principe transformant, l'ADN, était le principe des virus et des gènes. On ne saurait lui reprocher sa prudence quand, à la même époque, George Beadle, le découvreur de la fonction primaire du gène, la synthèse des protéines, tout en connaissant et citant les travaux d'Avery, maintenait que le gène était probablement constitué de protéines «ou peut-être de nucléoprotéines».

Que «Jim Watson était encore plus mauvais expérimentateur que Francis Crick, si c'est possible» est une opinion discutable. Les travaux de génétique microbienne que J. Watson a réalisés au Cold Spring Harbor, avant son séjour à Cambridge, et ceux qu'il a réalisés après ce séjour, ne sont pas le fait d'un mauvais expérimentateur. Il est en effet l'un de ceux qui, en concurrence avec Sidney Brenner et François Jacob, et par une autre méthode, ont mis en évidence physiquement (ou biochimiquement) l'ARN messager prédit par F. Jacob et Jacques Monod. Quant à F. Crick, c'est essentiellement un théoricien. Il semblerait qu'il n'ait, de ses mains, réalisé qu'une expérience «de pailleasse», mais quelle expérience ! C'est, en collaboration avec S. Brenner, la magnifique expérience de génétique du phage démontrant que le code génétique est constitué de «codons», formés de «triplets de bases» (succession de trois bases) non chevauchants.

Jean DEUTSCH, Paris



Les coûts de l'informatique

BERNARD BEAUZAMY

On les réduit en améliorant les algorithmes avant de travailler la programmation.

Toute utilisation de l'informatique s'élabore en deux étapes, dont la confusion diminue l'efficacité et augmente les coûts. La première étape est la conception de l'algorithme de résolution du problème, la seconde la programmation de cet algorithme.

Imaginons que l'on ait assigné à un conducteur de bus la tâche : «prendre trente enfants chez eux et les conduire au musée». Un algorithme pourrait être : ranger par ordre alphabétique la liste des noms des enfants ; aller chercher le premier, puis le second, ainsi de suite jusqu'au dernier ; lorsque tous sont dans le bus, aller vers le musée. Les règles établies dans l'algorithme devront s'appliquer encore le mois suivant, où l'on n'aura que 20 enfants à transporter et où le musée sera remplacé par la piscine.

L'algorithme conçu, on le programme. Dans notre exemple, l'école dispose d'une base de données de tous ses élèves ; ceux qui doivent être emmenés au musée ce matin-là sont sélectionnés selon un certain critère (ils sont dans telle classe, ou ont eu de bonnes ou de mauvaises notes en histoire) : c'est un tri informatique. Ensuite, leurs fiches sont rangées par ordre alphabétique. On connaît l'adresse de chacun, donc la distance entre deux élèves consécutifs. On sait alors bâtir un programme informatique qui sera la feuille de route du chauffeur : à 7 h, il se présente chez Adam, puis à 7 h 03, il sera chez Barnabé (une minute pour charger Adam, deux minutes pour aller chez Barnabé etc.) ; l'arrivée au musée sera prévue, disons pour 7 h 52.

Dans ce processus, la conception de l'algorithme coûte beaucoup moins que la partie de programmation. C'est évident sur notre exemple, parce que l'algorithme se ramène à ranger les noms par ordre alphabétique et mettre les adresses en regard, ce que n'importe qui peut faire en cinq minutes. La programmation est plus complexe : il faut accéder à des bases de données, y faire des opérations, des calculs de distances et d'horaires, et imprimer les résultats sous forme utilisable par

le chauffeur. Cette programmation prend une heure ou deux. L'exemple est trop simple, me direz-vous, et n'est pas significatif. Il est effectivement trop simple, mais il est significatif : la partie conceptuelle, qui relève des mathématiques, est toujours moins coûteuse, en moyenne d'un facteur dix, que la partie programmation, qui relève de l'informatique.

Ainsi la matière grise, la partie «intelligence», coûte moins cher que la partie «développement». Ce qui étonne. Pour la première, il faut résoudre un problème, alors que pour la seconde, il suffit d'écrire un programme d'une simplicité biblique.

Le paradoxe est levé si l'on considère que l'algorithmique relève des mathématiques, une science vieille de 6 000 ans : dans bien des cas, le problème considéré a déjà été étudié et résolu. L'expert sait utiliser les «briques» antérieures. De plus, une méthode mathématique a un caractère absolu : si les hypothèses sont bien celles que l'on a prévues, la conclusion sera celle que l'on attend.

PROGRAMMER EST UN ART

La programmation, au contraire, n'est pas une science, mais «un art». Elle s'élabore lentement en fonction du contexte (Quel type de machine ? Quel système d'exploitation ? Quel langage de programmation ?). De plus, il n'est jamais sûr que le logiciel fera exactement ce que l'on attend de lui, et cela seulement : dans des programmes qui font des centaines de milliers de lignes, voire des millions, comment s'assurer que tel cas n'a pas été oublié ? Que telle instruction n'entre pas en conflit avec telle autre ? Ce fut la situation d'*Ariane V* : une «brique» logicielle, datant d'*Ariane IV*, avait été oubliée dans le programme de guidage, ou plus exactement, on avait omis d'évaluer les conséquences qu'elle pourrait avoir dans une situation spécifique nouvelle.

Cette «validation des logiciels» est un souci majeur car il n'existe pas de méthode infaillible : il faut tester chaque logiciel, en espérant que les tests seront assez

nombreux, et corriger chaque erreur décelée, en espérant qu'il n'y en a pas d'autres.

Pourtant c'est la partie conceptuelle, la partie algorithmique, qui détermine le coût et l'efficacité de l'ensemble du programme ! Reprenons l'exemple de notre bus, et imaginons que nous ayons une contrainte horaire : pour des raisons impératives, tous les enfants doivent être au musée à 7h45, alors que notre méthode précédente ne les y mettait qu'à 7h52. Comme le chauffeur ne prend son service qu'à 7h, quel est l'unique recours du directeur de la Compagnie de bus ? Acheter un bus plus rapide ! Quand on a fixé l'itinéraire et les temps de départ et d'arrivée, l'unique paramètre sur lequel on puisse jouer est la vitesse. Mais un nouveau bus, surtout un bus plus rapide, plus performant, coûte très cher...

Là encore, l'exemple est significatif : si la méthode de travail est fixée, l'unique façon d'améliorer les performances est de remplacer le matériel par du matériel plus élaboré, 10 à 100 fois plus coûteux que l'algorithmie et la programmation réunies ! Il faudra des moteurs plus puissants, des caméras plus sensibles, des asservissements plus élaborés, des circuits plus rapides, bref, payer fort cher, sous forme de matériel, l'imprévoyance dont on a fait preuve au début en adoptant un algorithme simpliste.

Car, simpliste, notre algorithme de départ l'était : ranger par ordre alphabétique est peut-être la première méthode qui vient à l'esprit, mais ce n'est probablement pas la meilleure, en termes de temps de trajet. La «recherche opérationnelle» dispose de bien d'autres méthodes pour relier des points sur une carte, de sorte que le temps total de trajet soit minimal. Demandons à un mathématicien de les rechercher pour nous. Peut-être, selon les contraintes, mettra-t-il une demi-journée ou une journée, qu'importe ? Le programme informatique, en sera fort peu modifié, mais le temps réel de trajet pourra être réduit de 10 ou 20 pour cent. Et nous conserverons notre vieux bus et son chauffeur asthmatique.

La situation est la même en régate. Le fin barreur remontera au vent avec des réglages adéquats de voile et de route, et achèvera la course avec une grande économie de moyens. Le néophyte ne saura pas serrer le vent ; comme il est riche, il acquerra, pour compenser, une voilure plus vaste ou un bateau plus long ; mais il fera davantage de manœuvres, perdra du temps, finira la course au milieu des rires et tout mouillé. La nature punit avec ironie celui qui en méconnaît les lois.

Bernard Beauzamy est PDG de la Société de Calcul Mathématique.

Les inattendus du gène

PIERRE DOUZOU

Le patrimoine génétique est un capital qui travaille au service de la cellule. Le biologiste exploite et corrige les actions du génome.

La transmission de ce que l'on appelle le patrimoine génétique, à l'issue d'un processus de reproduction, n'aboutit pas (et c'est heureux) à des «copies conformes». C'est là le premier inattendu de la génétique. L'homme a d'ailleurs longtemps tâtonné pour expliquer les tours et détours de la génétique, et l'on peut penser que l'homme primitif avait quelque difficulté à associer sexualité et reproduction.

C'est sans doute quand il a domestiqué des animaux jusque-là sauvages et s'est ainsi fait pâtre, que l'homme du Néolithique a pris conscience de cette association et qu'il a alors mis sur elle pour sélectionner et améliorer, voire créer, des espèces animales domestiques. Il l'a sûrement fait par une succession ininterrompue «d'essais et d'erreurs» ou, si l'on préfère, de tâtonnements bien compréhensibles.

En quelques milliers d'années, ce savoir nouveau et de nature empirique s'est répandu sur presque toute la surface de la Terre, l'âge que nous appelons Néolithique s'étant étalé sur des millénaires en fonction du degré d'isolement de continents et de contrées.

C'est également au Néolithique que la domestication de plantes et d'animaux a obligé l'homme à inventer des procédés de stockage sous forme de fermentations dont sont issus le pain et le vin, puis toutes sortes de préparations ayant subsisté jusqu'à nos jours. Il y a eu ainsi une véritable «révolution» dont la base était la génétique expérimentale, puis l'utilisation de microbes «amis» qui permettaient de conditionner les produits.

LA COMPRÉHENSION DE LA REPRODUCTION

Pour autant, l'homme savait peu de choses sur le processus de reproduction et sur les mécanismes de gestation qui se dérobaient à sa vue. Les philosophes grecs, qui nous servent souvent

de référence, étaient avant tout des penseurs et s'ils ont eu l'intuition des mécanismes de la reproduction sexuée comme ils avaient l'intuition de l'existence d'atomes, ils n'avaient pu concrétiser leurs concepts et leurs idées, faute d'outils d'exploration de l'invisible.

Il fallut attendre le XVII^e siècle de notre ère pour que le microscope (invention et outil de riches négociants hollandais fondateurs des fameux «Cabinets de physique») permette de découvrir le spermatozoïde, impliqué dans le processus de fécondation des espèces animales. Ce mystérieux corpuscule flagellé enflamma alors les imaginations, et l'opacité de sa «tête» n'empêcha pas les observateurs de rêver à son contenu : ils pensaient que c'était un «animalcule» et, pour l'espèce humaine, un «homoncule», un modèle réduit, supposé parfait, de l'être à venir... et porté par une mère dont on imaginait mal le rôle dans le développement de l'animalcule en question.

A la différence des reptiles et des oiseaux, l'œuf des mammifères est dissimulé au regard ; à l'époque, aucun moyen n'existait pour établir son existence et, *a fortiori*, sa fonction. D'ailleurs la démonstration ultérieure de sa fécondation et du développement résultant de l'embryon ne fera guère avancer les connaissances sur la génétique en tant que processus de transmission de l'hérédité.

Curieusement, et par un détour inattendu dont la recherche a le secret, c'est l'expérimentation de plants végétaux qui permettra de jeter les bases de la génétique, et ce travail sera le fait d'un moine-jardinier, Gregor Mendel. Cet Autrichien se prend de passion pour les petits pois... et entreprend d'en croiser les plants géants et nains, puis d'observer les caractères, ou «traits», de leurs descendants. Le moine augustin en question pratique un travail de bénédictin et énonce des concepts qui deviendront des lois, encore en vigueur aujourd'hui.

Ces lois expliquent la transmission des caractères héréditaires et l'alternance de traits dominants et récessifs. Fondées sur une expérimentation considérable et sur des calculs rigoureux, elles sont tenues pour intangibles. Mais, à l'époque, les travaux de Mendel sont à peu près ignorés par ses contemporains, entièrement absorbés par les découvertes de Darwin sur l'évolution des espèces. Plus près de nous, les travaux du Russe Lyssenko, qui prétendaient défier les lois de Mendel, ont sombré dans l'opprobre et le ridicule.

LA GÉNÉTIQUE MOLÉCULAIRE

Ce n'est qu'au début des années 1940 que la génétique a reçu un support chimique et, pour mieux dire, moléculaire. Quelques chercheurs, dont l'Américain Morgan, vont attacher leur nom à la découverte principale : les acides nucléiques sont le support matériel de l'hérédité.

Le concept du gène (entité constituée d'ADN) s'impose universellement, et la chimie biologique fait le reste en établissant la composition chimique de l'ADN, molécule géante au même titre que les protéines, ces autres constituants essentiels des organismes vivants. Vers la même époque, Pauling établit la structure des chaînes polypeptidiques constituant les protéines et démontre leur conformation hélicoïdale, puis, au début des années 1950, J. Watson et F. Crick, Langridge, Wilkins et R. Franklin établissent la structure de l'ADN (voir *Les inattendus de la découverte de l'ADN*, par Jean Rossier, *Pour la Science*, janvier 1997). Commence alors une «saga» de l'ADN et, avec elle, l'aventure prodigieuse de la «biologie moléculaire».

La double hélice d'ADN forme des agrégats aux conformations complexes. Elle constitue les gènes qui s'assemblent en chromosomes, suivant des architectures encore en cours d'exploration. Mais l'image de la double hélice a une extraordinaire puissance suggestive. C'est ainsi que Watson et Crick écrivent, dans leur article princeps de *Nature* (1953), que : «Le matériel génétique en question pourrait être de quelque manière recopié.»

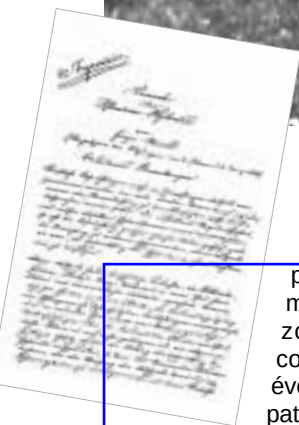
Depuis, il a été effectivement démontré que l'ADN (dont la double hélice peut s'ouvrir à la manière d'une fermeture éclair) se «répliquait» à partir des simples brins, provoquant ainsi la «transcription» du message génétique et de ses traits héréditaires.

L'ensemble des molécules d'ADN (et donc des gènes résultants), que l'on appelle génome, et qui constitue un des composants majoritaires du noyau de chaque cellule, est, en quelque sorte, un «patrimoine» génétique transmissible



Enfin Mendel vint... pour expliquer les lois de la transmission génétique. Moine-jardinier, Gregor Mendel (en haut à droite) étudie l'hérédité

des caractères des plantes dans son jardin d'expérience, encore entretenu aujourd'hui. Les résultats de Mendel sur les caractères récessifs et dominants, dûment publiés, n'ont aucun écho.



par les cellules «germinales» (spermatozoïde et œuf). Ce concept de patrimoine évoque logiquement un patrimoine «familial», un placement de père et mère de famille qui sera transmis par «héritage», selon des modalités fixées par les lois de Mendel. Mais la biologie moléculaire a démontré que, dans chaque cellule, ce patrimoine «est un capital qui travaille». Les gènes qu'il contient peuvent en effet «s'exprimer» en codant la biosynthèse de protéines spécifiques, véritables «dividendes» qui assurent la vie cellulaire.

On a donc admis qu'un gène pouvait, en s'exprimant, produire une protéine, puis on s'est rendu compte du caractère simpliste de ce concept et l'on a conclu que la biosynthèse de nombre de protéines mobilise plusieurs gènes. Quoi qu'il en soit, il est patent que ce que nous appelons le génome est un patrimoine qui œuvre pour le bien de chaque cellule... à moins qu'une altération chimique de ce patrimoine (mutation) n'entraîne la bio-

synthèse de protéines anormales et, par conséquent, une biologie déviante de la cellule, puis du tissu et de l'organe auxquels elle appartient.

L'ADN ALTÉRÉE

Ainsi l'ADN, notre macromolécule «vivante», est altérable. C'est ainsi que, du fait de la respiration (et de l'oxygène qu'elle met en jeu), l'ADN d'une cellule peut subir jusqu'à 10 000 altérations chimiques par heure et que, sans l'existence d'actifs processus de «réparation» de l'ADN, la vie cellulaire et, par voie de conséquence, la vie des organismes aérobies, aurait disparu depuis longtemps.

On notera également que certaines altérations (mutations) de l'ADN peuvent être bénéfiques pour la cellule et l'organisme, qui disposent ainsi d'un mécanisme d'adaptation à des variations de l'environnement et, à terme, d'évolution étendue à l'espèce considérée.

Certaines mutations, discrètes à l'échelle moléculaire, ont des conséquences importantes et héréditaires. Tel est, par exemple, le cas de l'hémophilie,

dont un exemple familial est resté fameux : il s'agit de l'hémophilie apparemment transmise par la reine Victoria d'Angleterre aux descendants mâles des cours royales d'Europe par le jeu des mariages.

Heureusement, les mutations ont un caractère exceptionnel, les processus de réparation de l'ADN s'avérant particulièrement efficaces. À ces mécanismes subtils qui font intervenir des enzymes «réparases», il convient d'ajouter le processus de «suicide cellulaire».

A l'image des bandes magnétiques du fameux James Bond, les «bandes d'ADN» porteuses des «messages» génétiques s'autodétruisent, entraînant une mort cellulaire qui, lors du développement embryonnaire, est dûment programmée. Sans cela, l'embryon pourrait se développer de manière anarchique et conduire à des monstres. Les concepts évoqués ici sont encore relativement récents, et nul doute que les travaux dont ils font l'objet les affineront en conséquence.

Par ailleurs, dans ce domaine comme dans beaucoup d'autres, la vulgarisation des connaissances est un exercice dangereux parce que néces-

INSTITUT DE CALCUL MATHÉMATIQUE



La "Lettre de l'I.C.M."
est un forum
d'informations et de débats
à propos des mathématiques,
de leur rôle scientifique et social,
de leurs orientations
et de leurs débouchés.
Elle s'adresse aux étudiants
à partir de la maîtrise,
aux utilisateurs des mathématiques
et aux chercheurs.
Elle paraît tous les trois mois.

Le numéro 5 est paru.
Au sommaire :

- Editorial, par Bernard Beauzamy
- Les réactions à la Lettre n° 4
- Les bienfaits d'un stage,
par Véronique Noury
- Sciences et Technologie,
indicateurs 1996
- Empirisme et dégénérescence
en mathématiques,
par John Von Neumann
- De nouvelles orientations à
l'Institute for Advanced Study
- Que peut-on attendre
du Représentant
des Mathématiques au Ministère,
par Bernard Beauzamy
- La Noix d'honneur de l'I.C.M.
- Nouvelles brèves
- Page culturelle : "Le plus sot
animal", par A. Huxley

Abonnement annuel :
100 francs pour quatre numéros



Institut de Calcul Mathématique
37, rue Tournefort
75005 PARIS
Tél : 01-47-07-52-92
Fax : 01-48-07-83-97

sairement très simplificateur, à la limite
erroné et caricatural.

Pourtant notre époque hypermédiatisée pousse à la vulgarisation, et les gènes n'échappent pas à cet engouement. Quotidiennement, vous apprenez la découverte d'un gène de ceci ou de cela et, en fait, d'un gène prédisposant son porteur à telle ou telle pathologie physiologique ou comportementale. C'est, qu'en effet, les biologistes pratiquent désormais l'inventaire des génomes et isolent des gènes manifestement associés à telle ou telle fonction biologique, normale ou déviante. Cette identification de «gènes de prédisposition» pourrait être à l'origine d'une médecine «prédictive» destinée à détecter et à prévenir des sujets à risque.

Une telle démarche pourrait, en revanche, avoir des effets pervers : sur les sujets eux-mêmes, vivant alors dans la crainte d'une pathologie, et sur leur entourage familial, professionnel ou administratif. Certains pourraient un jour revendiquer le droit à l'ignorance, comme tant d'autres réclament le droit à l'information. Nous n'en sommes certes pas là, mais il importera d'être attentif. Déjà les intérêts financiers que représentent les tests de dépistage de gènes de prédisposition de certains cancers stimulent la recherche de grands groupes, et les comités d'éthique risquent d'avoir du pain sur la planche dans l'avenir.

LA SOCIÉTÉ SECRÈTE DES GÈNES

On sait aujourd'hui détecter et isoler des gènes d'un génome, mais ce dernier n'en demeure pas moins une sorte de société secrète avec des règles, des codes, des exceptions et, finalement, des rapports inconnus. De ce fait, l'opération dite «de transgenèse», qui consiste à insérer dans un génome des gènes qui lui sont étrangers et qui pourraient lui conférer des propriétés nouvelles, suscite bien des craintes.

Transgenèses animale et végétale sont à la fois des opérations d'avenir et des aventures que certains jugent à risques. Selon ces derniers, l'insertion de gènes étrangers pourrait ouvrir une boîte de Pandore. Une méfiance quasi générale entoure actuellement la perspective (et les débuts de réalisation) des «organismes génétiquement modifiés».

Ne va-t-on pas compromettre l'équilibre subtil (fait de compromis entre gènes) du génome ? Telle plante génétiquement modifiée ne va-t-elle pas essaimer son nouveau patrimoine à d'autres espèces ?

Telles sont certaines des craintes formulées ici et là, et les généticiens

devront convaincre l'opinion de l'innocuité de leurs «créations».

Néanmoins et en dépit des coûts de plus en plus élevés de la recherche en biologie et de la sophistication de ses outils (notamment informatiques), il est probable que l'on n'arrêtera pas «la marche vers le progrès». Nous avons déjà mentionné les tests de dépistage génétique et la transgenèse. La mise au point de ces tests progresse inexorablement, et leur commercialisation est inévitable. En matière de transgenèse, l'industrie des semences, avec le maïs et le soja «transgéniques», fait une entrée fracassante et prépare l'avènement de semences modifiées et enrobées des principes essentiels à la germination. On nous propose déjà des tomates transgéniques, en attendant d'autres denrées, que le consommateur acceptera à la longue, comme il vient de le faire aux États-Unis.

Des questions subsistent. Comment se comporteront les plantes transgéniques quand elles seront cultivées à grande échelle ? Vont-elles former des hybrides avec leurs homologues sauvages, communiquer leur transgenèse à des bactéries ou à des virus, favoriser l'émergence d'insectes résistant aux pesticides ? Il faudra, pour le moins, contrôler de très près les couples plante-gène étranger.

La transgenèse animale n'a encore guère dépassé le stade expérimental, mais elle suscite déjà des réserves. Pour certains, elle est aventureuse et, pour d'autres, ce n'est qu'une technique accélérée d'amélioration des animaux d'élevage. Elle prend néanmoins aujourd'hui un singulier relief avec les techniques «d'humanisation» des cellules, des tissus et des organes d'animaux en vue de transplantations à l'homme. On signale déjà la production d'hémoglobine humaine par des porcs transgéniques (grâce à l'insertion du gène codant pour la biosynthèse), et d'aucuns prédisent un bel avenir à cette branche de la biotechnologie. Nul n'aurait osé imaginer pareille perspective il y a encore quelques années. Encore un inattendu du gène...

Ce gène qui ne saurait échapper à de nouveaux inattendus, car la recherche, c'est avant tout l'imprévisible, ce qui en fait le charme, l'intérêt et parfois le danger.

Pierre DOUZOU est professeur au Muséum d'histoire naturelle et membre de l'Académie des Sciences. Son dernier ouvrage (*La saga des gènes*, éditions Odile Jacob) détaille les thèmes de cet article.

Ce texte est une transcription du débat enregistré, avec Émile Noël, au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture le 12 mars 1997.

Histoire de la contraception

FRANÇOIS CHAST

Des méthodes préventives peu sûres ou contraignantes, à une conception maîtrisée par les hormones.

Que serait aujourd'hui la démographie, la vie familiale et sociale sans la «pilule»? Cet outil de la prévention de la grossesse a-t-il un statut de médicament, les femmes qui l'utilisent n'étant pas malades? Ne serait-ce pas plutôt un témoin de l'attitude de la société à l'égard de la sexualité, d'une sexualité désormais bien séparée de la maternité?

La maîtrise de la conception semble aujourd'hui une ambition raisonnable, mais il aura fallu deux générations pour que le débat sur la contraception s'apaise. D'autres débats socio-pharmacologiques ont fait irruption dans le champ éthique, de sorte que celui sur la contraception semble intégré dans notre «paysage culturel» et dans nos modes de vie.

C'est durant l'Antiquité romaine, sous les règnes de Trajan et d'Hadrien, que fut établie par Soranos d'Éphèse (98-138

de notre ère), la distinction entre contraception – qui prévient la conception – et avortement – qui tue le fœtus. La maîtrise de la fécondité apparaissait déjà une réponse à diverses difficultés d'ordre social ou médical. Des questions culturelles, telles que la prééminence masculine dans certaines sociétés, avaient conduit la Chine de l'empereur Shen Nung (troisième millénaire avant notre ère) à confondre infanticide et contraception : les filles naissant dans les milieux défavorisés étaient vouées à l'infanticide ; ultérieurement, cette pratique ne fut pas exclue du droit romain.

Le christianisme marque un tournant dans la relation entre la société occidentale et la naissance. Une relation souvent passionnelle entre l'Église et la contraception s'est instituée depuis saint Jérôme et saint Augustin. Au IV^e siècle, ces premiers théoriciens de la chrétienté

condamnent tout ce qui peut prévenir la conception ou provoquer la stérilité. En 1588, la bulle papale *Effraenatam* voue à l'excommunication et à la mort ceux qui procurent ou utilisent des «poisons de fertilité».

CONTRACEPTION ET MORALE

Depuis le XIX^e siècle, les recommandations de l'Église ont évolué en fonction de la sensibilité des personnalités occupant le Saint-Siège. Alors qu'en 1853 la Pénitencerie accepte le principe que les époux n'aient de rapports qu'au moment de la période stérile du cycle menstruel, elle condamne, en 1916, l'usage du préservatif et cela pendant plus de 80 ans. Cette attitude, fondée sur le principe du respect de la vie, est confirmée par Jean-Paul II, pour qui Dieu seul est maître de la procréation. Ces options conservatrices du Vatican à l'égard de la contraception n'empêchent pas quelques nuances apportées par l'épiscopat français qui, dès 1968, considère que la contraception n'est pas un «péché grave» et qui, en 1996, juge nécessaire l'emploi du préservatif.

Une confusion importante semble avoir régné dans l'interprétation des relations entre la période des règles et la période de fertilité. Les règles imposent-elles un rythme de fécondité particulier? Ainsi les Mayas évoquaient-ils, non pas un cycle mensuel, mais annuel. En fait, l'abstinence sélective fut un faux-allié et un leurre fréquent.

En 1929, le chirurgien japonais Kyusaku Ogino (1882-1975), propose une méthode consistant à s'abstenir entre le douzième et le seizième jour précédant le début des règles. Contrairement aux idées reçues, la méthode ne faisait pas appel à la courbe des températures. En préconisant d'observer la périodicité du cycle pendant douze cycles afin d'en connaître le rythme moyen, Ogino proposait une approche pratique, où la femme portait toute la responsabilité. Cette méthode imposait aux couples des calculs assez complexes et la variabilité biologique eut raison de cette méthode dès lors que d'autres approches ont été proposées. Selon les statistiques, les échecs atteignaient près de 40 pour cent.

En 1904, le néerlandais Theodor Van de Velde découvre la corrélation entre la courbe thermique matinale et l'ovulation. Cette découverte a été validée a posteriori, lorsqu'on découvrit le rôle de la progestérone, l'hormone de la deuxième partie du cycle menstruel, dans la régulation de la température.



Les humoristes ont brocardé Malthus et sa doctrine. Selon lui, la population croissant plus vite que les ressources, la famine sera inévitable sans limitation volontaire des naissances.

La pratique d'un coït non conventionnel a été une variante de l'abstinence, souvent tue, mais fréquemment pratiquée. Le *coïtus interruptus* est mentionné dans la Bible par Onan, au ^{xiv}^e siècle par Geoffrey Chaucer dans les *Contes de Cantorbéry*, puis au ^{xviii}^e siècle par Casanova dans ses *Mémoires*. En 1830, Robert Owen publie un texte sur cette pratique sous le titre *Physiologie morale*. Le *coïtus obstructus* consistant, au moment de l'éjaculation, à comprimer l'urètre pour provoquer une émission rétrograde a été décrit dans la Chine antique (^{vi}^e siècle), par l'Islam du médecin, alchimiste et philosophe Rhazès (début du ^x^e siècle) et en Inde au ^{xiv}^e siècle. Le *coïtus reservatus* (sans éjaculation), qui consiste à retirer le pénis de la cavité vaginale avant l'orgasme, a été proposé par Noyes, aux États-Unis, vers 1850.

CONTRACEPTION LOCALE

L'énumération des ingrédients utilisés depuis l'Antiquité pour empêcher la formation et le développement de l'œuf serait fastidieuse, tant les solutions imaginées ont été aussi variées qu'insolites. On peut retenir quelques tendances. La première consista à reproduire, dans le cadre d'une contraception, les principes généraux de la thérapeutique visant à chasser d'un corps malade les esprits qui pouvaient s'y abriter. La pharmacopée excrémentielle était alors un principe thérapeutique constant. Les papyrus égyptiens, l'*Histoire naturelle* de Pline foisonnent d'exemples de cette nature, mais des solutions plus rationnelles ont été proposées, y compris par les auteurs les plus anciens.

Ainsi le *Manuscrit de Ebers* (un papyrus médical rédigé vers 1550 avant notre ère, et découvert, en 1873, par l'égyptologue allemand Ebers) propose-t-il l'emploi de gomme d'acacia ou gomme arabique. Les physiologistes modernes ont montré qu'en fermentant, elle produit de l'acide lactique, inhibiteur de la migration des spermatozoïdes vers les trompes. Les Égyptiens avaient raison. Heureux hasard ? Coïncidence fragile ? Observation raisonnée ? Nul ne le sait.

La conception d'obstacles physiques empêchant le cheminement du sperme vers l'utérus a offert à l'imagination des gynécologues d'innombrables alternatives. Soranos proposait l'emploi de pessaires reliés à l'extérieur par une fine cordelette, des tampons de charpie servant de préservatif mécanique pour la femme. Conscient des limites du dispositif,

D'où vient le condom ?

Quelle est l'étymologie du mot condom ? Le mot apparaît pour la première fois dans la littérature sous la plume de Daniel Turner, en 1717. En est-il l'inventeur ? Vient-il du nom de Charles Condom, réputé médecin à la cour de Charles II, mais dont on n'a pas retrouvé la moindre trace ? S'agit-il de l'accusatif de *condus*, qui signifie protection en latin ? Ou encore est-ce un avatar du mot *Kendu*, récipient confectionné au moyen de l'intestin d'un animal pour y emmagasiner le blé, la semence ? Les appellations de l'objet

seront nombreuses. En 1820, apparaît le terme de « redingotes anglaises » préparées avec une portion de l'intestin d'agneau, de mouton ou de veau. Cullerier lui décerne un satisfecit avec l'expression de *capote de santé*. Bien d'autres seront adoptés, tels *french baudruche*, gants de dames, peau divine, chemisette, avant que le monde anglo-saxon ne s'en tienne au condom initial et que les francophones n'adoptent officiellement « préservatif », cantonnant « capotes » à une vulgarité troupière.

Il envisageait de doubler la barrière physique d'un dispositif chimique mélangeant gomme, miel et céruse (du carbonate de plomb). Une variante consistait à utiliser des bouchons de laine imprégnés d'huile et de miel. Parmi les substances considérées comme contraceptives, l'alun de potassium et le natron (carbonate de sodium) figuraient en bonne place. Les médecins arabes comme Rhazès et Avicenne (980–1037) portaient une attention particulière au saule, qu'ils utilisaient fréquemment : arbre sans fruit, il semblait tout naturellement destiné à cet usage. En Extrême-Orient, les *misugami*, papiers de soie appliqués sur la muqueuse vaginale, jouaient le même rôle.

En Europe, le principe des « barrières » fut aussi employé. Les paysannes hongroises utilisaient des tampons constitués de cire d'abeille. Dans sa *Philosophie dans*

le *boudoir*, le marquis de Sade évoque l'emploi d'éponges imprégnées de cognac dans les milieux libertins de la fin du ^{xviii}^e siècle. L'emploi du sulfate de quinine comme contraceptif local se répand au milieu du ^{xix}^e siècle. Charles Knolton (1800–1850) préconise l'emploi de solutions astringentes (thé vert, alun, etc.).

Le diaphragme est proposé en 1891 par Wilhelm Mesinga et son usage se répand lors de la mise sur le marché des premiers spermicides. Les préservatifs dont l'usage fut longtemps contesté, constituèrent l'autre contraception locale. Leur qualité resta médiocre tant que la technique du caoutchouc ne s'améliorait pas. C'est en boyaux d'animaux que les premiers préservatifs ont été confectionnés. Certes, Gabriele Fallopio (1523–1562) avait proposé l'emploi d'une pièce de lin dans le cadre de la prévention antisyphilitique, mais le condom semble bien être né au Royaume-Uni, et les controverses sur l'origine du mot et ses appellations successives permettent d'évaluer la fragilité de son essor.

PROGRÈS EN PHYSIOLOGIE

L'idée que l'on puisse modifier la conception en administrant des substances médicamenteuses ou toxiques est très ancienne. Il paraît pourtant difficile de distinguer, alors, la préparation contraceptive de la prescription abortive. Au Moyen Âge, il est fait référence aux breuvages contraceptifs et à l'avortement. Tant que l'on ignore les mécanismes de la reproduction, on ne peut espérer maîtriser la conception, et il faut attendre 1677 pour que le naturaliste hollandais Antonij van Leeuwenhoek (1632–1723) découvre les spermatozoïdes, grâce au microscope qu'il avait construit.



Divers dispositifs vaginaux de contraception : plusieurs bouchons cervicaux dont un recouvert d'éponge (en bas à droite) et un préservatif.

En 1865, James Marion Sims (1813-1883) publie un ouvrage où il dévoile les circonstances de la fertilité. Précurseur, Sims ne sera pas compris des milieux académiques, et il faudra une cinquantaine d'années pour que soient assimilées trois informations capitales : quelle est la nature du sperme ? Quelle est sa fonction ? La pénétration du sperme dans l'utérus est-elle nécessaire à la fécondation de l'ovule ? Sims établit par ailleurs une distinction entre impuissance et stérilité. Toutefois, la contraception n'entrera dans sa phase endocrinologique que lors de la découverte des hormones ou, du moins, du principe de leur sécrétion.



Le premier centre britannique de planning familial a été fondé à Londres, en 1921, par Mary Stopes.

On évoque souvent le nom de Charles-Édouard Brown-Séquard (1817-1894) comme celui du fondateur de l'endocrinologie moderne. Il montre que des extraits d'organes animaux peuvent, après avoir été injectés à un autre animal, provoquer les effets attribués à cet organe. Ainsi il injecte des extraits ovariens de truies à des patientes ovariectomisées. Il tente de traiter la sénilité masculine par des extraits testiculaires.

En 1927, l'Autrichien Haberlandt montre qu'un extrait ovarien de lapines gravides déclenche une stérilité temporaire : cet extrait contient «quelque chose» qui bloque la conception. L'idée d'une contraception pharmacologique est née.

LES DÉBUTS DE LA CONTRACEPTION ORALE

C'est aux États-Unis que naquit le planning familial, en 1923, et que les premiers norstéroïdes furent mis sur le marché, en 1957. Faut-il voir en Malthus le père fondateur de la contraception ? L'idée d'une contraception était-elle sous-jacente à sa proposition visant à restreindre la fécondité d'un couple pour des raisons économiques ? Pour Freud, un siècle plus tard, «en théorie, ce serait un des plus grands triomphes de l'humanité si l'on pouvait transformer l'acte responsable de la procréation en une activité délibérée, planifiée». Les mouvements néomalthusiens allaient conjuguer leurs efforts avec ceux du féminisme.

Parmi les pionnières figure l'Anglaise Mary Stopes (1880-1958), qui crée la première *Mothers' clinic*, à Londres. Sa doctrine conjugue le culte du bonheur du couple et d'une sexualité féminine retrouvée avec l'intérêt d'une limitation des naissances dans les milieux ouvriers.

Margaret Sanger, quelque peu rivale de Mary Stopes, est à l'origine du «contrôle des naissances». L'impulsion que ces deux militantes donnent au planning familial a tant de poids que bon nombre d'idées reçues, y compris dans les milieux médicaux les plus traditionalistes, voire au sein des milieux religieux, sont battues en brèche. La contraception est alors essentiellement fondée sur l'emploi de spermicides ou de diaphragmes.

Dans les années 1920, les découvertes d'hormones se succèdent : en 1923, Edgar Allen et Edward Doisy isolent l'œstrine ; en 1929, George Corner découvre la progestérone et Guy Marrian le pregnanediol ; en 1931, Adolf Butenandt l'androstérone et, en travaillant sur cette hormone sexuelle mâle, il jette les bases sur lesquelles les chimistes s'appuieront pour préparer les premiers contraceptifs oraux destinés aux femmes. Enfin, en 1936, l'Américain Donald MacCorquodale produit l'estradiol, une hormone ovarienne. Ces travaux sont mis à profit par les laboratoires Schering, à Berlin, qui obtiennent, sous la direction d'Inhoffen, le 17α -étinylestradiol, bien plus actif que l'estradiol naturel.

Les premières tentatives de mise au point d'une pilule contraceptive datent du début des années 1950, et Gregory Pincus (1903-1967), stimulé par Margaret Sanger, commence un programme de recherches à la *Fondation Worcester*, qu'il dirige à Boston. Il cherche à édifier une méthode contraceptive hormonale fondée sur la physiologie ovarienne pendant la grossesse. Durant la grossesse, l'ovulation cesse, ce qui peut être lié à l'augmentation de la sécrétion de progestérone : cette hormone pourrait ser-

vir de «contraceptif naturel». Afin de tester cette hypothèse, Pincus et Min Chuey Chang administrent des doses élevées de progestérone à des lapines : l'ovulation est interrompue. Pincus administre du stilbestrol en première partie du cycle, puis de la progestérone au cours de la seconde partie. Cette séquence suspend la survenue des règles. Pincus préconise l'emploi de progestérone pendant trois semaines, et il suspend le traitement pour déclencher les règles et reprend le régime progestatif au cinquième jour. Hélas, l'expérience n'est guère concluante : 15 pour cent des femmes traitées continuent à avoir un rythme d'ovulation normal.

On ignorait alors que la progestérone, administrée par voie orale, est quasi inactive. On se tourne alors vers les progestatifs, des dérivés de la testostérone (hormone mâle), que l'on traite pour lui faire perdre ses propriétés androgéniques, et pour que son activité biologique soit maintenue, voire augmentée quand elle est absorbée par voie orale. En 1939, le chimiste australien Arthur Birch synthétise la 19-nortestostérone, mais le premier progestatif actif par voie orale, la noréthistérone, naît le 15 octobre 1951, synthétisé par George Rosenkrantz et Carl Djerassi, au sein de la filiale mexicaine des Laboratoires *Syntex*.

DES ESSAIS CLANDESTINS

L'équipe de Franck Colton, des laboratoires *Searle*, entreprend de synthétiser une autre série de dérivés de la progestérone. Tous ces travaux sont réalisés dans un climat de méfiance absolue de la part de la présidence de la firme qui, très conservatrice, ne veut rien savoir de la contraception orale. Il faut user d'un subterfuge : à leur insu, les laboratoires *Searle* sont les promoteurs du premier essai clinique d'un contraceptif oral chez la femme.

On y teste le norétynodrel, le plus actif des progestatifs, dépouvé d'activité androgénique. Les premiers essais sont difficilement interprétables, en raison d'une contamination chimique par un puissant estrogène, le 3-méthyléthynylestradiol. Sans le savoir, Pincus avait étudié une association estro-progestative. Sous le nom de mestranol, cet ester sera, par la suite, effectivement adjoint au norétynodrel à très faibles doses, car il permet de régulariser les règles. Sur les 221 femmes mariées recevant

l'association, aucune n'eut de grossesse pendant la période de l'étude, sauf celles qui avaient interrompu le traitement.

D'abord présentée comme un traitement des troubles menstruels, l'association des deux stéroïdes fut commercialisée en 1959 aux États-Unis. L'année suivante, l'indication de «contraception» était approuvée. La concentration fut diminuée de moitié lors de la commercialisation de l'Enidrel® en France. Au fil des ans, une course au mini-dosage fut lancée. La recherche du «naturel» est restée une obsession constante des pharmacologues de la contraception. Recherche paradoxale, tant est artificielle la recherche de l'infertilité.

À partir de 1970, les pilules devaient contenir moins de 0,05 milligramme de l'estrogène retenu, l'éthinylestradiol. Le dosage était suffisant dans la mesure où sa dégradation par le foie est très faible, contrairement aux dérivés naturels. Il s'agissait des pilules normo-dosées. Les «mini-pilules» ne devaient contenir que 0,03 milligramme d'estrogène. Il y avait là de quoi minimiser les risques potentiels qui alimentaient la chronique. Les trois millions de femmes françaises qui, à l'époque, prenaient la pilule avaient une vingtaine de spécialités contraceptives à leur disposition.

CONTRACEPTION ET LÉGISLATION

Régulièrement condamnées au XIX^e siècle, les méthodes contraceptives virent leur emploi limité aux classes sociales les plus aisées. Jusqu'en 1920, la répression qui entourait l'avortement et les pratiques abortives donna à la contraception un sens très péjoratif. Il faudra attendre encore plus de 20 ans pour que les femmes puissent parler à peu près librement de la contraception, malgré des discours religieux généralement hostiles. C'est avec le planning familial que la contraception passa de la prouesse pharmacologique à l'avancée sociale. La première pilule fut commercialisée en France, en 1964, avec l'étiquette «médicament du blocage de l'ovulation» sous le nom d'Anovlar®.

Cette nouvelle maîtrise de la conception permit de dissocier sexualité et fécondité, favorisant ainsi l'entrée des femmes dans le monde du travail, dans les milieux culturels et, à un moindre degré, dans la vie politique. En 1967, fut votée la loi Neuwirth, du nom du député gaulliste de la Loire qui s'acharna, malgré les fortes résistances des milieux conservateurs, à faire évoluer mentalités et législation ; cette loi fut complétée en 1974, sous l'impulsion de Simone Veil, autorisant l'importation, la fabrication et la vente en

Et les hommes ?

Si la régulation des naissances est restée pendant longtemps le problème des seules femmes, une prise en charge de la contraception par le couple semble être à nouveau un élément du débat. À la fin des années 1950, un médecin de la province de Xiang Zhu, en Chine, constata la stérilité de couples qui consommaient de l'huile de coton. Les hommes qui consommaient cette huile ne fabriquaient pas de spermatozoïdes. L'institut pharmaceutique

de l'Académie des sciences médicales chinoises pratiqua des essais concluants sur l'animal avec le gossypol, un constituant de la graine de cotonnier. Les essais chez l'homme, commencés en 1972, se poursuivirent jusqu'en 1978. La dose minimale contraceptive détruisant la fécondité des spermatozoïdes n'avait pas d'effets délétères sur la production de testostérone. Seuls ses effets secondaires, fatigue et anorexie, limitent l'intérêt du gossypol.

pharmacie des produits définis comme contraceptifs. Le médecin pouvait les prescrire pour un an et le pharmacien les délivrer pour trois mois. Cette loi reconnaissait officiellement l'intérêt des centres de planning familial. Enfin, il était prévu que les mineures pourvues d'une autorisation parentale puissent bénéficier de ces nouvelles prescriptions.

La psychologie culpabilisée d'une «prévention permanente de la grossesse», le patriarcat des sociétés modernes, une éducation insuffisante des filles à l'égard de leurs droits sont autant de facteurs qui se sont bien souvent opposés au progrès scientifique. Pourtant, la dissociation de la sexualité et de la conception avait suscité l'espoir de maîtriser la démographie galopante dans le Tiers Monde ; cet objectif était apparemment utopique, puisque la population mondiale a doublé au cours des 25 dernières années.

Le principe de l'utilisation d'un contraceptif dont la base pharmacologique est un progestatif de synthèse demeure plus que jamais d'actualité. Différents dérivés comme la drospirenone des Laboratoires Schering ou des stéroïdes dérivés du spironométhylène ont fait l'objet de dépôts de brevets. Des implants sous-cutanés libérant dans la circulation générale des quantités faibles, mais stables, de progestatifs pendant des mois ou des années sont à l'étude. Les contraceptifs postcoïtaux, la «pilule du lendemain», fortement dosés en estrogènes seuls ou combinés avec un progestatif, réduisent le risque de grossesse de 90 à 95 pour cent.

Quant aux agonistes de la progestérone, telle la liletristone, ce sont des analogues de la mifépristone, le RU 486, contraceptif mis au point par Étienne Émile Beaulieu, avec les Laboratoires Roussel : ils bloquent l'action de l'hormone au niveau de l'endomètre. La pharmacologie contraceptive s'est aussi développée avec des dérivés non stéroïdiens. C'est le cas de l'ormeloxifène, qui empêche la nidation de l'œuf fécondé.

Les perspectives de développement de contraceptifs utilisables par l'homme sont toujours aussi modestes. Si la vasectomie chirurgicale fut très populaire dans les années 1950-1960, son emploi est plus confidentiel aujourd'hui, notamment en raison d'un lien évoqué avec le développement plus fréquent de cancers de la prostate dans la population ayant subi l'intervention. Aujourd'hui, les recherches s'orientent plutôt vers les inhibiteurs de la spermatogenèse.

Enfin, l'immunothérapie de la fertilité est un axe de recherche, et divers industriels coopèrent au développement d'un «vaccin antigrossesse». Cette voie de recherche porte sur l'inhibition de la sécrétion de certaines enzymes ou du transport du sperme. L'Organisation mondiale de la santé évalue en Inde un vaccin qui entraînerait le rejet de l'œuf fécondé. S'il est efficace et économiquement abordable, ce vaccin serait une solution pour les femmes des pays en «surnatalité». Toutefois, un tel vaccin ne serait acceptable que si sa durée d'activité ne risque pas de compromettre une grossesse ultérieure et un retour à la fertilité.

Expérimentale et plus ou moins efficace, la contraception est aujourd'hui maîtrisée. C'est aussi un enjeu de santé publique, puisqu'elle devient l'occasion d'une prévention des risques, par exemple cardio-vasculaires, pour la femme et d'une médecine anténatale plus efficace pour l'enfant à naître.

François CHAST dirige le Service de pharmacie et de pharmacologie de l'Hôtel-Dieu. Il est administrateur de la Société d'histoire de la pharmacie et membre de l'Académie nationale de pharmacie.

V.C. MEDVEI, *The History of Clinical Endocrinology*. The Parthenon publishing group, Lancs, New York, 1993.

F. CHAST, *Histoire contemporaine des médicaments*, La Découverte, 1995.

Dépotoir médiéval

HERVE THIS

A la recherche de l'alimentation du Moyen Âge.

Que mangeait-on au Moyen Âge ? Pas de tomates, pas d'aubergines, pas de pommes de terre, pas de dindes, puisque l'Amérique était encore inconnue. Mais des lapins, des carpes, des navets, des carottes ou des poireaux, par exemple, puisque ces denrées sont indigènes. Les paysans mangeaient-ils comme les nobles ? Quelle était la part des viandes, des légumes, des laitages ou des fruits dans l'alimentation de chaque classe sociale ? Peu de sources historiques, écrites ou figurées, permettent d'éclairer les débuts de notre cuisine : le premier livre de cuisine écrit en français, le *Viandier*, de Guillaume Tirel, dit Taillevent, ne date que de 1319, et l'auteur ne montre que ce qu'il cuisinait à la cour du roi Charles V. Il est douteux que les paysans aient utilisé les épices coûteuses qu'il mettait dans ses plats.

A la recherche de données précises sur l'alimentation médiévale, les archéologues font littéralement les poubelles de l'histoire : récemment ils ont achevé l'analyse du dépotoir de la Grosse Tour de Bourges. Fouillé entre 1985 et 1988, avant la construction de l'hôtel de ville de Bourges, ce dépotoir était une fosse maçonnée qui servait à la fois de fosse d'aisance et de poubelle. Elle était à la base d'une des tours de la forteresse de la Grosse Tour, édifée par Philippe Auguste vers 1189 et détruite en 1653.

Qui occupa cette tour ? C'est une des premières questions étudiées par Cécile Callou et M.-C. Marinval-Vigne, du Laboratoire d'anatomie comparée du Muséum de Paris, et par C. Monnet, du Service archéologique de Lille.

La réponse est venue, indirectement, de l'analyse de 9 000 restes osseux ont été recueillis par tamisage dans les couches les plus anciennes, puis par prélèvement simple dans les couches plus récentes. Près de la moitié de ces ossements proviennent de mammifères, 37 pour cent d'oiseaux, 15 pour cent de poissons, et une toute petite proportion d'amphibiens ou d'invertébrés.

Interprétons ces recensements en les rapprochant d'études de F. Audoin-Rouzeau, qui a montré que les populations du Moyen Âge consommaient aussi bien des espèces domestiques que des espèces chassées ou pêchées, et que le milieu seigneurial se distinguait nettement des milieux urbains ou ruraux par la consommation importante de la viande de porc, qui se conserve et constitue une remarquable prévention contre les famines et les pénuries (la principale viande consommée était toutefois celle du bœuf ; le mouton était peu consommé). D'autre part, on sait que, dans le milieu urbain, le bœuf était largement majoritaire, devant les caprinés et le porc. Enfin, dans le milieu rural, où les données sont plus rares, on mangeait du bœuf, mais très peu de porcs : ces derniers ne profitaient pas à ceux qui les élevaient.

Dans la fosse de la Grosse Tour, on a trouvé une proportion stable de coqs et d'oies, ainsi que du paon (animal de prestige) : apparemment la tour fut donc occupée par des nobles, au moins pendant un certain temps. La consommation d'animaux chassés, un bon indicateur social, reste faible par rapport aux animaux

élevés : dans les couches datant du XII^e et XIII^e siècles, on n'a pas trouvé de restes de gibier à poil, mais les reliefs de grands oiseaux de prestige, tel que le héron, le cygne et la grande outarde ; puis, au début du XIV^e siècle apparaissent des grues, des lièvres et des cerfs ; au XVI^e siècle, on trouve toutes les grandes espèces de gibier à poil, ainsi que la grue et le butor ; et, enfin, aux XVI^e et XVII^e siècle, le grand gibier est moins consommé, mais on trouve des restes de lièvre, de cerf, de grande outarde et de grue.

L'analyse des ossements d'oiseaux est intéressante, parce qu'elle précise les livres de cuisine : ces derniers mentionnent les coqs, oies, canard, perdrix et pigeons, qui ont été trouvés, mais ils font état de « menus oiseaux » ; les fouilles ont montré que ceux-ci étaient des moineaux, merles, grives et alouettes (les moineaux, très fréquemment consommés, étaient capturés à l'aide de pots à moineau en céramique servant de nichoir).

Les ossements ne sont les seuls trésors de ces poubelles : les végétaux, également, ont été déterminés par Marie-Pierre Ruas, du CNRS de Toulouse, qui a étudié 668 restes de graines et de semences obtenus par tamisage. Elle a établi que les occupants de la Grosse Tour avaient consommé du blé tendre, du seigle, de l'orge vêtue et de l'avoine, ainsi que des pois et des féveroles : concassées, ces céréales et légumineuses servaient pour la préparation des soupes et des bouillies. La graine de fenouil était un ingrédient aromatique ordinaire, ainsi que les raisins ; mais les pommes, les framboises, les mûres, les baies de sureau noir, les diverses variétés de prunes, les cerises et les pêches, probablement obtenus dans les jardins péri-urbains, étaient l'apanage des classes sociales élevées.

Ces études résolvent en outre le difficile problème des multiples appellations des animaux ou des plantes (au Moyen Âge, les poissons, par exemple, étaient désignés différemment selon les régions, voire selon l'état de maturité des animaux). On n'a pas la certitude de disposer de tous les restes, mais l'étude de la Grosse Tour a démontré que la méthode du tamisage permettait une analyse bien plus précise que la simple collecte de restes identifiables : dans les couches tamisées, antérieures au XIV^e siècle, on a trouvé des poissons, des rongeurs et de petits oiseaux qu'on ne trouve plus ensuite.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 24 mars 1997, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Vue aérienne de la Grosse Tour de Bourges (dans l'angle, à droite), avant la construction de l'hôtel de ville. Le dépotoir fouillé est à sa base.

L'espérance nulle du spéculateur

CHRISTIAN WALTER

Le spéculateur veut tirer parti des hausses non légitimes du marché, non liées à l'activité économique. Il joue comme au casino.

L'affirmation du titre, péremptoire, signifie que le spéculateur ne peut gagner, ou que, si certains spéculateurs gagnent, d'autres perdent. Gains et pertes s'équilibrent de façon aléatoire, comme à pile ou face. Une telle phrase lapidaire aurait-elle été proférée par un moraliste contemporain, exaspéré par les bulles spéculatives qui abondent dans le monde de la finance, par la déraison qui se serait emparée des marchés financiers, par une sphère financière qui ne reflète plus l'économie réelle? Nous serions rassurés : les spéculateurs ne gagneraient rien en Bourse. La morale serait sauve...

Or, cette affirmation a presque un siècle : elle est le fait de Louis Bachelier, dont nous avons évoqué dans la précédente chronique l'extraordinaire fécondité intellectuelle pour le développement futur de la théorie financière. Mais alors, si Bachelier avait raison, pourquoi spéculer? Pour quelle raison observe-t-on aujourd'hui autant de prises de positions dites «spéculatives» sur les marchés? Ceux qui agissent ainsi se trompent-ils tous collectivement en espérant réaliser des gains rapides et faciles?

Dans sa thèse de 1900, Bachelier considère les variations boursières comme les résultats de tirages aléatoires. Des mouvements boursiers, «il est dès lors impossible d'en espérer la prévision mathématique». Il observe que «les opinions contradictoires relatives à ces variations se partagent si bien qu'au même instant les acheteurs croient à la hausse et les vendeurs à la baisse». Bachelier postule ainsi que la prévision mathématique du cours de Bourse de demain se trouve hors de portée de la science. Il remplace donc la recherche de la prévision par celle de la probabilité. Mais de quelle probabilité? Écoutons Bachelier : «On peut considérer deux sortes de probabilités : 1) La probabilité que l'on pourrait appeler mathématique, c'est celle que l'on peut déterminer *a priori*, celle que

l'on étudie dans les jeux de hasard ; 2) La probabilité dépendant de faits à venir est, par conséquent, impossible à prévoir de façon mathématique. C'est cette dernière probabilité que cherche à estimer la spéculateur : il analyse les raisons qui peuvent influencer sur la hausse ou sur la baisse et sur l'amplitude des mouvements. Ses inductions sont absolument personnelles, puisque un autre acteur a nécessairement l'opinion inverse».

Développant son raisonnement sur la symétrie des opinions entre acheteurs et vendeurs de titres, Bachelier en conclut : «il semble que le marché, c'est-à-dire l'ensemble des opérateurs, ne doit croire à un instant donné ni à la hausse, ni à la baisse, puisque, pour chaque cours coté, il y a autant d'acheteurs que de vendeurs».

De quel cours s'agit-il? Aujourd'hui, sur les marchés financiers, on distingue deux types de cours. Des cours relatifs aux variations en capital seul, par exemple les cours des obligations «pied de coupon», c'est-à-dire sans le coupon qui y est attaché, ou les indices des marchés d'actions, mais sans dividende réinvesti. Et des cours relatifs aux variations en capital aug-

menté du dividende ou des intérêts, par exemple des obligations avec leur coupon couru, ou des indices d'actions avec dividende réinvesti. Bachelier ne considère que les variations en capital seul, sans les dividendes ou coupons obligataires. Il appelle ce cours «pied de coupon» (en vocabulaire contemporain), le cours «vrai».

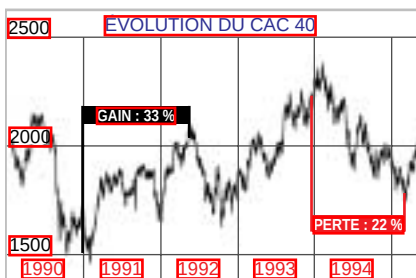
Appliquant le raisonnement précédent sur le cours vrai, il postule que, «par considération des cours vrais, on peut dire : le marché ne croit, à un instant donné, ni à la hausse, ni à la baisse du cours vrai». Le cours vrai a autant de chance de monter que de baisser. L'espérance de gain sur le cours vrai est nulle.

GAINS IMPORTANTS MAIS TEMPORAIRES

Pour Bachelier, le spéculateur n'investit pas en Bourse pour un placement à long terme, opération qui lui assurerait de recevoir les dividendes des actions ou les coupons des obligations, en somme le «juste» revenu de son investissement. Selon Bachelier, le spéculateur ne s'intéresse qu'au profit rapide et non lié au revenu du titre, c'est-à-dire à la variation en capital seul, au cours vrai. Le spéculateur espère une hausse non légitime (car non liée aux revenus, c'est-à-dire aux produits de l'économie réelle) du cours vrai. Or, par définition, l'espérance mathématique de gain sur le cours vrai est nulle. C'est en cela qu'il peut alors dire, en considérant la variation des cours vrais, «l'espérance mathématique du spéculateur est nulle».

Ainsi Bachelier définit la suite des gains et des pertes du spéculateur comme les résultats d'un jeu équitable. Les gains et les pertes successifs sur le cours vrai se compensent inexorablement au cours du temps, de sorte que, après un certain temps, notre spéculateur aura, comme au jeu de pile ou face, ni plus ni moins gagné que s'il n'avait pas joué. Pour le spéculateur de Bachelier, la Bourse est assimilable à un jeu de hasard, à un casino.

Qu'en est-il des résultats intermédiaires de la spéculation? C'est la question des sommes partielles des jeux équitables. Les gains de la spéculation convergent-ils vers l'espérance mathématique (nulle)? Pour Bachelier, la réponse est positive, car il assimile la Bourse à un jeu de pile ou face. Malgré une certitude de passer par zéro un nombre infini de fois, les fluctuations des résultats partiels peuvent être arbitrairement grandes. Notre spéculateur finira certainement pauvre, mais en étant devenu auparavant, et très vraisemblablement, très riche. Nous le savions, en Bourse, il faut savoir s'arrêter à temps.



Le CAC 40 est un indice de prix (capital seul), assimilable au «cours vrai» de Bachelier. Entre 1990 et 1995, il fluctue autour de 2 000. Les oscillations de l'indice évoquent les fluctuations des sommes partielles d'un jeu équitable. Mais, pour ceux qui ont acheté à 1 500 et revendu à 2 000, le gain est de 33 pour cent. Si la moyenne de la performance est nulle, les résultats intermédiaires sont nettement différents de zéro. Qu'en aurait pensé Bachelier?

Maillet paléolithique

L'usage retrouvé d'un galet brut.

Frapper sur un objet avec une pierre est une idée ancienne : les premiers marteaux ont plus d'un million d'années. L'idée de frapper avec un maillet sur un burin pour graver ou percer un objet semble plus récente : les premiers maillets préhistoriques connus sont des galets non taillés, que les hommes ont commencé à utiliser il y a 40 000 ans.

Outre des silex taillés, les hommes préhistoriques utilisaient comme outils des galets bruts. Ignorés des premiers préhistoriens pour leur aspect banal, certains servaient de molettes, de broyeurs, de meules ou de billots. L'usage d'un petit galet arbitrairement nommé "compresseur" restait toutefois inconnu.

Les "compresseurs" sont des galets plats et allongés, longs d'une dizaine de centimètres, en roche à grain fin et pas trop dure tels que schiste, marne, ou calcaire. Sur une ou deux des extrémités de leurs faces planes, de nombreuses traces d'impacts, souvent excentrées vers un côté du galet, tendent à former une cupule. La large répartition géographique et chronologique de cet outil à partir du début du Paléolithique supérieur, il y a 40 000 ans, indique qu'il appartient au fonds commun de l'outillage. Servait-il à retoucher les lames de silex, à repousser l'aiguille à coudre à la manière d'un dé, comme enclume ou comme billot ?

Nous avons testé ces utilisations avec des galets de forme et de matière première identiques à celles des galets préhistoriques. Nous avons écarté d'emblée les fonctions de billot et d'enclume : un support doit être tendre sous peine d'abîmer la pointe de l'outil en silex lors des contacts. Le galet s'est révélé impropre à d'autres usages : trop petit et trop léger pour débiter du silex, trop mince et trop fin pour le retoucher. Enfin, quand on utilise un compresseur pour retoucher une lamelle à dos, régulariser l'arête d'un bloc de silex, détacher des chutes de burin, ou pousser un poinçon ou une aiguille, les traces d'usure que l'on obtient ne correspondent pas à celles que l'on observe sur les galets préhistoriques.

Une seule hypothèse a passé le test expérimental : l'utilisation de ces galets



De gauche à droite : Les galets utilisés sur Pacilly au Supérieur, puis éditions.



Ce galet en schiste, découvert dans la grotte d'Isturitz (Pyrénées-atlantiques), porte des traces d'impact. Elles ont été produites il y a 17 000 ans. On obtient des traces analogues en utilisant un galet de même nature comme maillet, pour écorcer du buis avec un burin en silex, par exemple (à gauche).

en maillets par percussion sur un burin pour le travail de matières dures animales. Toutes les variantes de cet usage ont été testées et ont confirmé cette hypothèse. Plus précisément, ces galets étaient réservés à un travail de précision à très petits coups, l'objet buriné étant plutôt maintenu transversalement par rapport à l'utilisateur. On pense à la sculpture sur bois de renne ou sur ivoire, au percement de boutons dans de la peau ou à l'amorce du creusement d'un coquillage pour en faire un élément de parure.

L'environnement archéologique de cet outil confirme cet usage. Il semble apparaître à l'Aurignacien, il y a environ 40 000 ans, au moment où se développe le travail de l'os et de l'ivoire. Il se raréfie il y a 22 000 ans, puis redevient très abondant dans certaines régions il

y a 17 000 ans, jusqu'au début du Néolithique. Cette variation concorde avec l'importance du travail des matières dures animales aux différentes époques.

En outre, on a retrouvé dans la grotte d'Isturitz, dans les Pyrénées-atlantiques, et dans quelques autres sites de fréquentes associations entre ces maillets et des burins, outils complémentaires. Des objets façonnés en os ou en ivoire ou des coquilles perforées avec des traces de façonnage rappelant celles obtenues expérimentalement, quoique rares, existent aussi en Europe occidentale et orientale. De plus, la technique du burinage indirect a été identifiée ailleurs, sur des harpons paléo-esquimaux et sur du bois de cerf travaillé par des peuples protohistoriques.

Sophie A. de BEAUNE, Laboratoire d'ethnologie préhistorique, CNRS

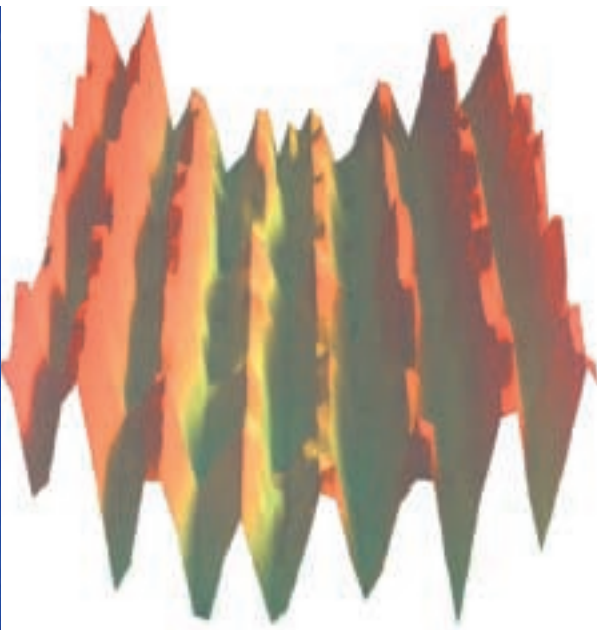
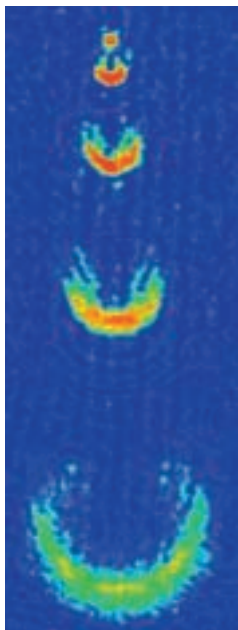
Laser à atomes

Première émission d'atomes dans un état cohérent

Pourquoi les faisceaux lasers concentrent-ils la lumière dans une direction de propagation et voyagent-ils sur de grandes distances ? Parce qu'ils sont constitués de photons de même énergie qui se déplacent en groupe, dans un état cohérent, c'est-à-dire que les photons sont représentés par une seule onde électromagnétique. Wolfgang Ketterle et ses collègues de l'Institut de technologie du Massachusetts, ont montré qu'on pouvait émettre des

ondes de matière cohérentes, analogues à celles des lasers : ils ont produit huit paquets d'atomes de sodium dans un état cohérent, réalisant ainsi le premier laser à atomes.

En vertu de la dualité onde-corpuscule, on associe à une particule une onde de longueur inversement proportionnelle à sa vitesse. Dans un nuage d'atomes très froids, les atomes sont presque immobiles. Leur longueur d'onde peut être supérieure à la distance entre atomes, de sorte que les fonctions d'onde des atomes, qui décrivent leurs propriétés quantiques, se recouvrent. Les atomes sont alors dans le même état quantique et on les décrit par une onde unique. On nomme cet état cohérent, condensat de Bose-Einstein.



Le laser à atomes émet des bouffées d'atomes de sodium (à gauche). La superposition de ces bouffées produit des interférences dont la figure (à droite) montre que les atomes sont dans un état cohérent. L'axe vertical représente la densité atomique (en fausses couleurs) et le plan horizontal, la position. La zone d'interférence contient 50 000 atomes.

Initialement, les atomes de sodium sont à une température de plusieurs centaines de kelvins. On les refroidit d'abord par laser : quand ils absorbent des photons, les atomes sont freinés, et ils sont ainsi refroidis puisque la température mesure la vitesse d'agitation des atomes. Les atomes atteignent ainsi la température de 100 microkelvins. On peut alors les piéger dans un champ magnétique, les atomes capturés étant ceux dont les moments magnétiques (les spins) sont orientés vers le haut, dans le même sens que le champ magnétique.

On continue à refroidir par une autre technique, l'évaporation forcée. Des collisions incessantes se produisent de sorte que parfois, un atome ressort d'une collision avec plus d'énergie qu'il n'en avait au départ. Cet atome chaud s'éloigne du piège et passe dans une zone où un champ radiofréquence renverse son moment magnétique. L'atome, dans un état non piégé, est donc expulsé du piège magnétique. On évapore ainsi les atomes chauds. Les atomes restants sont plus froids et plus concentrés et, au-dessous d'un seuil de température et de densité, les atomes s'accumulent dans l'état quantique d'énergie minimale du système, le condensat de Bose-Einstein.

Comment émettre des bouffées de ce condensat ? Une brève impulsion d'un champ radiofréquence incline les spins des atomes dans un état intermédiaire, ce qui est équivalent, en mécanique quantique, à une superposition de spins dirigés vers le haut et de spins horizontaux. Le nuage se sépare en deux parties : une

composante qui reste piégée et une composante non piégée (celle dont le spin est horizontal) qui tombe, accélérée par la gravité. Huit bouffées comprenant une centaine de milliers d'atomes ont été ainsi extraites d'un condensat de cinq millions d'atomes. Ce mécanisme d'échappement des atomes était au point depuis l'été 1996. Il restait à savoir si les bouffées d'atomes émises étaient toujours dans un état cohérent, ou si elles étaient redevenues un gaz ordinaire.

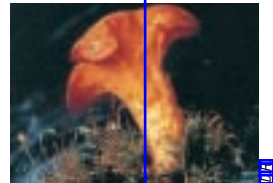
Pour montrer que la cohérence est préservée, W. Ketterle et ses collègues ont fait interférer les bouffées d'atomes de deux condensats différents. Les physiciens ont créé deux condensats proches. Ils ont ensuite branché le mécanisme d'échappement des atomes et ont fait se recouvrir les bouffées émises par les deux condensats. La figure d'interférence obtenue, analogue à une figure d'interférence entre deux ondes lumineuses, a montré que les atomes émis étaient dans un état cohérent : le laser à atomes était né.

De nombreuses améliorations seront nécessaires avant que ce laser ne soit utilisable comme source pratique d'onde de matière. Néanmoins, la stabilité des ondes de matière promet des applications variées. Outre leur utilisation pour l'amélioration de la précision des horloges ou pour l'optique atomique, ces sources pourront servir dans le domaine des nanotechnologies et pour la fabrication de circuits électroniques à l'échelle atomique. Le succès du laser à atomes sera-t-il équivalent à celui de son ancêtre lumineux ?

BRÈVES

La girolle cultivée

La girolle ? Le gourmand lève les yeux au ciel à son évocation. Hélas les efforts de domestication avaient toujours échoué, alors que les girolles se raréfiaient dans les pays d'Europe. Eric Danell et Francisco Camacho, en Suède, annoncent la culture de girolles, à partir de mycélium pur (le mycélium est le réseau de filaments qui constitue l'appareil végétatif des champignons). Ce mycélium a été débarrassé de ses bactéries contaminantes, dont la présence avait fait échouer les recherches antérieures. La première récolte a été cultivée sur de jeunes plants de pin sylvestre, et les premiers carpophores ont poussé dans un pot en plastique. Ces champignons ont atteint une hauteur de 3,5 centimètres, et les biologistes font aujourd'hui leur troisième récolte.



Contre la grippe

La grippe est prévenue par un vaccin. Toutefois, on doit renouveler la vaccination chaque année, car les épidémies sont dues à des souches différentes du virus. Une nouvelle molécule, en cours d'essais cliniques, semble guérir des infections grippales : elle inhibe l'enzyme du virus, quasi identique quelle que soit la souche, qui permet aux nouvelles particules virales fabriquées par les cellules infectées de s'échapper et de propager l'infection. Quand l'enzyme est inhibée, plus de propagation, plus d'infection, plus de grippe ! Hélas, on craint que le traitement ne sélectionne des souches résistantes du virus. De surcroît, les vaccinations préventives devront être poursuivies.

Étoiles isolées

Les étoiles sont grégaires : elles naissent et vivent dans des galaxies. Elle peuvent toutefois en sortir : Harry Ferguson et ses collègues de l'Institut du télescope spatial ont observé 600 étoiles situées à plus de 300 000 années-lumière de la galaxie la plus proche (soit trois fois le diamètre de la Voie lactée). Ces étoiles sont situées dans l'amas de galaxies de la Vierge. Elles auraient été, peu après la formation de l'amas, éjectées des galaxies voisines lorsque celles-ci étaient proches et que leurs interactions étaient fortes.

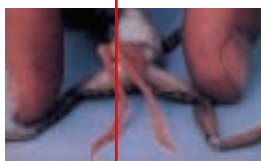
Suite page 26

Brève nouvelle

La fréquence d'utilisation du mot «nouveau» dans les articles scientifiques croît exponentiellement. L'analyse a été menée sur les titres et les résumés des articles répertoriés par une base de données à orientation médicale. Si la croissance se poursuit au même rythme, tous les articles contiendront des informations nouvelles en février 2020. (*Nature*, 6 février 1997.)

Grenouilles à six pattes

Les grenouilles qui présentent des malformations des membres sont de plus en plus nombreuses. Alors qu'entre 1975 et 1995, David Hoppe de l'université du Minnesota n'avait vu que deux grenouilles mutantes, il en a repéré plus de 200 en 1996. La pollution des eaux où vivent les grenouilles serait responsable de cette croissance soudaine.



Erreurs de réparation

Certaines mutations du gène BRCA1 favorisent l'apparition du cancer du sein et de l'ovaire. L'équipe de Jean Feunteun, à l'Institut Gustave Roussy, a montré que cette protéine semble participer normalement, avec une autre protéine nommée Rad51, au maintien de l'intégrité du génome. L'altération d'un élément du système de réparation de l'ADN laisse les erreurs s'accumuler dans les gènes, et notamment dans ceux qui commandent la croissance cellulaire : de la croissance incontrôlée naît le cancer. D'autres gènes du système de réparation de l'ADN seraient en cause dans certaines formes héréditaires de cancer du colon, par exemple.

Une molécule amplificatrice

Une collaboration entre des physiciens du CNRS à Toulouse et du laboratoire de recherche d'IBM à Zurich a abouti à la fabrication d'un minuscule amplificateur électromécanique utilisant une unique molécule constituée de 60 atomes de carbone connectés entre eux, le C_{60} . Cette molécule était placée entre une plaque conductrice et la pointe d'un microscope à effet tunnel. L'application d'une faible tension électrique déplaçait la pointe de 0,1 milliardième de mètre de sorte que la molécule était comprimée. La tension, mesurée aux bornes de la molécule, était alors cinq fois supérieure à la tension nécessaire pour déplacer la pointe.

Suite page 28

L'arpenteur de l'Univers

Le satellite Hipparcos éloigne les galaxies.

Dans l'Univers, on mesure les grandes distances à l'aide d'un étalon cosmique fondé sur la luminosité d'étoiles variables, les céphéides. Selon les mesures du satellite *Hipparcos*, cet étalon serait faussé. L'Univers serait ainsi dix pour cent plus grand que ne le supposaient les astronomes.

Les céphéides sont des étoiles qui se contractent et se détendent périodiquement : leur luminosité varie. En 1912, l'astronome américaine Henrietta Leavitt remarqua que les céphéides les plus grosses et les plus lumineuses ont une période plus longue que les céphéides moins lumineuses.

La distance des étoiles proches est directement déduite de la mesure de la

parallaxe, décalage de la position d'une étoile mesuré à six mois d'intervalle, lorsque la Terre a parcouru la moitié de son orbite autour du Soleil. Ainsi, en mesurant la distance de céphéides proches, dans notre Galaxie, on ajuste la relation entre la période et la luminosité absolue de ce type d'étoiles, relation utilisée ensuite pour déduire la distance de céphéides dans les galaxies voisines, pour lesquelles les mesures de distances directes sont hors de portée.

Entre 1989 et 1993, le satellite *Hipparcos* a mesuré la distance précise de milliers d'étoiles de notre Galaxie. En comparant les parallaxes de 26 céphéides, Michael Feast et Robin Catchpole, de l'Observatoire royal de Cambridge, ont précisé la relation entre période et luminosité absolue.

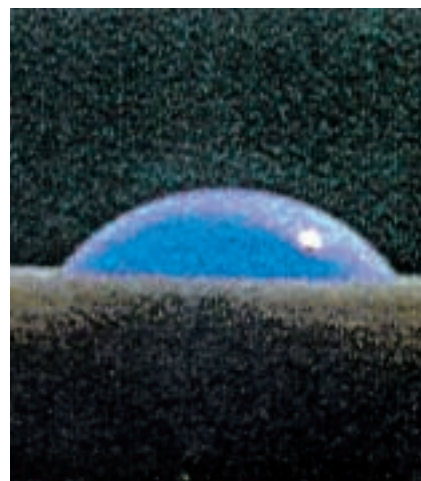
Ces calculs repoussent les céphéides à des distances supérieures à ce que l'on croyait jusqu'à présent. L'Univers est ainsi plus grand. Par exemple, le Grand Nuage de Magellan, serait éloigné de 179 000 années-lumière et non de 163 000.

Antiadhésifs adhérents

Un nouveau traitement du Téflon.

Des chimistes sont heureux de savoir rendre le Téflon collant, alors que ce dernier est précisément apprécié pour ses propriétés antiadhésives ! Est-ce vraiment paradoxal ? Pas tout à fait : pour coller un film de Téflon ou d'un autre polymère fluoré sur le métal d'une poêle, par exemple, il faut vaincre les propriétés antiadhésives d'une de ses faces.

Aujourd'hui les chimistes industriels préparent le Téflon à déposer en traitant une des faces par un procédé chimique agressif : à l'aide de sodium dissous dans de l'ammoniac liquide, à la température de -40°C , ils remplacent certaines liaisons chimiques entre les atomes de carbone et les atomes de fluor par des liaisons entre atomes de carbone, ou entre atomes de carbone et atomes d'hydrogène ; ces nouvelles liaisons chimiques étant plus faciles à couper que les liaisons entre le carbone et le fluor, on peut ultérieurement coupler le Téflon au métal. Toutefois le sodium, très réactif et pénétrant, noircit



Gouttes d'eau sur du Téflon non traité (en haut) et sur du Téflon traité (en bas) : l'étalement du liquide montre la diminution des propriétés antiadhésives de la couche traitée.

Le Téflon en quelques secondes, il le rend poreux, puis finit par le pulvériser.

A l'Ecole supérieure de physique et de chimie de Paris, Catherine Combelle, Frédéric Kanoufi et André Thiébaud ont proposé de remplacer le sodium, trop puissant, par un métal moins agressif, tel le magnésium. Toutefois celui-ci ne se dissout pas spontanément dans l'ammoniac liquide.

C'est là que l'électrochimie est utile : l'application d'un courant électrique entre

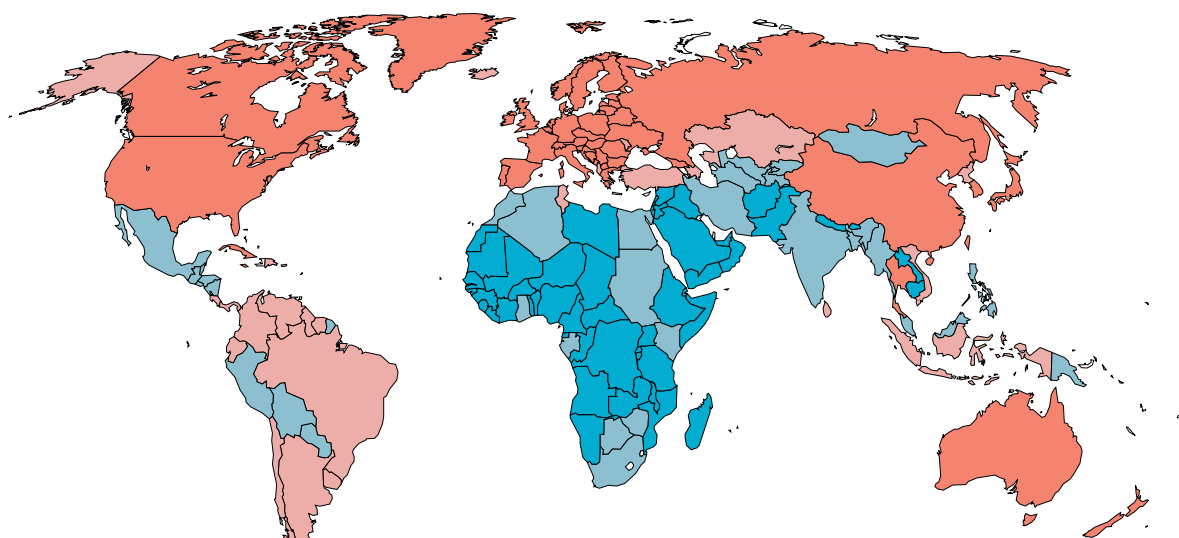
une première électrode d'un métal quelconque et une seconde électrode constituée de magnésium, dans l'ammoniac liquide, provoque la dissolution du magnésium et l'apparition d'électrons qui s'entourent de molécules d'ammoniac ; la solution prend une couleur bleue caractéristique de la présence d'électrons «solvatés».

Le traitement du Téflon par cette solution est d'une douceur inattendue : la profondeur de la couche modifiée reste

inférieure à un micromètre pour 24 heures de traitement et le polymère fluoré reste blanc même après un traitement prolongé.

Le Téflon ainsi traité est prêt pour le collage proprement dit. Dans l'industrie électronique, par exemple, le Téflon sert d'isolant dans des circuits imprimés, après dépôt sur des plaques de cuivre. Le nouveau procédé électrochimique permet également d'envisager une métallisation. Ainsi colle-t-on l'incollable.

La fécondité dans le monde

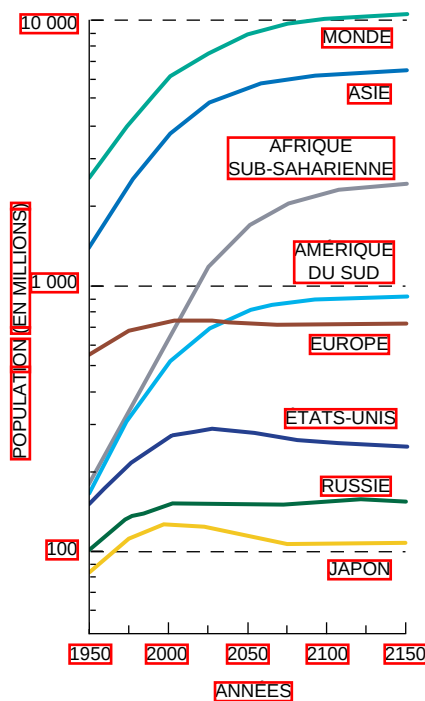


NOMBRE MOYEN D'ENFANTS PAR FEMME EN 1996

MOINS DE 2,12 DE 2,12 A 2,99 DE 3 A 4,99 PLUS DE 5 PAS DE DONNEES

Combien d'hommes la Terre portera-t-elle dans 100, 200 ou 300 ans ? Nous sommes aujourd'hui 5,8 milliards. Selon l'hypothèse moyenne des Nations Unies, la population mondiale se stabilisera vers 2150 autour de 11 milliards d'êtres humains.

Ces prévisions reposent sur les valeurs actuelles de la fécondité. La carte montre, pour chaque pays, l'indice conjoncturel de fécondité. C'est le nombre moyen d'enfants qu'une femme aura au cours de sa vie, calculé à partir de la situation de toutes les femmes, une année donnée (ici 1996). Le seuil de renouvellement de la population est de 2,1 enfants par femme (on ajoute 0,1 pour prendre en compte la mortalité juvénile). Lorsque l'indice conjoncturel de fécondité devient inférieur à ce seuil, la population ne décroît que sept décennies plus tard : les individus nés avant le franchissement du seuil sont majoritairement décédés.



Ainsi, au Japon, l'indice conjoncturel de fécondité est devenu inférieur à 2,1 dans les années 1950, bien avant les autres nations industrielles. La population japonaise continue toutefois à croître lentement. Elle se stabilisera probablement ou diminuera entre 2010 et 2020. À l'opposé de cette situation, on trouve l'Afrique sub-saharienne, la région la plus pauvre du Globe. Sur les 44 pays de cette zone, 24 ont un indice conjoncturel de fécondité supérieur à six. La population ne devrait pas s'y stabiliser avant le XXIII^e siècle, lorsqu'elle aura atteint deux milliards. La population de l'Inde se stabilisera au cours du XXII^e siècle autour de 1,5 milliard. Ce pays serait alors plus peuplé que la Chine, où les naissances sont sévèrement limitées. Les populations du Pakistan, du Nigeria et de l'Éthiopie se stabiliseraient à plus de 300 millions chacune, et celles du Mexique, du Viêt Nam, de l'Iran, du Zaïre et des Philippines dépasseraient 150 millions.

Technique durable

La plus ancienne technique de fabrication d'outils a aussi été la plus durable. Selon S. Semaw et ses collègues américains de l'Université Rutgers, des blocs de roche volcanique taillés il y a 2,5 millions d'années sont de même type que les outils découverts dans la gorge d'Olduvai, en Tanzanie, et datés de 1,8 million d'années. Ces outils tranchants permettaient de creuser la terre à la recherche de nourriture et de couper la viande. La technologie d'Olduvai aurait donc été utilisée pendant près d'un million d'années. Il reste à déterminer par quelle espèce d'hominidé (*Nature*, 23 janvier 1997).



Victoires du bruit

Le prix de l'Oreille cassée, décerné par le Conseil national du bruit, signale des initiatives irrespectueuses de l'environnement sonore. Deux lauréats ont été distingués en 1997 : les utilisateurs de téléphones portables qui n'éteignent pas la sonnerie de leur appareil dans les lieux publics, et les organisateurs de concerts qui diffusent la musique à un niveau dangereux pour l'audition des spectateurs. Ils rejoignent au palmarès les souffleurs à moteur utilisés par les jardiniers pour rassembler les feuilles mortes, et les chaînes de télévision qui augmentent le niveau sonore lors des écrans publicitaires.

Un sucre et une tétée

Comment diminuer la douleur ressentie par les nourrissons? En leur donnant du sucre et en les faisant téter. C'est le résultat d'une étude menée sur la sensibilité à la douleur de jeunes rats. Ronald Dubner et ses collègues de l'Université de Maryland ont observé qu'après dix minutes de tétée et ingestion d'eau sucrée, les pattes antérieures de rats âgés de dix jours étaient moins sensibles à la chaleur et à la pression que celles de rats témoins. Les neurologues n'ont pas observé d'effet pour les pattes arrières, ce qui suggère que les parties du système nerveux central qui commandent le haut et le bas du corps se développent à des vitesses différentes. Cette étude fournira une nouvelle approche des mécanismes analgésiques chez le nourrisson.

La partition de données

Un traitement «magnétique» pour regrouper des données semblables.

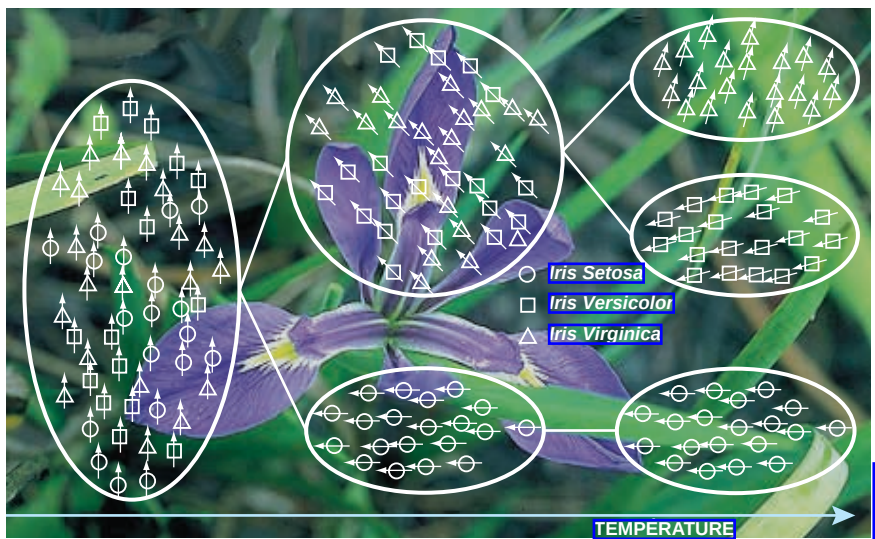
Un enfant observant des points sur un graphique les regroupe intuitivement selon leur proximité. Lorsque l'on étudie un ensemble de données en dimension supérieure à deux, on recourt à des algorithmes qui séparent les différentes zones selon des critères mathématiques de proximité. À l'aide d'un modèle de physique statistique, le modèle de Potts, Eytan Domany et ses collègues de l'Institut Weizmann, en Israël, ont conçu un algorithme qui regroupe les points selon leur «proximité» pour toutes sortes de données.

La partition, utilisée dans des disciplines variées, allant de la reconnaissance de la parole à l'astrophysique, consiste à séparer un ensemble de données en sous-ensembles selon un critère de «ressemblance». Dans la plupart des techniques de partition, on suppose que l'on connaît *a priori* la structure des données. Par exemple, certaines techniques requièrent que les sous-ensembles soient sphériques, bien séparés et qu'ils contiennent approximativement le même nombre de points. Pour pallier cet inconvénient, Eytan Domany a conçu un algorithme, fondé sur une analogie de physique statistique, qui fait apparaître naturellement les différents sous-ensembles de

points sans connaissance *a priori* du type de données à regrouper.

En physique statistique, il existe un modèle où des sous-ensembles apparaissent naturellement, le modèle de Potts. Ce modèle décrit, en fonction de la température, le comportement collectif d'un ensemble d'atomes auxquels sont associés des moments magnétiques (des spins) pouvant prendre de nombreuses orientations. Lors de transitions de phases du système (transitions entre une phase désordonnée et une phase plus ordonnée), des régions avec des spins de même orientations apparaissent.

Par analogie, on associe à chaque point de l'ensemble étudié un spin qui peut prendre plusieurs valeurs (les moments magnétiques peuvent s'orienter dans plusieurs directions) et on introduit une interaction entre points voisins qui décroît avec la distance. C'est l'équivalent d'un système magnétique qui présente trois phases : à basse température, le système est complètement ordonné car tous les points ont leurs spins orientés dans le même sens ; lorsque la température croît, les spins fortement couplés (c'est-à-dire ceux relativement proches) restent corrélés ce qui permet de distinguer des sous-ensembles de points. La transition vers cette phase intermédiaire est caractérisée par un saut brusque des paramètres d'ordre du système, calculés grâce à la physique statistique. Finalement, à très haute température le système est complètement désordonné et chaque point forme un sous-ensemble.



Pour 150 fleurs d'iris appartenant à trois espèces, on mesure quatre paramètres. On place ces points dans un espace à quatre dimensions et on associe à chaque point un «spin» (les petites flèches blanches). En élevant artificiellement la «température» du système, les points se séparent selon leur distance dans l'espace à quatre dimensions, ce qui s'observe sur l'orientation des spins. D'abord, un groupe formé par les *Iris setosa* se sépare du groupe constitué des *Iris versicolor* et des *Iris virginica*. À température supérieure, ce dernier se subdivise, et on retrouve la classification en espèces.

Considérons un exemple. Pour 150 fleurs d'iris appartenant à trois espèces, on mesure quatre paramètres : la longueur et la largeur des pétales et des sépales. On possède donc un ensemble de 150 points dans un espace à quatre dimensions, la position de chaque point étant déterminée par les quatre mesures. L'analyse «magnétique» distingue-t-elle les sous-ensembles de points relatifs à chaque espèce ?

On associe à chaque point un spin dont la position est déterminée par les quatre paramètres et qui peut prendre de nombreuses orientations. À température nulle, tous les spins sont orientés dans le même sens : les données forment un seul ensemble. On «chauffe» alors le système en diminuant les interactions entre spins. Plus les points sont proches, plus les interactions entre les spins sont importantes. Lorsque la température dépasse un premier seuil, on

assiste à une transition de phase : deux sous-ensembles de points apparaissent, d'une part, les points correspondant aux *Iris setosa* et, d'autre part, ceux qui correspondent aux *Iris versicolor* et aux *Iris virginica*, ce qui montre que, pour les paramètres mesurés, les fleurs de ces deux espèces sont plus proches. À une température encore supérieure, un nouveau changement de phase se produit et ce dernier groupe se sépare encore. Finalement, on obtient trois sous-ensembles avec des spins alignés : les points sont séparés selon l'espèce à laquelle ils correspondent.

Cette méthode a montré son efficacité dans plusieurs cas réels comme le traitement d'images de satellites ou la reconnaissance de la parole. Elle fait ressortir naturellement le nombre de sous-ensembles et elle reste efficace lorsque l'on étudie des ensembles de tailles, de densités et de formes variées.

Agrégats neurotoxiques

Des amas de protéines anormales seraient stabilisés par une enzyme, dans le cerveau des personnes atteintes de la maladie de Huntington.

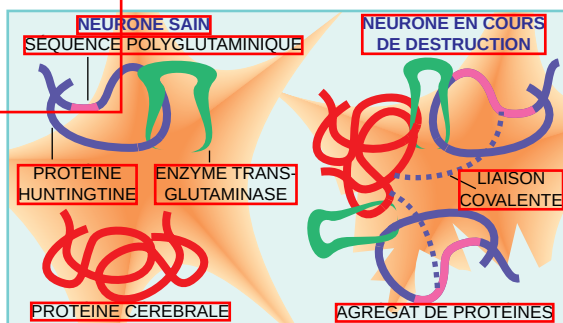
On a récemment découvert des protéines anormales dans le cerveau des personnes atteintes de la maladie de Huntington ou de six autres maladies neurodégénératives (où certains groupes de neurones sont détruits). Nous avons montré qu'une enzyme favorise la création de liaisons stables entre ces protéines anormales et d'autres protéines cérébrales : chez les malades, elles s'accumuleraient dans les neurones au lieu d'être dégradées et éliminées.

La maladie de Huntington est la plus fréquente de ces sept maladies ; 6 000 Français en sont atteints. Elle se manifeste par des mouvements anormaux, une instabilité émotionnelle et une démence progressive. La maladie évolue sur une vingtaine d'années. Une proportion notable des neurones du cortex cérébral, notamment, est détruite.

Les sept maladies apparaissent souvent à l'âge adulte, ce qui est rare

pour des maladies génétiques. Elles sont dominantes, c'est-à-dire qu'il suffit qu'un des deux parents soit atteint pour que l'enfant puisse l'être. Comme les symptômes apparaissent tardivement, les personnes atteintes ont souvent déjà eu des enfants lorsqu'elles découvrent leur maladie, laquelle tend à être plus précoce et plus grave au fil des générations.

Ces maladies sont causées par sept protéines différentes, mais dans cinq cas, on en ignore la fonction normale. Ces protéines ont en commun une séquence, nommée séquence polyglutaminique, qui contient une répétition de la glutamine : dans la population saine le nombre moyen de motifs glutamine dans cette séquence est égal à 20. Lorsque cette séquence dépasse une quarantaine de motifs glu-



Lorsque la protéine huntingtine contient une région nommée séquence polyglutaminique (en rose) de petite taille, l'enzyme transglutaminase n'a pas d'action délétère et les neurones restent sains (à gauche). Au contraire, lorsque la séquence polyglutaminique est longue, l'enzyme crée des liaisons covalentes entre la huntingtine et des protéines cérébrales (à droite). Chez les patients atteints de la maladie de Huntington, les neurones semblent disparaître à cause de la formation de ces amas de protéines.

France Culture et Pour la Science

**vous invitent
au Palais
de la découverte
à l'enregistrement
de l'émission**

**les
Inattendus
de la
Science**

**Samedi 8 mars 1997
à 15h**

*Les inattendus
en neurophysiologie*

avec Henri Korn,
directeur de recherche
à l'INSERM

**Invitations à demander
au 08 36 68 10 99 (2,23F/mn)**



Palais de la découverte

**POUR LA
SCIENCE**

tamine, les maladies apparaissent. Ce nombre dépasse même 100 dans les cas des maladies de Huntington les plus précoces et les plus graves.

Pourquoi l'excès de glutamine est-il toxique ? La présence d'un long motif polyglutaminique confère-t-elle des propriétés nouvelles à ces protéines, qui deviendraient neurotoxiques ? La mutation n'est présente que sur une des deux copies du gène incriminé, de sorte que la protéine normale est toujours synthétisée à partir du gène normal. En revanche, le gène muté code une nouvelle protéine anormale, qui est responsable de la maladie. Selon Howard Green, de l'Université Harvard, la protéine mutée serait anormalement sensible à la transglutaminase neuronale, une enzyme qui catalyse la formation de liaisons fortes entre protéines : la mort neuronale résulterait d'une accumulation d'agrégats de protéines stabilisés par les liaisons covalentes formées par la transglutaminase.

Avec H. Green, nous avons apporté des arguments importants en faveur de cette hypothèse. Aucune des protéines responsables de maladie neurologique n'avait été purifiée, mais nous connaissons leurs séquences d'après celles des gènes qui les codent. Nous avons étudié l'action de l'enzyme transglutaminase sur des fragments de ces protéines (des peptides) contenant des quantités variables de glutamine : la transglutaminase agit sur les peptides qui contiennent plusieurs motifs glutamine, mais elle n'agit pas sur les peptides qui ne contiennent qu'une seule glutamine. En présence de transglutaminase et de protéines cérébrales, les peptides qui contiennent plusieurs motifs glutamine forment des agrégats insolubles, stabilisés par des liaisons covalentes. Ainsi, toute protéine qui acquiert un motif polyglutaminique devient une cible pour la transglutaminase et peut former des agrégats.

Toutefois, les sept protéines sont synthétisées dans tous les tissus et l'on s'interroge : pourquoi les neurones sont-ils les seules cellules détruites ? Peut-être en raison de la présence d'ions calcium : l'activation de la transglutaminase requiert des ions calcium et la concentration neuronale en ions calcium est élevée pour assurer la transmission de l'influx nerveux. De surcroît, contrairement aux autres cellules de l'organisme, les neurones ne se renouvellent pas et les agrégats protéiques s'y accumulent progressivement.

D'autres questions restent ouvertes : quelles sont les protéines cérébrales qui s'agrègent aux protéines contenant des motifs polyglutaminiques ? Les inhibiteurs de la transglutaminase traversent-ils la barrière qui protège le cerveau et sont-ils efficaces pour empêcher la formation des agrégats ? Pourra-t-on dissoudre les agrégats déjà formés ? Des modèles animaux de ces maladies ont été élaborés récemment et devraient aider les neurobiologistes à répondre à ces questions.

Philippe DJIAN – Centre de recherche sur l'endocrinologie moléculaire – CNRS

RMN et vipères

**Des techniques d'exploration
médicale sont utilisées
en écologie.**

Les ressources des animaux sont limitées et réparties entre la reproduction, la croissance et la maintenance de l'organisme. Des compromis s'établissent ainsi entre des voies physiologiques et comportementales concurrentes.

La diversité des stratégies de reproduction exprime les solutions adoptées par les diverses espèces. Certains animaux constituent d'abord des réserves corporelles, qu'ils utilisent ultérieurement pour la reproduction ; d'autres investissent directement les ressources tirées de l'environnement dans la reproduction, sans stockage intermédiaire. Les premières doivent avoir un mode de vie qui préserve les réserves accumulées, tan-

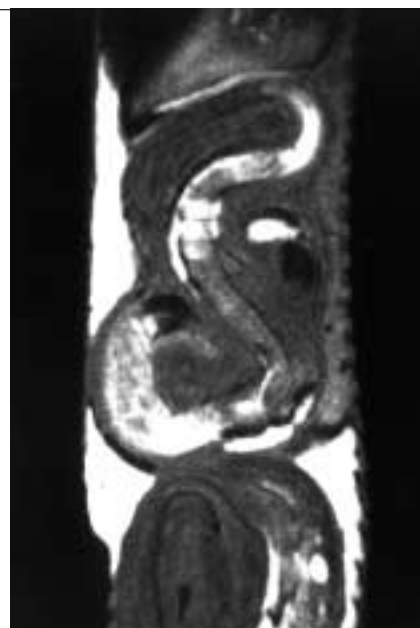


Image RMN d'une femelle en fin de gestation : on observe, de haut en bas, le reste d'un œuf qui a régressé, et deux vipéreaux sur le point de naître.



X. ROYER et A. HOUZE

Mise bas d'un vipéreau.

dis que les secondes doivent avoir un mode de vie plus actif, parce qu'elles doivent trouver continuellement des ressources dans l'environnement.

La vérification de tels comportements est difficile, parce que l'identification et l'estimation des réserves corporelles nécessite l'autopsie des animaux. Les mesures de la résistance électrique d'animaux vivants ne discernent pas les réserves, et la mesure de la dissolution du cyclopropane (un gaz très soluble dans les graisses) permet d'estimer la quantité totale de lipides corporels chez certaines espèces, mais l'animal reste alors une boîte noire : on ne sait pas si les valeurs mesurées se rapportent aux réserves maternelles ou aux lipides déposés dans les œufs en formation.

Aussi connaissait-on mal la physiologie de nombreuses espèces, tels les serpents. Ces animaux discrets intéressent peu de biologistes, alors qu'ils sont utiles pour le test des idées théoriques : comme ils ne prodiguent aucun soin parental aux nouveau-nés, et que les embryons se développent exclusivement à partir des réserves accumulées dans les œufs, le succès reproducteur des femelles dépend de leurs capacités à fabriquer le plus grand nombre possible d'œufs, de la meilleure qualité possible, afin de produire des serpenteaux autonomes.

En étudiant la vipère aspic, espèce vivipare, nous avons récemment démontré que la résonance magnétique nucléaire (RMN) permet de relier le mode de vie et la morphologie des serpents avec leur stratégie de reproduction. La résonance magnétique nucléaire est classiquement utilisée en imagerie de l'hydrogène : on dresse des cartes de la répartition en noyaux d'hydrogène (et donc en eau, qui en contient) dans les échantillons. Tou-

tefois les biophysiciens ont également mis au point des appareils de spectroscopie, qui, se fondant sur la présence de phosphore et de carbone, par exemple, permettent de déterminer la nature des molécules et de distinguer l'eau des lipides. On obtient ainsi des images de la composition chimique des corps vivants.

Pouvait-on, tout d'abord, identifier et mesurer les réserves corporelles de femelles adultes ? Par RMN, nous avons visualisé les réserves que les femelles accumulent, durant plusieurs années, avant d'atteindre une condition physique suffisante pour se reproduire. Puis, à l'aide de mesures de spectrométrie, nous avons déterminé la quantité de lipides corporels et mis au point un indice de condition corporelle, fondé sur la longueur et sur la masse corporelle des animaux (indice ultérieurement utilisable sur le terrain, sans RMN). Ces données ont été confrontées à des résultats antérieurs, issus d'autopsies : la parfaite concordance des deux méthodes valide les observations faites par RMN.

Comment les réserves maternelles sont-elles investies, au cours de la croissance des œufs ? Pour étudier cette question, nous avons capturé des femelles de vipère aspic dès le début de la saison de reproduction, avant l'utilisation des réserves maternelles pour la reproduction ; certains de ces animaux avaient pu s'accoupler, d'autres non. La RMN a montré que les réserves maternelles «fondaient» au cours des trois mois que durent la formation des œufs. Ainsi, chez certaines espèces, la reproduction dépend des réserves accumulées par la mère avant la reproduction (là encore, les résultats ont été validés par des autopsies).

Au cours de leur captivité, certaines femelles qui n'avaient pas été fécondées

ont cessé de former des œufs, tandis que d'autres ont ovulé. Cette observation a permis de résoudre un problème du type de la poule et de l'œuf : l'accouplement est-il nécessaire pour que les œufs se forment, ou bien la croissance folliculaire rend-elle les femelles attrayantes pour les mâles, qui s'accouplent alors avec elles? La RMN, en permettant un suivi individuel des animaux, a montré qu'il existe des tactiques différentes selon les femelles d'une même espèce : certaines renoncent prudemment à la reproduction, d'autres espèrent trouver un mâle jusqu'au dernier moment.

Enfin nous avons voulu connaître l'évolution des œufs, au cours de la gestation, qui dure trois mois chez la vipère aspic. Les quantités considérables d'énergie et de matière investies par les femelles

pour former des œufs étaient-elles complètement transformées en vipéreaux? Le suivi individuel par RMN a clairement révélé des phénomènes qui étaient restés purement hypothétiques : par exemple, une femelle a ovulé en juin quatre œufs quasi identiques, mais, trois mois plus tard, seuls deux vipéreaux sont nés. Nous avons ainsi la preuve directe que deux œufs sur quatre ont régressé pendant la gestation. La RMN a révélé que, très tôt après l'ovulation, les deux œufs qui se sont développés étaient pourvus d'embryons, ce qui n'était pas le cas des deux autres. Il reste à comprendre pourquoi 50 pour cent seulement des œufs de cette femelle étaient fécondés.

Enfin nous avons observé que les vipéreaux sur le point de naître, mais qui sont encore dans les voies génitales de la

femelle, avaient eux-mêmes accumulé d'importantes réserves de lipides. Cette accumulation est nécessaire, car les vipères ne s'occupent pas des vipéreaux, qui doivent survivre durant les six à huit premiers mois de leur vie sans s'alimenter.

Les techniques mises au point pourraient être appliquées à d'autres serpents, mais aussi à d'autres groupes animaux, tels les oiseaux ou les mammifères. Signalons enfin que ces recherches d'écologie évolutive que nous menons ne coûtent pas cher, car nous utilisons les appareils de RMN médicaux aux heures creuses de fonctionnement des hôpitaux, et que ces machines ne doivent jamais être stoppées.

Xavier BONNET, Centre d'études biologiques de Chizé, CNRS
Serge AKOKA, Faculté de médecine de Tours, INSERM

Graine et dynamo

Depuis les années 1950, l'idée s'est imposée que le champ magnétique de la Terre est entretenu par des courants dus à des mouvements de fer liquide dans le noyau terrestre. En raison de l'augmentation de pression avec la profondeur, le fer du noyau terrestre, liquide entre 2 900 et 5 200 kilomètres de profondeur, est solide jusqu'au centre, à 6 370 kilomètres : c'est la graine. Or, à mesure que la Terre se refroidit, la graine grossit ce qui libère l'énergie nécessaire à l'entretien du champ magnétique. À l'aide de simulations numériques, nous avons trouvé qu'à partir d'une taille critique de la graine, la production du champ magnétique s'arrête.

La graine n'occupe que quatre pour cent du volume du noyau. Pourtant, sa cristallisation qui libère la chaleur latente de solidification, est la principale source d'énergie pour les mouvements de convection qui agitent le fluide conducteur. Ces mouvements transportent le fluide à travers le champ magnétique baignant le noyau, ce qui crée des courants induits.

À leur tour, ces courants engendrent un champ magnétique qui entretient le champ magnétique de la Terre tant que les mouvements continuent : c'est la dynamo.

Pour modéliser la dynamo terrestre, nous cherchons les solutions des équations de la magnétohydrodynamique qui possèdent, comme le champ magnétique de la Terre, une symétrie de révolution autour de l'axe de rotation. On calcule ainsi l'évolution des mouvements du fluide, des courants électriques et du champ magnétique en fonction des différents paramètres physiques (viscosité du fluide, vitesse de rotation, rayon de la graine etc.).

Dans un premier temps la graine est petite. Dans des couches limites, à proximité de la fron-

tière noyau-manteau, l'intensité du champ magnétique est importante et le fluide conducteur subit d'importantes forces magnétiques. De plus, le fluide est également soumis à des forces dues à la rotation de la Terre. L'action combinée de ces forces crée des mouvements de convection qui transportent le fluide d'une couche limite de l'hémisphère Nord à une couche limite de l'hémisphère Sud, et vice versa.

À mesure que la graine croît, les mouvements du fluide sont modifiés de deux manières. D'une part, dans le cylindre tangent à l'équateur de la graine, la vitesse est partout égale à celle de la surface de la graine. Ce cylindre est donc en rotation solide avec la graine.

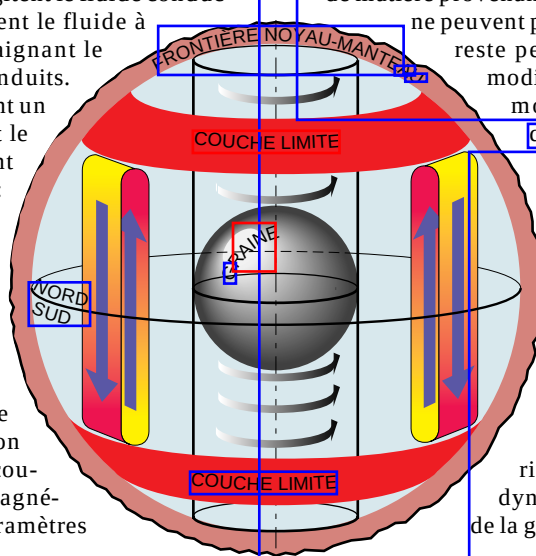
D'autre part, la présence de la graine empêche la circulation entre les hémisphères Nord et Sud du noyau liquide. Les couches limites, privées de leur alimentation par un flux de matière provenant des profondeurs du noyau liquide,

ne peuvent plus se développer. Tant que la graine reste petite, la dynamo n'est presque pas modifiée. En revanche, lorsque cette «zone morte» devient trop importante, la

dynamo cesse de fonctionner.

Ce mécanisme expliquerait le faible champ magnétique de Mercure qui posséderait une graine importante. Aujourd'hui, la Lune n'a plus de champ magnétique car son noyau est complètement cristallisé. Toutefois, la diminution progressive du champ magnétique lunaire, attesté par des échantillons anciens, s'expliquerait également par ce mécanisme. Pour la Terre, l'étude numérique indique l'interruption de l'effet dynamo lorsque le rapport entre le rayon de la graine et le rayon du noyau est légèrement supérieur à celui de la Terre actuelle. Le champ magnétique terrestre disparaîtra-t-il bientôt?

Dominique JAULT,
Institut de physique du Globe, Paris



Dans le noyau terrestre, près des couches limites, les forces magnétiques intenses et la rotation engendrent des mouvements verticaux (flèches violettes). La croissance de la graine solide gêne ces mouvements entre les hémisphères ce qui entraîne l'arrêt de la génération du champ magnétique de la Terre par effet dynamo.

Chats et souris à la Schrödinger

Une souris atomique mesure la durée de vie d'un chat quantique.

Les systèmes quantiques peuvent coexister dans plusieurs états. Pourquoi ce comportement étrange ne se manifeste-t-il pas à notre échelle? Pourquoi le fameux «chat de Schrödinger» ne peut-il à la fois être mort et vivant? Une expérience apporte un élément de réponse en organisant l'entrevue entre un chat quantique et une souris atomique.

Aussi bizarre que cela paraisse, le monde quantique tolère qu'un système physique occupe, au même instant, plusieurs états possibles. Il a bien fallu nous habituer à cette étrangeté pour des objets microscopiques, et personne aujourd'hui ne songerait à mettre en doute la validité de la mécanique quantique. En revanche, nous avons beaucoup de difficultés à imaginer ces «superpositions d'états» pour des objets macroscopiques. Schrödinger a illustré l'absurdité de ces superpositions en imaginant que le destin d'un chat est lié à l'évolution d'un système microscopique, la désintégration d'un atome radioactif, par exemple. Si l'atome est intact, le chat reste vivant. Il meurt si l'atome se désintègre. L'atome est, à un instant quelconque, dans une superposition quantique des deux états possibles, à la fois intact et désintégré. Le chat serait-il alors à la fois *mort et vivant*? La nature, nous le savons bien, saura forcer le chat à choisir entre un état et un autre, à être mort *ou* à être vivant.

Au-delà de son aspect anecdotique, ce malheureux chat pose tout le problème de la mesure en mécanique quantique. Après tout, le chat «mesure» l'état de l'atome. Pourquoi donc un appareil de mesure ne se trouve-t-il pas dans une superposition de toutes les indications possibles, quand il mesure un système microscopique? Un élément de réponse théorique a été avancé ces dernières années sous le nom de décohérence. Un système macroscopique interagit nécessairement avec un environnement complexe (au moins l'air ambiant pour maintenir vivante la «moitié» du chat). Il subit un grand nombre d'interactions (des chocs) microscopiques. Chacun ne le modifie que très peu, mais l'accumulation de ces interactions brouille rapidement la superposition *chat mort et chat vivant*. Il ne reste qu'un chat *mort ou vivant*, dont l'état est décrit par des probabilités ordinaires. S'il garde un caractère indéterminé, c'est seulement tant que nous

Le pouvoir des druides

JEAN-LOUIS BRUNAUX

Les prêtres celtes, qui célébraient leur culte dans de vastes sanctuaires, n'étaient pas de simples magiciens. Ils détenaient une partie du pouvoir politique en Gaule avant la conquête romaine.

Les druides fascinent les descendants des Celtes que nous sommes. Les Français se contentent, aujourd'hui, de l'image rassurante du Panoramix de la bande dessinée, plus médecin et magicien que prêtre. Les Anglo-Saxons, depuis le XIX^e siècle, reconstituent des confréries druidiques plus proches de la secte que d'une authentique tradition.

Malgré la modernité de ses formes, cette attirance n'a rien d'une mode passagère : l'engouement pour les sages gaulois existait déjà dans l'Antiquité. Pendant la période alexandrine, les Grecs, après avoir connu la philosophie la plus brillante avec Platon et Aristote, s'intéressèrent aux sages exotiques : égyptienne, indienne, mais aussi gauloise. Diogène Laërce, auteur de l'une des premières histoires de la philosophie au début du III^e siècle avant notre ère, prétendit même que les druides et les brahmanes de l'Inde avaient inventé la philosophie.

Depuis la redécouverte et l'édition au XVI^e siècle des auteurs grecs et latins, les érudits, les intellectuels et les artistes se passionnent pour les druides, personnages mystérieux. Ainsi, en 1585, Noël Taillepied fait paraître l'*Histoire de l'Estat et République des Druides*, où il présente les druides comme des jurisconsultes qui conseillent le sénat et le peuple. Au siècle des Lumières, les druides sont les emblèmes d'une théocratie modèle, d'une utopie où la raison l'emporte sur le droit régalien. Après l'échec, sous la Révolution, d'une religion philosophique, les romantiques se réclament à nouveau des druides, mais pour les assimiler à de lointains précurseurs, des mages fondateurs d'une juste harmonie entre la nature et les humains.

Qui étaient les druides ? Quel était leur rôle dans la société celte ? Les pro-

grès accomplis depuis un siècle dans l'étude des textes des auteurs grecs et latins permettent de replacer chronologiquement les informations qu'ils contiennent. En combinant ces résultats avec les découvertes archéologiques, nous reconstituons l'histoire du druidisme, de son apparition probable sur les rives orientales de la Méditerranée à son extinction dans les forêts de Grande-Bretagne et d'Irlande. La connaissance des cultes pratiqués, obtenue ces dernières années par la fouille de grands sanctuaires du Nord de la France, confirme aussi ce que les comparaisons linguistiques et mythologiques avaient pressenti dès le début du XX^e siècle : le druidisme a de nombreux points communs avec les autres traditions indo-européennes.

Retour aux sources

Que nous apprennent les textes antiques sur les druides ? Le récit qui a le plus retenu l'attention des historiens anciens et populaires est celui de la cueillette du gui, par Pliny l'Ancien. Illustré dans plusieurs générations de livres d'histoire, ce texte décrit comment le gui, considéré comme panacée, était recueilli par des druides avec la plus grande solennité. Seul le gui poussant sur le chêne, phénomène naturel rare, avait les vertus recherchées. À une date précise du calendrier lunaire, un druide vêtu de blanc coupait la précieuse plante à l'aide d'une faucille d'or. Le gui ne devait pas tomber au sol : d'autres druides le recueillaient dans un linge blanc. Pour remercier ou dédommager la divinité, deux jeunes taureaux blancs étaient sacrifiés au pied de l'arbre.

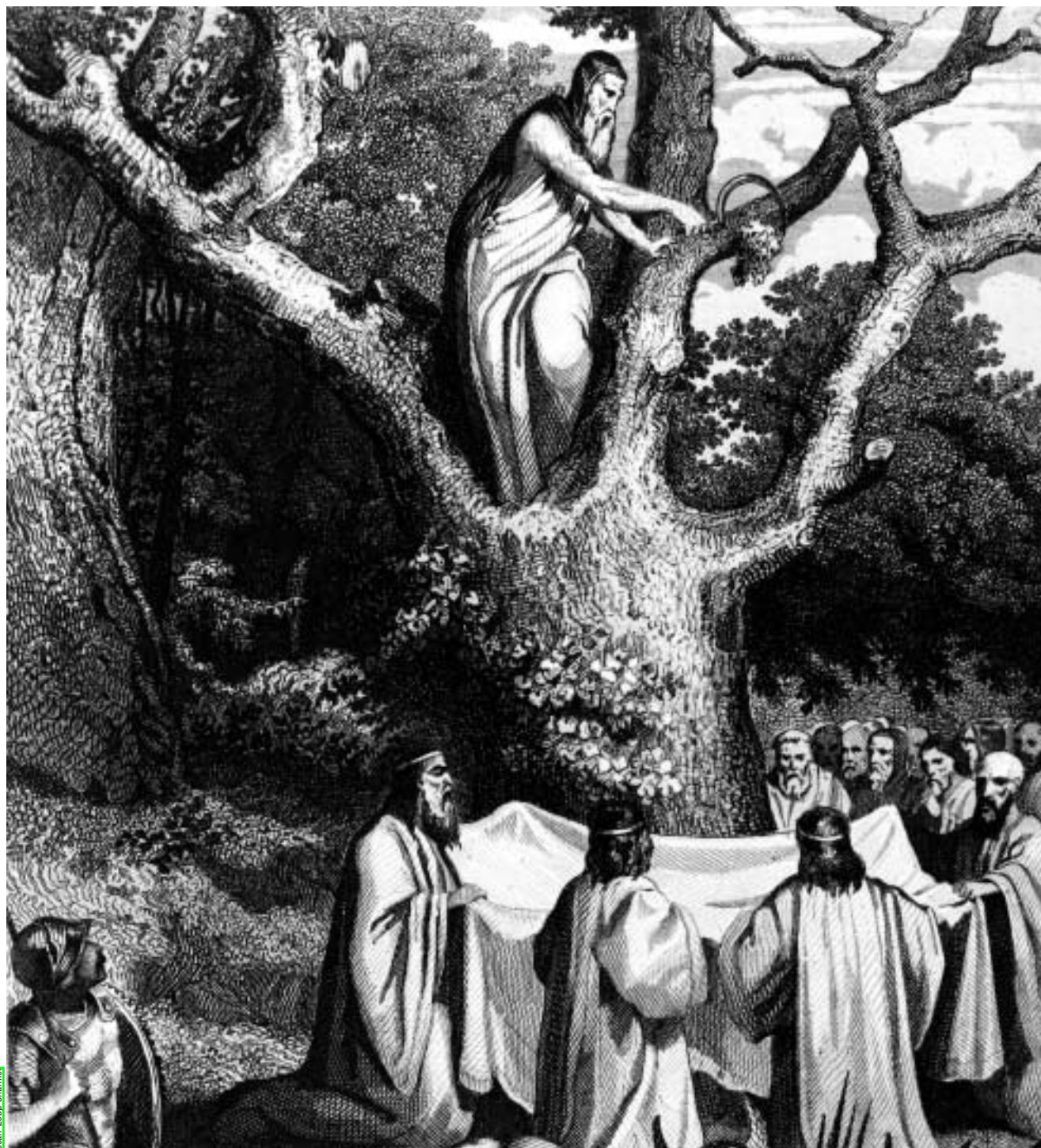
D'un texte riche et complexe, qui évoque une symbolique subtile des couleurs et des éléments, on ne retenait que

la vision poétique de nos sages ancêtres vêtus d'aubes blanches, s'enfonçant dans de profondes forêts en quête d'une plante magique. On oubliait que l'opération s'accompagnait d'un sacrifice animal, en tous points semblable à ceux que préconisaient les religions grecque et romaine. On en vint à croire que les Gaulois n'avaient pas d'authentiques sanctuaires, mais se contentaient de sites naturels : forêt, cime montagneuse, source.

César, dans un passage de la *Guerre des Gaules*, dépeint des druides assez différents des magiciens inspirés décrits par Pliny. Les druides apparaissent avant tout comme des prêtres institutionnels au service d'une religion d'état, organisés en un corps sacerdotal hiérarchisé. Parce qu'ils sont des savants omniscients, leurs compétences ne se limitent pas au seul domaine religieux. Philosophes, ils développent une doctrine morale qui s'applique à la justice et se prolonge naturellement dans l'enseignement. Les druides détiennent une grande part du pouvoir : ils forment l'une des « deux classes d'hommes qui comptent », l'autre étant celle des « chevaliers » ou nobles guerriers.

Ce texte est précieux, parce qu'il est le seul témoignage disponible sur de nombreux documents de cette époque aujourd'hui disparus. Il synthétise ce qu'un intellectuel romain du I^{er} siècle avant notre ère pouvait savoir de la question, à travers la littérature, les récits de voyages ou les grands essais historiques. Son seul défaut est, justement, d'être trop synthétique. César, en bon

1. LA CUEILLETTE DU GUI, décrite par Pliny l'Ancien, a été l'une des scènes favorites des livres d'histoire pendant plusieurs décennies. Aujourd'hui, l'image des druides est utilisée, entre autres, par des sectes et par la bande dessinée. Les prêtres celtes étaient bien différents de ces clichés.



WOLFF-LUDWIG KUNDT



FRANÇOIS SCHWARTZ



© 1997 A. F. J. DE L'ÉDITION DES ÉDITIONS L'ÉDITION DES ÉDITIONS L'ÉDITION DES ÉDITIONS

lecteur et en historien adroit, généralise, comble des lacunes par des amalgames rapides, efface les limites géographiques, gomme les différences chronologiques. Ce texte est aussi paradoxal : c'est le seul passage de la *Guerre des Gaules* où les druides apparaissent explicitement. César n'aurait-il jamais rencontré personnellement aucun de ces personnages importants ?

Posidonius avant César

Le paradoxe est levé quand on analyse l'origine de ce passage où César décrit la société gauloise : c'est le produit d'une compilation de lectures, écrites surtout par un écrivain antérieur, Posidonius. Celui-ci, philosophe

stoïcien, l'un des initiateurs du néopythagorisme à Rome, historien, est le premier ethnographe des Gaulois. Originaire d'Apamée (aujourd'hui en Syrie), il ose se rendre en territoire gaulois, au début du 1^{er} siècle avant notre ère, alors que peu de commerçants romains s'y aventurent. Il voyage en Gaule pour enquêter sur l'invasion des Cimbres et des Teutons et y trouve bien d'autres sujets d'intérêts, notamment et surtout les druides. Probablement s'est-il donné pour mission d'étudier les seuls philosophes non grecs qu'il peut rencontrer.

Les liens harmonieux tissés par les druides entre philosophie et religion le fascinent. Selon Sénèque, Posidonius voit dans les druides les héritiers de cet

âge d'or, cher à Platon, où « l'autorité était aux mains des sages ». Posidonius croit même retrouver chez les druides des échos de la doctrine pythagoricienne, notamment la croyance en une forme de métempsycose. Il s'intéresse tant à ces prêtres qu'il en néglige les autres aspects de la société dans lesquels il ne voit qu'un reflet archaïque des sociétés de la péninsule italienne.

César recopie donc une relation vieille de plusieurs décennies, peut-être elle-même issue de sources plus anciennes : Posidonius n'a pas tout vu en Gaule et il a certainement utilisé les récits des voyageurs qui l'ont précédé. La société gauloise qui apparaît en toile de fond de la *Guerre des Gaules* n'est pas celle visitée par Posidonius et ses prédécesseurs. Les invasions des Cimbres et des Teutons, la poussée de l'influence romaine et les incursions germaniques ont entretemps ravagé une partie des bases de cette société et modifié les rapports économiques entre les hommes et entre les États. Les institutions politiques sont ébranlées et les druides, piliers de l'ordre ancien, subissent les contre-coups de ces bouleversements.

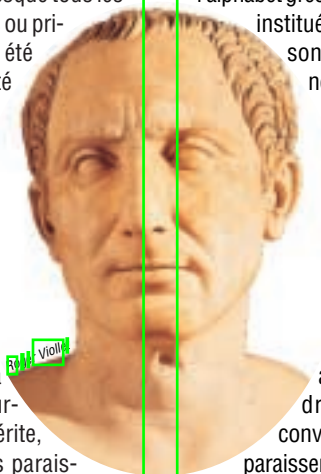
À l'époque de César, les druides n'ont toutefois pas disparu, ni perdu tout leur pouvoir. Selon un texte de Cicéron, Diviciac, noble Éduen qui joue un grand rôle dans le récit de la *Guerre des Gaules* (les Éduens occupaient une partie du Nivernais et de la Bourgogne, entre la Saône et la Loire), est druide. Il accompagne César dans ses campagnes militaires, il lui sert d'informateur et d'ambassadeur. Diviciac est l'une des pièces maîtresses sur l'échiquier politique que le conquérant met en place dès son arrivée en Gaule. Pourquoi César ne nous signale-t-il pas que son précieux allié est druide ? Cette qualité ne peut lui être indifférente : il est lui-même Grand Pontife, magistrat sacerdotal à la tête du collège des pontifes qui ont en charge la vie religieuse de l'État romain.

Cette question n'est pas secondaire. Les relations entre César et Diviciac, mais aussi entre César et Posidonius, sont à la base de toute notre documentation sur les druides. Pour les comprendre, il nous faut remonter dans le temps, et retracer quelques étapes de l'histoire des druides ; nous verrons que leur rôle social et leur pouvoir ont évolué au cours de l'histoire des peuples celtes.

Les plus anciennes mentions littéraires concernant les druides datent de

Les druides vus par César

Dans toute la Gaule, il n'y a que deux classes d'hommes qui comptent quelque peu et soient estimées. [...] l'une est celle des druides, l'autre est celle des chevaliers. Les premiers s'occupent des affaires religieuses, ils ont en charge les sacrifices publics et privés, expliquent les pratiques religieuses ; à eux se joignent de très nombreux jeunes gens qui viennent recueillir leur enseignement ; enfin ces druides sont chez eux en grand honneur. En effet, ils rendent les jugements dans presque tous les conflits, qu'ils soient publics ou privés, et si quelque crime a été commis, si un meurtre a été perpétré, s'il y a un conflit au sujet d'un héritage ou au sujet de limites, ce sont eux qui jugent, qui décident du dédommagement et de la peine. [...] Tous ces druides obéissent à l'un d'entre eux, celui qui, parmi eux, a la plus grande autorité. À sa mort, si l'un des druides surpasse les autres par son mérite, il lui succède ; si plusieurs paraissent avoir des compétences égales, ils s'affrontent pour obtenir ce pouvoir par le suffrage des druides, quand ce n'est pas par l'emploi des armes. À une date fixe de l'année, ils siègent en un lieu consacré du pays des Carnutes, qui est considéré comme le centre de toute la Gaule. Là, de partout, tous ceux qui ont des différends se réunissent et obéissent à leurs décisions, à leurs jugements. Leur doctrine aurait été créée en Bretagne et, de là, elle aurait été transmise en Gaule – estime-t-on ; et, aujourd'hui encore, ceux qui veulent la connaître plus en détail, le plus souvent, vont là-bas s'y instruire.



Les druides ne participent pas habituellement à la guerre et ne paient pas de contribution comme le reste de la population [...] [Les druides] estiment qu'il n'est pas permis par la religion de confier à l'écriture cet enseignement, tandis que pour pratiquement tout le reste, affaires publiques ou privées, l'alphabet grec est utilisé. Ils semblent avoir institué cette règle pour deux raisons : d'une part, parce qu'ils ne veulent pas que leur doctrine soit divulguée ni que, d'autre part, ceux qui apprennent, confiants dans l'écriture, mettent moins à contribution leur mémoire. Il arrive en effet, assez ordinairement, qu'apprenant sous la protection de l'écrit, on relâche son attention et sa mémoire. Les druides avant tout veulent convaincre que les âmes ne disparaissent pas, mais qu'après la mort elles quittent les corps pour aller dans d'autres corps ; ils pensent que cette croyance stimule au plus haut point le courage, parce qu'elle fait mépriser la mort. Par ailleurs, ils dissertent abondamment sur les astres et leur mouvement, sur la grandeur du monde et de la Terre, sur la nature des choses, sur la puissance des dieux immortels et sur leurs compétences, et ces connaissances, ils les transmettent à la jeunesse.»

Guerre des Gaules, chapitre VI
(Traduction J.-L. Brunaux, Ed. Errance)

la fin du III^e siècle avant notre ère. On les doit à Antisthène de Rhodes, qui écrivit le traité *La magie*, et à Sotion d'Alexandrie qui, à la même époque, rédigea la première histoire de la philosophie. Ces deux mentions prouvent, d'une part, que le druidisme était alors un phénomène assez important pour être connu des Grecs et, d'autre part, que dans ce mouvement la philosophie avait déjà une place aussi grande que les pratiques magiques ou divinatoires. C'est donc au II^e siècle avant notre ère qu'il faut placer la période d'expansion maximale du druidisme.

L'émergence du druidisme

Quand et où les druides sont-ils apparus ? Les opinions divergent déjà dans l'Antiquité. Alors que les historiens de la philosophie rapprochent les doctrines druidiques de celles de Pythagore et supposent qu'elles ont une origine orientale, César mentionne une autre hypothèse, énoncée plus tard : le druidisme serait apparu dans l'île de Bretagne. Cette hypothèse, suivant les termes mêmes du conquérant romain, a été très tôt mise en doute par les historiens. Aujourd'hui l'archéologie l'infirme définitivement. De nombreuses fouilles montrent en effet que les Celtes, des populations belges, n'arrivèrent en Grande-Bretagne que dans le courant du III^e siècle avant notre ère. Comment, en moins d'un siècle, le druidisme y serait-il apparu et s'y serait-il développé, aurait-il diffusé en Gaule et se serait-il fait connaître de lointains auteurs grecs ?

Les Belges ont plus vraisemblablement introduit le druidisme dans cette île, où il a été conservé sous sa forme première, comme d'autres traits de civilisation, archaïsmes dont César s'étonne quand il aborde ses rivages. Ainsi, au I^{er} siècle avant notre ère, le druidisme des Bretons apparaît-il aux autres confréries comme un conservatoire de mythes et de rites, dont la tradition, pourtant hautement vénérée par ces dépositaires, adeptes de la culture orale, commence à s'estomper sur le continent.

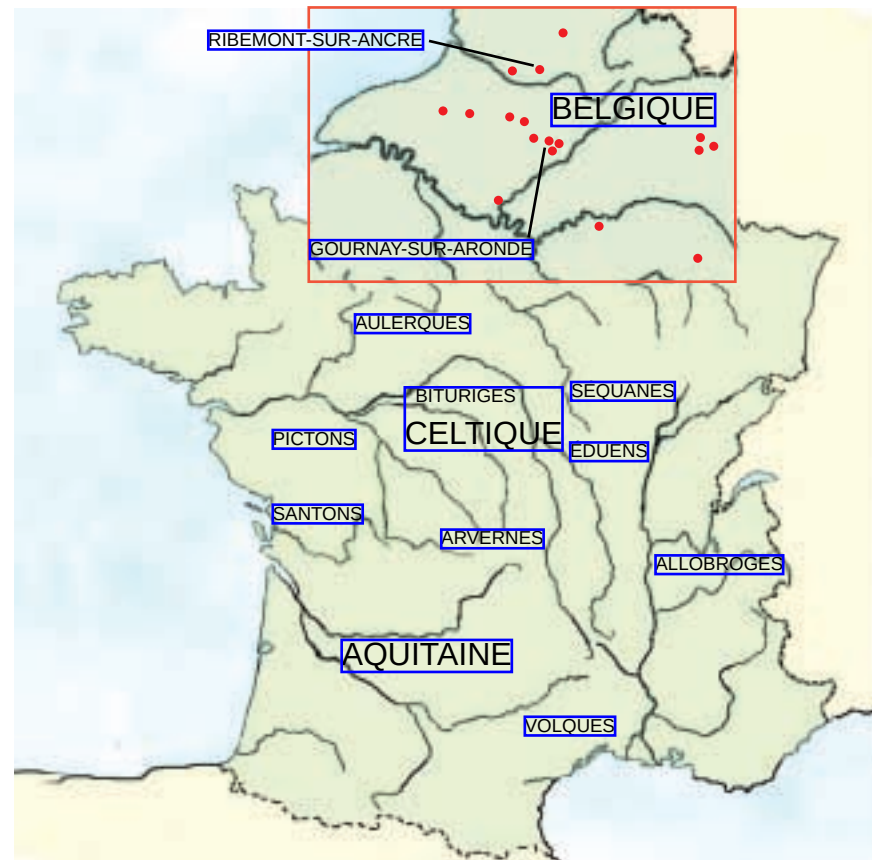
Rien n'indique en outre que le druidisme, en tant que doctrine constituée, soit né en Gaule ni même qu'il y soit présent avant la fin du IV^e siècle. Aux V^e et IV^e siècles avant notre ère, la religion ne livre aucune trace archéologique nettement repérable sur le territoire : les lieux de culte nous

demeurent inconnus, probablement parce que l'activité religieuse se déroule dans le cercle restreint de la famille, dans la demeure ou à proximité des sépultures. Les dernières invasions celtiques du début du III^e siècle (dont celle des Belges) auraient donc introduit en Gaule la philosophie et la conception sacerdotale des Celtes d'Europe centrale et des Galates d'Asie Mineure. La connaissance qu'en ont les Grecs dès le III^e siècle provient probablement des rivages orientaux de la Méditerranée, où transitent et s'installent plusieurs peuples celtes.

Ces nouvelles populations qui s'installent en Gaule à la fin du IV^e et au début du III^e siècle avant notre ère arrivent avec des conceptions religieuses affirmées : elles construisent rapidement et simultanément de grands sanctuaires. La taille de ceux-ci nécessite de puissants corps de prêtres pour les desservir. Ces prêtres sont capables de concevoir des constructions monumentales et complexes, colonnades, temples ou porches de géométrie régulière. Ils possèdent donc un savoir architectural et des connaissances théoriques

corollaires en mathématiques et en astronomie. La complexité des rites accomplis sur les sanctuaires, que nos fouilles ont permis de reconstituer, dénote aussi des connaissances d'ordre plus pratique, notamment en anatomie humaine et animale. Ces savants religieux sont les druides, dont la littérature grecque et romaine évoque si souvent le savoir multiple.

Ces corps sacerdotaux comprennent de grands intellectuels, des philosophes qui prétendent comprendre la langue et le désir des dieux, et souhaitent mettre en pratique leur système idéologique. Comme les grands philosophes grecs des V^e et IV^e siècles avant notre ère, ils recherchent une constitution politique idéale et exercent leurs compétences autant dans la politique et dans la diplomatie que dans le domaine divin. Les théories des druides, et les druides eux-mêmes, essaient en Gaule. Ces prêtres-philosophes affermissent leur pouvoir en trouvant un équilibre entre des régimes royaux condamnés à disparaître, des noblesses imbues d'un pouvoir guerrier et financier trop grand et des



2. LA PLUPART DES SANCTUAIRES gaulois découverts à ce jour (points rouges) sont situés sur le territoire de la Gaule Belgique, l'une des trois provinces que définit César, avec la Celtique et l'Aquitaine. Les noms portés sur cette carte sont ceux des principales nations gauloises à l'époque de la conquête romaine.



3. LA FOUILLE en cours du sanctuaire de Ribemont-sur-Ancre, dans la Somme, a révélé le fossé (traits rouges) qui entoure l'enclos sacré. Le long de la palissade intérieure, de nombreux restes humains (en rose) ainsi qu'un temple et un autel (carrés rouges) témoignent du culte rendu aux guerriers. À l'intérieur, un charnier a été découvert (en bleu). Les traces blanches au sol sont les vestiges d'un sanctuaire gallo-romain, dont le plan reprend celui du sanctuaire celte. Cette coïncidence fréquente incite aujourd'hui à rechercher les lieux de cultes celtes sous les temples romains construits postérieurement.

masses plébéiennes nombreuses et productrices de richesses matérielles.

Les druides s'emparent d'un pouvoir religieux et juridique contesté depuis longtemps aux roitelets celtes. La description de César laisse entendre que les druides ne s'occupent guère des affaires militaires. En revanche, elle est moins précise pour ce qui est du pouvoir proprement politique. Un auteur certes tardif, mais qui reprend les sources alexandrines du II^e siècle avant notre ère, Dion, dit Chrysostome, remarque à la fin du I^{er} siècle : «[Les druides] commandaient, les rois n'étant que leurs serviteurs et les ministres de leurs volontés.» Quelle est la part de caricature d'une telle description? C'est en tout cas un autre témoignage de la tendance qu'ont les druides à étendre leurs compétences à toutes les sphères de la société.

Les druides, jusqu'au I^{er} siècle avant notre ère, sont d'extraction noble : ils sont peut-être les puînés des grandes familles ou ceux dont les capacités physiques ne permettent pas la carrière militaire. À ce point de vue, César est explicite : les druides échappent à l'impôt (ce qui sous-entend qu'ils auraient dû en payer), ils enseignent aux enfants

nobles, ils conseillent les rois, les sénats, les assemblées guerrières ou juridiques, toutes institutions composées de nobles. Cette origine patricienne conforte certainement leur tentation de participer à la vie politique tumultueuse des grandes nations gauloises.

Comme à Rome, fonction sacerdotale et responsabilité politique se mêlent. Aussi ne faut-il pas s'étonner que César ne voie en Diviciac qu'un prince allié, capable de persuader les Éduens des bienfaits de la loi romaine. Sa qualité de druide est l'équivalent de celle de pontife pour César, marchepied nécessaire à une carrière politique.

Le déclin après la conquête

Ce rôle, mis à contribution par le proconsul romain qui utilise plus la diplomatie et la manipulation politique que la stratégie guerrière, n'est pas toléré après la conquête. Les Romains n'interdisent pas la religion gauloise : ils respectent les lieux de culte indigènes, ne tentent pas d'imposer leurs divinités et attendent que, de leur propre mouvement, les Gaulois se romanisent. Ils n'acceptent toutefois pas que

des prêtres se mêlent de politique. Auguste leur porte un premier coup en interdisant aux druides la dignité de citoyen. Tibère pourchasse ceux qui se livrent à la divination ou à des prophéties, dont le caractère séditieux est aisément imaginable. Enfin, Claude interdit définitivement tout culte qualifié de druidique.

Plinie, dans la seconde moitié du I^{er} siècle, décrit les druides comme des mages, voire de vulgaires sorciers. Pomponius Mela indique, à la même époque, qu'ils se sont réfugiés dans la clandestinité, où ils continuent à enseigner à quelques jeunes nobles. En 70, lors de la révolte dite de Civilis, nom du chef batave qui entraîne avec lui les tribus germanes et une grande partie de la Gaule, ils attisent la résistance contre l'occupant romain en diffusant des prophéties sur la fin de l'Empire. À partir du moment où ils quittent leurs sanctuaires et se séparent de la classe au pouvoir, les druides se coupent de leur base traditionnelle et laissent la place aux éléments les moins élevés de leurs confréries, qui accordent plus d'importance à la magie qu'à la raison. Ce sont ces mages qui gagnent les confins du monde celtique, la Germanie ou les îles Britanniques. Les croyances qu'ils répandent n'ont qu'un lointain rapport avec la religion philosophique des druides de la période hellénistique.

L'identification du druidisme à cette tradition magique fut facilitée par les récits des voyageurs grecs et latins des périodes précédentes. Ceux-ci décrivent en effet les cultes célébrés par les druides comme des sujets d'étonnement afin de flatter le goût de l'anecdote et de l'exotisme des lecteurs antiques. La religion des Celtes était-elle toutefois si différente de celles pratiquées par les peuples voisins? Les comparaisons linguistiques et mythologiques éclairent sa nature sociale et culturelle.

Dès le début du XIX^e siècle, l'Allemand Jakob Grimm, l'un des deux célèbres frères Grimm, note que deux peuples parlant des langues de structure et de vocabulaire proches devaient avoir des croyances religieuses semblables : les mots de même racine reflètent des formes conceptuelles communes. Les premières comparaisons entre les langues européennes, puis entre les langues dites «indo-européennes», font apparaître de telles identités dans le domaine religieux.

En 1918, dans un article intitulé *Les correspondances de vocabulaire entre l'indo-iranien et l'italo-celtique*, le celtsisant Français Joseph Vendryes relève plusieurs similitudes entre ces quatre vocabulaires, dans les domaines religieux, éthique, juridique et politique. Il en conclut : «L'Inde et l'Iran d'une part, de l'autre l'Italie et la Gaule, ont conservé en commun certaines traditions religieuses, grâce au fait que ces quatre pays sont les seuls du domaine indo-européen à posséder des collèges (ou des classes) de prêtres. Brahmanes, druides ou pontifes, prêtres du védisme ou de l'avestisme, malgré les différences qui ne frappent que trop les yeux, ont tout de même ceci de commun de maintenir chacun une tradition antique. Ces organisations sacerdotales supposent un rituel, une liturgie du sacrifice, bref un ensemble de pratiques, de celles qui se renouvellent le moins.[...] Mais il n'y a pas de liturgie ni de rituel sans des objets sacrés dont on garde les noms, sans des prières que l'on répète sans y rien changer. De là, dans les vocabulaires, des conservations de

mots qu'on ne s'expliquerait pas autrement.»

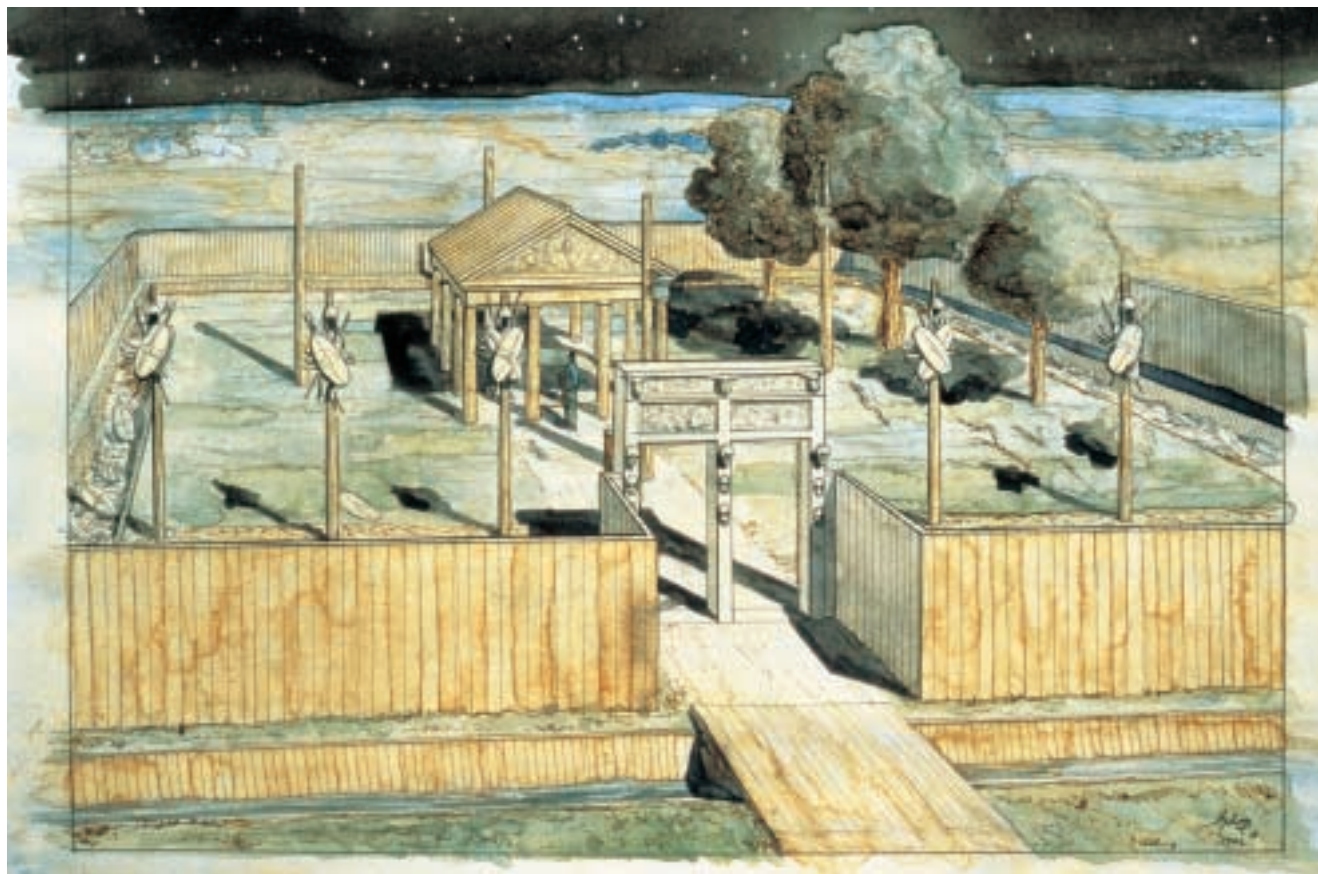
Ce constat est aujourd'hui confirmé par l'archéologie : la religion gauloise n'est pas isolée parmi les autres cultes du monde antique. Dans les formes du culte ou dans la nature du personnel sacerdotal, les similitudes avec les faits latins, grecs ou orientaux sont nombreuses. Les druides ont de multiples points communs avec les flamines, prêtres romains qui ont gardé les aspects les plus archaïques, les mages perses et les brahmanes. Issus souvent de familles royales, ils forment des castes ou des classes fermées qui, pour autant, ne les éloignent pas des plus hautes responsabilités. Ils tissent une subtile dialectique avec le pouvoir militaire, au prix d'un conservatisme dans les façons de vivre, le mode de recrutement, la pratique du culte.

Les sanctuaires celtes

La découverte, depuis 20 ans, sur le territoire de la Gaule, de sanctuaires analogues à ceux du monde gréco-romain a confirmé ces similitudes. Ces

sanctuaires accueillait des rites beaucoup plus riches et complexes que la simple cueillette du gui. Ce sont des enclos sacrés, matérialisés par des murs, contenant des autels et des temples et où l'on pénètre par un porche monumental. Toutes ces constructions sont de bois et de torchis, mais richement décorées et conçues dans une architecture inspirée des modèles grecs : les temples, de plan quadrangulaire et ouverts par une colonnade, ressemblent aux temples grecs. Les Celtes, qui s'aventurèrent dans les grands sanctuaires grecs de Delphes ou de Dodone à la fin du IV^e siècle, y ont-ils trouvé des modèles, ou leurs influences sont-elles plus anciennes encore?

En France, une cinquantaine de ces sanctuaires ont été reconnus. Ils sont en majorité sur le territoire des peuples belges (Picardie, Normandie, Champagne-Ardenne). Les plus anciens datent de la fin du IV^e ou du début du III^e siècle avant notre ère ; ils sont utilisés jusqu'à la conquête, puis sont progressivement romanisés. Réparties régulièrement, ces installations



4. LE SANCTUAIRE DE GOURNAY-SUR-ARONDE, dans l'Oise, a un plan typique des sanctuaires celtes. On accédait à l'enceinte sacrée, entourée d'un fossé et d'une palissade, par un porche. En son centre, un petit temple carré abritait une fosse sacrée où étaient

précipités les animaux sacrifiés. Le temple est ici dessiné sous une forme classique que les Celtes ont pu contempler en Grèce ou en Italie lors de leur migration à la fin du IV^e siècle. Les os étaient ensuite exhumés et les crânes exposés sur le porche.

marquent l'appropriation du territoire par les nouvelles tribus celtes que sont les Belges, et indiquent ensuite l'organisation de ce même territoire. La fouille d'une dizaine de sanctuaires montre l'existence d'une hiérarchie : sanctuaire local, en liaison avec une communauté villageoise ou urbaine, sanctuaire symbolisant le territoire occupé par une tribu, sanctuaire central de la cité, commun à tout le peuple, enfin très grand sanctuaire, peut-être de nature confédérale, où se scellent les alliances guerrières ou diplomatiques.

L'un de ces grands sanctuaires est en cours de fouille à Ribemont-sur-Ancre, dans la Somme. À la fois le plus riche et le mieux conservé des lieux de culte de l'Europe celtique, cet exemple des grands sanctuaires éclaire la nature et la fonction d'aménagements complexes, souvent mal conservés sur les autres sites. Ces installations architecturales et les vestiges de l'activité cultuelle qu'elles permettaient révèlent la mentalité religieuse des Gaulois.

Un enclos sacré, propriété divine, était entouré d'autres espaces, aussi enclos, aux fonctions certainement multiples. La surface restreinte de l'aire sacrée (50 mètres par 50 mètres) et son encombrement par les installations cultuelles et les offrandes ne permettaient l'accès qu'à quelques dizaines de participants aux cultes, prêtres et dignitaires politiques. Ce lieu était toutefois alimenté du produit du butin de milliers de guerriers qui y entassaient les armes et les corps des ennemis tués. La périphérie de l'espace sacré était aménagée pour accueillir les corps d'armée triomphants qui venaient rendre hommage à un dieu de la guerre, et des foules populaires qui y pratiquaient leurs dévotions. Un vaste enclos devant l'aire sacrée contient une multitude de foyers, vestiges des pratiques sacrificielles les plus communes. Au-delà de cette esplanade, de vastes espaces ouverts, où un théâtre et deux ensembles thermaux ont été installés pendant l'époque gallo-romaine, accueillaient peut-être, dès l'époque gauloise, des rassemblements de nature politique, juridique ou même ludique.

Qui étaient les desservants, nécessairement nombreux, de ces installations cultuelles et politiques? La diversité des activités qui se déroulaient à Ribemont-sur-Ancre (sacrifices, érection des trophées, rites de la vie civile et militaire, assemblées politiques et peut-être judiciaires, fêtes) exigeait les compétences que Posidonius, via César, attribue aux druides. Ces compétences étaient-elles réunies chez les mêmes hommes ou, au contraire, partagées suivant une hiérarchie? Les textes sur ce sujet ne sont guère explicites. Les fouilles des habitats situés près du sanctuaire de Ribemont-sur-Ancre apporteront des éléments de réponse. Il nous reste aussi à découvrir des sépultures de druides, dont aucune n'a été reconnue à ce jour.

Des sacrifices animaux

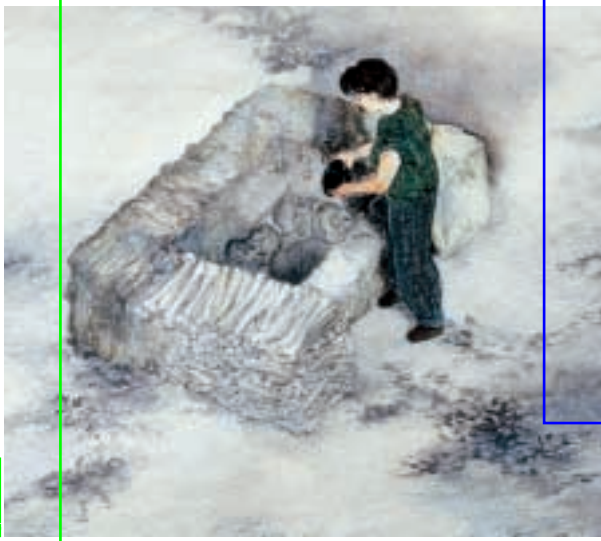
Nous avons en revanche reconstitué des gestes rituels qui s'accomplissaient en ces lieux. Le premier grand sanctuaire gaulois reconnu comme tel et que nous avons fouillé exhaustivement, à Gournay-sur-Aronde, dans l'Oise, a révélé une forme originale de sacrifice animal. Au centre de l'aire sacrée, l'autel était une grande fosse de quatre mètres de longueur et de deux mètres de profondeur. Des taureaux, des vaches et des bœufs y étaient amenés et sacrifiés de différentes façons : ils étaient le plus sou-

vent égorgés, parfois abattus d'un coup de hache sur la nuque, d'un coup de merlin ou de lance dans le frontal, opération beaucoup plus difficile à réaliser. La bête était immédiatement précipitée dans la fosse-autel, sans que soit prélevé le moindre morceau pour les prêtres et les assistants. L'animal était abandonné à une divinité censée habiter dans la terre et communiquer avec les humains par l'intermédiaire de la fosse sacrée.

La dépouille animale demeurait là de six à huit mois, le temps que le produit de la putréfaction pénétre le sol et alimente la divinité. À une date indiquée par l'état des relations anatomiques de la carcasse (seule la colonne vertébrale devait encore se maintenir), les restes étaient exhumés. Le crâne était accroché au porche du sanctuaire, une partie des ossements quittait le sanctuaire et une autre était jetée dans le fossé de clôture de l'aire sacrée. Un tel type de culte, adressé à une divinité de la Terre, proche des morts et honorée par des victimes animales entières qu'on laisse pourrir, est bien connu dans le monde grec : on le qualifie de «chthonien».

Si l'on en croit la nature des offrandes, plus de 2 000 armes et aucun autre objet, ce sanctuaire de Gournay-sur-Aronde était dédié à une divinité de la guerre (de telles divinités ont souvent un caractère infernal) et, comme à Ribemont-sur-Ancre, la communauté dont il dépendait venait y déposer son butin de guerre sous forme de trophées. Les armes que nous avons exhumées ne sont qu'une petite part d'un nombre considérable de panoplies complètes prises aux ennemis et rapportées au sanctuaire : elles témoignent de multiples combats. Chaque panoplie comprenait une épée, dans son fourreau magnifiquement orné, attachée à l'aide d'un baudrier en métal, un bouclier et des lances.

Comme les dépouilles animales, ces trophées suivaient un cycle de putréfaction et de rejet dans le sanctuaire. Laisés à l'air pour qu'ils s'y dégradent, on attendait qu'ils tombent au sol pour les détruire symboliquement et les rejeter avec les os de bovins dans le fossé de clôture



5. LES OS DES GUERRIERS, ramassés sur les dépouilles après la disparition des chairs, étaient traités en plusieurs étapes. Ils étaient d'abord empilés pour fabriquer les parois d'un autel. Ils étaient ensuite cassés et brûlés, puis jetés dans une fosse sacrée qui assurait une communication entre les hommes et une divinité souterraine. Celle-ci régnait sur les morts et assurait le cycle perpétuel de la régénération.



6. UN CHARNIER DE 70 CORPS sans tête a été découvert le long de l'enceinte sacrée du sanctuaire de Ribemont-sur-Ancre, dans la Somme. Il s'agit probablement d'ennemis, ramassés sur le champ de bataille. Les corps accrochés en position verticale et équipés de leur panoplie guerrière pourrissaient sur place, sans aucune intervention humaine.



de l'aire sacrée. Là encore, cette pratique du trophée est proche de celle en vigueur en Grèce ou à Rome : une loi attribuée à Numa, deuxième roi légendaire de Rome, interdisait de remonter les trophées, alors constitués d'armes réelles, que le temps faisait tomber de leur support, comme si la nature seule devait mettre un terme à la vengeance contre les ennemis et à l'orgueil de la victoire.

Des trophées humains

À Ribemont-sur-Ancre, nous avons mis en évidence des rites plus macabres : les trophées guerriers contiennent les armes, mais aussi les corps des ennemis, privés de leur tête. Posidonius et d'autres auteurs nous apprennent que les Gaulois ont pour coutume, chaque fois qu'ils tuent un ennemi, de lui prendre le crâne, qu'ils rapportent ensuite chez eux, comme un butin personnel. Ces corps sans tête seraient donc le produit d'un ramassage sur un champ de bataille, la part revenant à la divinité ou à la communauté qu'elle est censée incarner.

Ce butin funèbre, après avoir été rapporté en triomphe par les vainqueurs, était traité en plusieurs phases. Une partie des corps demeurait à la périphérie du sanctuaire, où elle y pourrissait sans intervention humaine ni animale (l'absence de traces de charognage indique que ces dépouilles étaient protégées des prédateurs). Une sorte de « charnier » d'au moins 70 corps a été mis au jour. À l'intérieur du sanctuaire et le long de sa clôture, d'autres corps étaient présentés, probablement en position verticale, là aussi jusqu'à ce qu'ils se délabrent et tombent sur le sol. Les membres

devaient alors être prélevés pour constituer d'étranges constructions, des sortes de boîtes cubiques aux parois constituées d'os longs alignés et entrecroisés. Bon nombre de ces os longs étaient ensuite percutés contre une pierre, afin vraisemblablement d'en extirper la moelle. Les esquilles d'os étaient alors brûlées et déversées dans un trou cylindrique creusé dans le sol sacré, encore une sorte d'autel « chthonien ».

Ce traitement funéraire distingue les guerriers des autres hommes : dans le Nord de la Gaule, les sépultures de cette époque ne livrent pas de restes de guerriers. L'hommage rendu dans le sanctuaire est collectif, comme cela était l'usage en Grèce dans le courant du V^e siècle.

Ces actes ne prennent un sens que s'ils sont confrontés aux modestes témoignages de la littérature grecque et latine. La dégradation naturelle des trophées a certainement le même sens qu'en Grèce et à Rome. Plutarque a tenté de l'expliquer dans ses *Questions romaines* : le trophée a pour mission de fixer, pendant un temps, une violence d'ordre divin que les hommes seuls ne peuvent maîtriser. La précaution de ne pas utiliser le couteau, de laisser la nature suivre son cours, le soin pris à libérer la moelle, probablement considérée comme le siège de l'âme, le retour des morts vers une divinité infernale dont les Gaulois considéraient qu'ils étaient issus autant d'échos rituels aux croyances druidiques sur les cycles de la vie et des êtres, une théorie certainement très élaborée sur la vie, la mort et l'éternité de l'âme, proche de la métempsycose des philosophes grecs.

De telles découvertes archéologiques et les premiers résultats des études qu'elles suscitent font progresser la connaissance de la vie quotidienne des druides. Elles nous rappellent surtout que, hormis quelques lignes de Posidonius, nous ne possédons sur eux aucune information. Les rites que l'archéologie des sanctuaires gaulois restitue partiellement étaient soigneusement tenus secrets, à l'abri des monumentales enceintes sacrées et au plus profond de la mémoire orale. Ils ne sont qu'une part infime d'un ensemble de connaissances et de croyances que le monde dit « barbare » avait acquises.

Le formalisme de la religion romaine a permis aux plus anciennes institutions de se maintenir encore au Haut-Empire, voire d'être restaurées. Le régime des castes en Inde a pérennisé la place des brahmanes. Les druides, en revanche, n'ont pas survécu à l'occupation romaine, au moins dans leur état authentique.

Jean-Louis BRUNAUX est chargé de recherches au Laboratoire d'archéologie d'Orient et d'Occident du CNRS et de l'École normale supérieure.

Christian GOUDINEAU, *César et la Gaule*, éditions Errance, Paris, 1990.

Les sanctuaires celtiques et le monde méditerranéen, Actes du colloque de Saint-Riquier, édité par J.-L. Brunaux, éditions Errance, Paris, 1991.

Camille JULIAN, *Histoire de la Gaule*, éditions Hachette, Paris, 1993.

S. PIGGOTT, *The Druids*, éditions Thames and Hudson, Londres, 1994.

Jean-Louis BRUNAUX, *Les religions gauloises*, éditions Errance, Paris, 1996.

Les superordinateurs analysent la turbulence

PARVIZ MOIN • JOHN KIM

Seuls les ordinateurs les plus puissants parviennent à décrire les écoulements turbulents simples. Dans certains cas, les calculs révèlent des possibilités de commander la turbulence.

Les fluides en mouvement nous entourent et nous font vivre : du sang circule dans notre corps et de l'air est en mouvement dans nos poumons, certains de nos véhicules se déplacent dans la couche d'air qui enveloppe notre planète, tandis que d'autres sillonnent l'eau des lacs et des océans, alimentés par des fluides, tels le carburant et le comburant, qui se mélangent dans les chambres de combustion des moteurs. Nombre de problèmes environnementaux ou énergétiques auxquels nous sommes aujourd'hui confrontés ne peuvent être abordés sans une connaissance détaillée de la mécanique des fluides.

La plupart des écoulements de fluides qui intéressent les scientifiques et les ingénieurs sont turbulents. Aussi les ingénieurs doivent comprendre la turbulence pour réduire les frottements aérodynamiques des automobiles ou des avions de ligne, accroître la manœuvrabilité des avions de combat et améliorer le rendement des moteurs. Les médecins aussi doivent faire face à la turbulence quand ils analysent l'écoulement du sang dans le cœur et, notamment, dans le ventricule gauche, où le mouvement est particulièrement rapide.

Qu'est-ce que la turbulence ? Examinons deux exemples. Si nous ouvrons légèrement un robinet de cuisine, le filet d'eau qui coule est lisse et homogène :

c'est ce qu'on nomme un écoulement laminaire. Puis, si nous ouvrons davantage le robinet, l'écoulement devient irrégulier et sinueux : il est « turbulent ». Ce même phénomène s'observe avec la fumée de cigarette : juste au-dessus de la cigarette, son écoulement est laminaire, mais, un peu plus haut, la fumée ondule de façon complexe, turbulente.

Les écoulements turbulents sont composés de fluide qui zigzague, qui s'enroule sur lui-même et semble se déplacer au hasard, autour de la direction générale du mouvement. Cet état chaotique survient lorsque la vitesse du fluide est supérieure à une limite après laquelle la viscosité ne suffit plus à régulariser les mouvements.

1. CETTE SIMULATION DE LA NAVETTE SPATIALE en vol a été superposée à une photographie de l'appareil. Sur la moitié inférieure de l'image, les couleurs indiquent les valeurs de la pression de l'air à la surface de la navette (le bleu correspond à une pression faible, le rouge à une pression élevée).

La turbulence n'est pas toujours indésirable ; nombre d'ingénieurs cherchent à l'amplifier. Dans les cylindres d'un moteur à combustion interne, par exemple, la turbulence améliore le mélange du carburant et de l'air, de sorte que la combustion est plus efficace et plus propre. Grâce à la turbulence créée par le relief bosselé des balles de golf, les bons golfeurs envoient les balles à 250 mètres, au lieu des 100 mètres qu'ils atteindraient avec des balles lisses.

La turbulence doit probablement sa mauvaise réputation à la difficulté de son analyse : bien qu'omniprésente dans la nature, elle reste mal comprise quantitativement. Pour Richard Feynman, la turbulence était le plus important des problèmes ouverts en physique classique. Lors d'une allocution qu'il prononça en 1932 devant l'Association britannique pour l'avancement de la science, le physicien britannique Horace Lamb exprima la même idée avec plus d'humour : «Je suis maintenant un vieil homme, et je mourrai bientôt, mais quand j'irai au ciel, il y a deux sujets sur lesquels j'espère avoir des éclaircissements : l'un est l'électrodynamique quantique, l'autre est le mouvement turbulent des fluides. Pour le premier, je suis sûr d'avoir une réponse, mais pour le second...»

Lamb ne prévoyait pas l'avènement des superordinateurs, qui donnent enfin des éléments de compréhension de la turbulence. Les informations ainsi recueillies ont déjà débouché sur des techniques, en phase de mise

au point, que l'on utilisera pour réduire de plusieurs pour cent la traînée aérodynamique des ailes d'avion, ce qui économisera le carburant. De surcroît, ces techniques permettront aux ingénieurs de perfectionner les moteurs d'avion à réaction.

Malgré son caractère abscons, l'étude de la turbulence est l'une des composantes principales de la dynamique des fluides, discipline qui traite du mouvement des liquides et des gaz. L'utilisation d'ordinateurs rapides pour l'étude des écoulements fluides turbulents est une partie importante de la mécanique des fluides numérique, une discipline qui se développe rapidement. Ces dernières années, les physiciens des fluides ont utilisé des superordinateurs pour simuler des écoulements aussi divers que celui de l'eau sur la coque des bateaux de la Coupe de l'America ou que celui du sang dans un cœur artificiel.

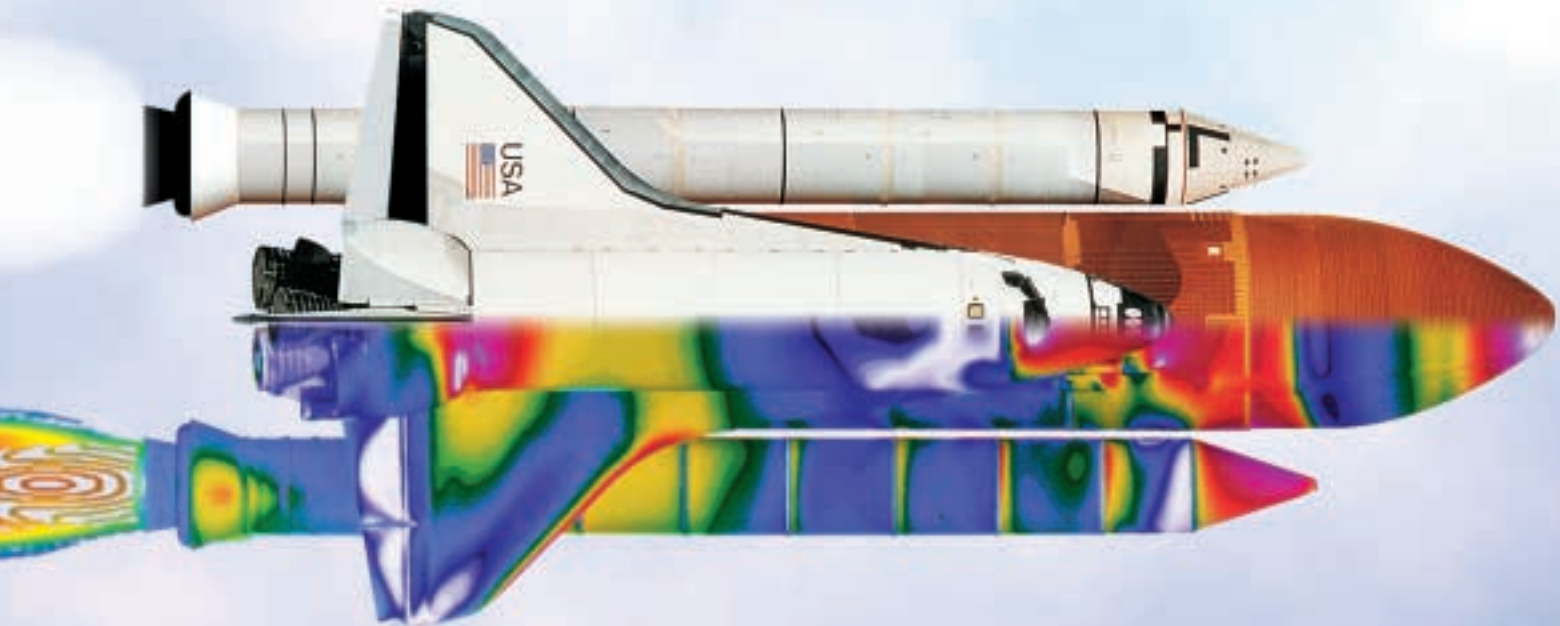
Une longue gestation

En quoi consiste la simulation numérique d'un écoulement fluide ? L'ordinateur résout une série d'équations et détermine, en tout point de l'espace proche d'un objet, la vitesse et la pression du fluide qui s'écoule autour de lui. Les équations utilisées furent découvertes indépendamment, il y a plus d'un siècle et demi, par l'ingénieur français Claude Navier et par le mathématicien irlandais George Stokes. Les équations de Navier-Stokes dérivent

directement des lois newtoniennes du mouvement. L'emploi d'ordinateurs pour résoudre ces équations a engendré la mécanique des fluides numérique, après un mariage qui fut l'un des plus grands succès de la dynamique des fluides, depuis la formulation même de ces équations.

Pourtant le flirt dura longtemps : ce fut seulement à la fin des années 1960 que les ordinateurs atteignirent des vitesses de calcul suffisantes pour résoudre les équations de Navier-Stokes dans des cas simples, tels les écoulements lents autour d'un obstacle, dans un espace à deux dimensions seulement. Auparavant, les essais en soufflerie étaient le seul moyen de tester l'aérodynamique des prototypes d'avion. Aujourd'hui, les ordinateurs ne sont pas encore assez puissants pour éviter le recours à la soufflerie, lors de la conception des nouveaux avions, mais l'étude numérique est de plus en plus présente dans les phases initiales de la conception, notamment lors du choix des dimensions et d'autres paramètres fondamentaux. Cette phase, qui procède par essais-erreurs, était très coûteuse, parce qu'elle nécessitait la construction et le test en soufflerie de chacun des modèles successifs. Grâce au rôle croissant pris par la mécanique des fluides numérique, le cycle de conception d'une aile comprend aujourd'hui entre deux et quatre tests en soufflerie, au lieu de 10 à 15 autrefois.

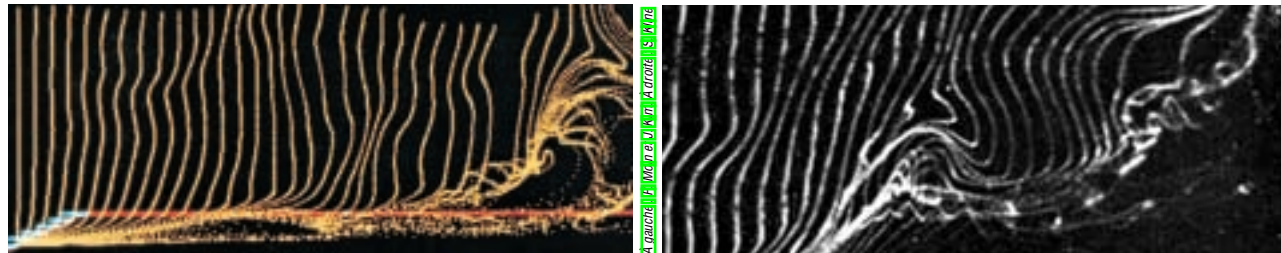
Parfois, les simulations sur ordinateur donnent même une vision plus réa-



Une grande étape de la simulation

Jusqu'en 1980, peu de chercheurs tentaient de simuler entièrement ne serait-ce qu'un écoulement turbulent extrêmement simple. Cette année-là, avec nos collègues du Centre de recherche Ames de la NASA, nous avons utilisé un prototype d'ordinateur parallèle, l'ILLIAC-IV, pour effectuer les plus grandes simulations de turbulence jamais réalisées. À partir de nos données, nous

avons réalisé un film de cinq minutes, qui montrait les trajectoires de particules traceuses dans un écoulement turbulent entre deux plaques parallèles (à gauche) ; il rappelait de manière remarquable les images obtenues 20 ans auparavant, à l'Université Stanford, lorsque des hydrodynamiciens avaient filmé un écoulement d'eau réel (à droite).



liste que les essais en soufflerie, car les résultats de ces derniers sont faussés par les parois du tunnel et par la structure qui soutient le modèle. En outre, comme certains engins du futur voleront à des vitesses plusieurs fois supérieures à celle du son, dans des conditions trop extrêmes pour être reproduites en soufflerie, la mécanique des fluides numérique est le seul outil fiable de description des comportements : les prochains avions hypersoniques atteindront 20 fois la vitesse du son et les avions stratosphériques traverseront les couches très peu denses de l'atmosphère.

Les fabricants de moteurs d'avion se fondent également sur les techniques numériques : aux États-Unis, un programme de recherches envisage d'atteindre, vers l'an 2003, une amélioration de 100 pour cent de la poussée rapportée au poids des moteurs d'avion et de réduire ainsi de 40 pour cent leur consommation en carburant. En Europe, les lois de protection de l'environnement, de plus en plus dracونيennes, ont poussé les constructeurs à mettre en place un programme pour la réduction de l'émission des polluants par les réacteurs d'avion.

L'écoulement de l'air et du carburant dans les divers compartiments et conduits d'un réacteur est complexe. Une hélice aspire d'abord l'air dans une chambre interne, nommée compresseur, où sa pression est multipliée par 20 environ. Cet air comprimé est ensuite injecté dans une chambre de combustion, où il est mélangé au carburant et où s'effectue la combustion. Enfin, les gaz d'échappement, chauds et dilatés, actionnent une turbine qui entraîne l'hélice et le com-

presseur et, surtout, engendre une poussée en éjectant les produits de combustion à l'arrière du réacteur. Aujourd'hui, les ingénieurs utilisent la mécanique des fluides numérique pour concevoir les pales de la turbine, les conduits d'admission et les chambres de combustion. Ces simulations aident également à déterminer la forme des mélangeurs dans les foyers de réchauffe qui, sur les avions militaires, fournissent une poussée supplémentaire et augmentent la manœuvrabilité. Elles interviennent aussi pour la conception des nacelles, ces coques cylindriques qui enveloppent les réacteurs et sont accrochées sous les ailes.

L'utilisation des équations

Pour comprendre comment les ingénieurs utilisent les équations de Navier-Stokes, considérons l'écoulement de l'air sur un avion en vol. Les ordinateurs ne calculeront en détail l'écoulement de l'air autour d'un avion entier que dans plusieurs décennies, mais, en théorie du moins, les équations de Navier-Stokes permettent de déterminer la vitesse et la pression de l'air en tout point proche de la surface de l'avion. Les ingénieurs envisagent d'utiliser ces données pour calculer, dans diverses conditions de vol, tous les paramètres aérodynamiques intéressants : la portance, la traînée et les couples qui s'exercent sur l'avion.

La traînée est primordiale, car elle détermine le rendement énergétique de l'avion. Le carburant étant le principal poste financier de la plupart des compagnies aériennes, celles-ci investissent beaucoup pour réduire la traî-

née, ne serait-ce que dans des proportions limitées. Toutefois, si la portance est relativement facile à calculer, les couples des forces posent davantage de problèmes, et la traînée est le facteur le plus difficile à déterminer.

En effet, la traînée dépend beaucoup de la turbulence. Cette turbulence n'est pas celle des «trous d'air» qui imposent l'usage des ceintures en cours de vol ; même lorsqu'un avion vole régulièrement, l'écoulement de l'air à quelques centimètres de sa surface, dans un volume nommé couche limite, est turbulent. En raison de cette turbulence, l'air qui s'écoule rapidement à plusieurs millimètres de la surface des ailes s'approche très près de cette surface, où il est brusquement ralenti. Une force de réaction, opposée à cette force de freinage, s'exerce sur l'avion. Aussi les aérodynamiciens s'efforcent-ils de comprendre suffisamment les mécanismes qui engendrent et détruisent la turbulence pour la commander.

Afin de résoudre les équations de Navier-Stokes, les ingénieurs fournissent à l'ordinateur certaines variables nommées conditions initiales et conditions aux limites. Pour un avion en vol, les conditions initiales incluent la vitesse du vent et les perturbations atmosphériques telles que les courants d'air ; les conditions aux limites incluent une description mathématique de la forme de l'avion.

Avant d'appliquer ces équations au calcul de l'écoulement autour d'un avion, des spécialistes de l'analyse numérique transforment la surface de l'avion et l'espace qui l'entoure sous une forme utilisable par l'ordinateur : ils représentent l'avion et son envi-

ronnement par une série de points régulièrement espacés, le maillage. Puis ils fournissent les coordonnées du maillage et les paramètres qui leur sont associés au programme de résolution des équations de Navier-Stokes. L'ordinateur calcule ensuite la valeur des paramètres importants – la vitesse de l'air et la pression – en chaque point du maillage.

Le maillage permet de diviser le problème global (techniquement, on dit qu'il le « discrétise ») en autant de petits problèmes élémentaires que l'on a retenu de points. Les calculs étant effectués à intervalles réguliers pour simuler l'écoulement du temps, la simulation est également discrète dans le temps. Les résultats de la simulation sont d'autant plus précis que les points du maillage sont proches – et donc nombreux – et que les calculs opérés en ces points sont fréquents (quand l'intervalle de temps est bref). Pour la simulation d'écoulements autour de corps de formes complexes, la définition de la surface et du maillage sont des problèmes importants.

Un casse-tête de calcul numérique

En outre, la donnée des conditions aux limites et des conditions initiales ne garantit pas l'obtention d'une solution, du moins avec les ordinateurs actuels ou disponibles dans un futur proche. En effet, les équations de Navier-Stokes sont non linéaires : les variables figurant dans ces équations varient les unes en fonction des autres selon des lois de puissance supérieure à un. Les interactions de ces variables non linéaires engendrent alors des phénomènes à des échelles spatiales très différentes, ce qui complique beaucoup la résolution des équations. Ainsi les écoulements turbulents contiennent des tourbillons dont les plus gros peuvent être 1 000 fois plus gros que les plus petits. La dépendance globale est une autre complication : la pression du fluide en un point dépend de l'écoulement en de nombreux autres points. Cette corrélation entre les diverses parties du problème nécessite le calcul simultané des solutions en de multiples points.

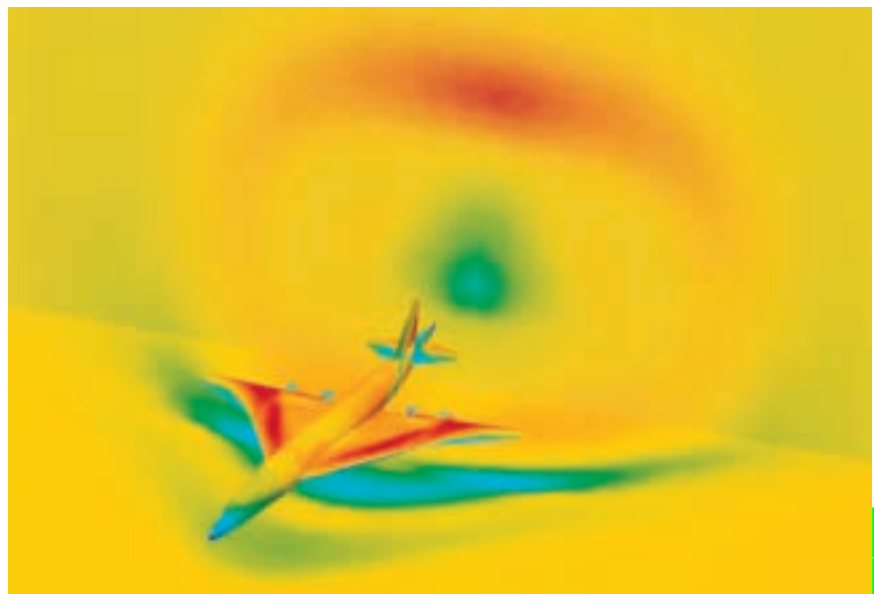
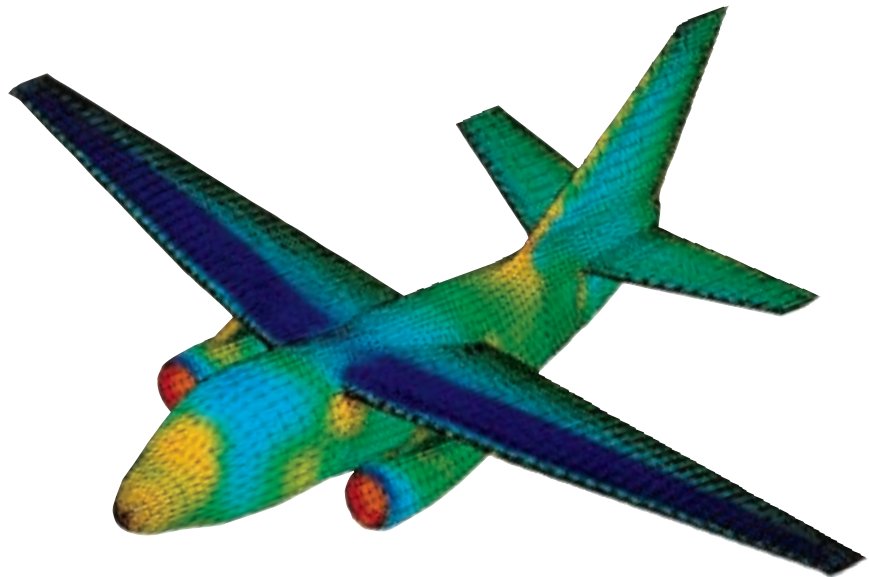
Si la description précédente donne une idée des aspects fondamentaux de la simulation en dynamique des fluides, elle ne tient pas compte de la

turbulence, sans laquelle toute évaluation des possibilités et des limitations réelles des simulations est infondée. Nous le verrons : les difficultés engendrées par la turbulence restreignent le réalisme de nos simulations des écoulements fluides.

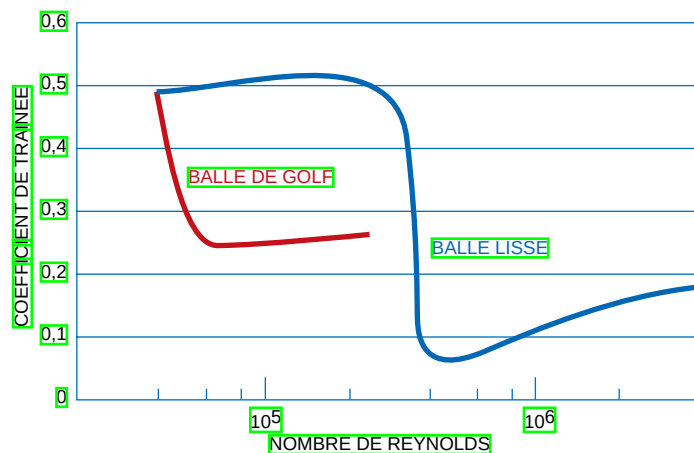
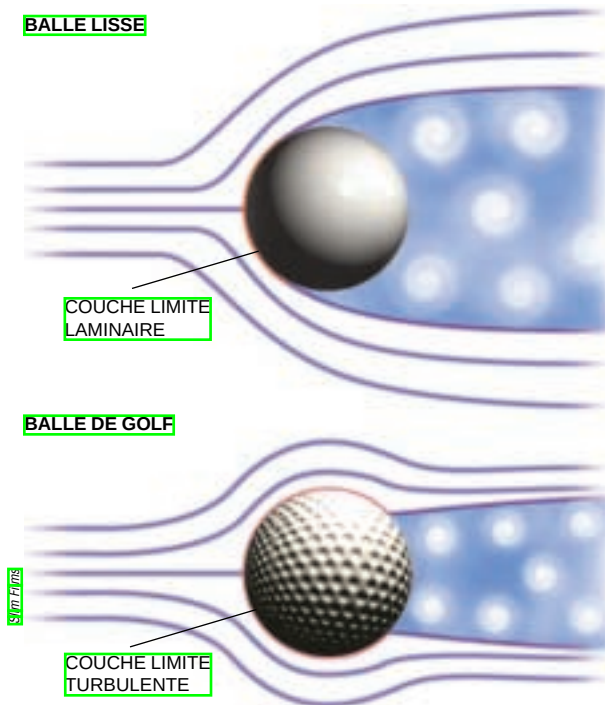
La manière la plus simple de prendre en compte la turbulence est l'utilisation du nombre de Reynolds, un paramètre qui résume les caractéristiques d'un écoulement. Ainsi nommé en l'honneur de l'ingénieur britannique Osborne Reynolds, ce

nombre mesure le rapport – l'importance relative – des forces inertielles de l'écoulement et des forces de viscosité (on calcule une force inertielle d'écoulement en multipliant la densité du fluide par le carré de sa vitesse et en divisant ce produit par une longueur caractéristique de l'écoulement, telle l'épaisseur de la couche limite d'air, si l'écoulement s'effectue au-dessus d'une aile).

Les forces inertielles favorisent la turbulence, alors que les forces de viscosité s'opposent à son apparition.



2. LA PRESSION DE L'AIR sur un Lockheed S-3A (en haut) en vol est maximale au voisinage du nez de l'avion et à l'intérieur des nacelles des moteurs, suspendues sous les ailes. Le filet qui enveloppe l'avion est le maillage utilisé lors de la simulation numérique ; l'ordinateur a calculé la valeur de la pression de l'air à chaque point d'intersection du maillage. Ce type de simulation est un élément décisif pour vérifier la conception des avions supersoniques (en bas) et hypersoniques, pour lesquels les essais en soufflerie sont impossibles. La simulation de ce prototype supersonique montre également le bang supersonique, correspondant ici au cercle à l'arrière de l'avion. Les ingénieurs aéronautiques se préoccupent aujourd'hui beaucoup de ces bangs supersoniques dont le public ne veut plus.



3. LA TRAÎNÉE D'UNE BALLE DE GOLF est principalement due à la pression de l'air. Cette traînée apparaît lorsque la pression devant la balle est bien supérieure à la pression derrière elle. On réduit la traînée en bosselant la surface de la balle ; les bosses et les creux accroissent la turbulence très près de la surface, ce qui entraîne un resserrement de la zone centrale du flux d'air, et donc une augmentation de la pression à l'arrière de la balle. Le diagramme ci-dessus montre que, pour des nombres de Reynolds accessibles lorsqu'on frappe la balle avec un club, la traînée est bien inférieure si la balle est bosselée.

Autrement dit, la turbulence apparaît lorsque le nombre de Reynolds dépasse un certain seuil. Ce nombre est proportionnel à la taille de l'objet et à la vitesse de l'écoulement. Par exemple, le nombre de Reynolds pour de l'air glissant sur le fuselage d'un avion de ligne volant à sa vitesse de croisière est de l'ordre de 100 millions. Pour de l'air s'écoulant autour d'une balle de golf, il est égal à 200 000 environ. Pour le sang circulant dans une artère de dimension moyenne, il est égal à près de 1 000.

Nous l'avons vu, l'une des caractéristiques de l'écoulement turbulent est qu'il se compose de tourbillons de tailles très diverses. Ces tourbillons se forment et se défont en permanence. Les grands tourbillons se dissocient en tourbillons plus petits, qui, à leur tour, se dissocient en tourbillons encore plus petits, et ainsi de suite. Lorsqu'ils deviennent suffisamment petits, ils disparaissent en dissipant leur énergie par chauffage du fluide.

La résolution des équations de Navier-Stokes dans le cas de l'écoulement de l'air à la surface d'un avion, par exemple, nécessite un maillage suffisamment serré pour révéler les plus petits tourbillons, mais assez grand pour englober l'avion entier et une partie de l'espace qui l'entoure. Dans un écoulement turbulent, l'amplitude des échelles de longueur – le rapport des dimensions des plus

grands tourbillons à celles des plus petits – est égale au nombre de Reynolds de l'écoulement élevé à la puissance $3/4$. Cette valeur permet d'évaluer le nombre de points du maillage nécessaires pour obtenir une simulation relativement précise : comme l'espace a trois dimensions, ce nombre est proportionnel au cube du rapport des échelles de longueur. Ainsi, le nombre de points nécessaires pour avoir une simulation numérique fiable est proportionnel au nombre de Reynolds élevé à la puissance $9/4$. En d'autres termes, un doublement du nombre de Reynolds multiplie presque par cinq le nombre de points du maillage.

Considérons un avion de transport de 50 mètres de long et dont le profil d'aile mesure environ cinq mètres. Si l'avion vole à 250 mètres par seconde, à une altitude de 10 000 mètres, le nombre de points du maillage nécessaires pour simuler la turbulence au voisinage de sa surface avec suffisamment de détails est égale à dix millions de milliards (10^{16}).

Quel type d'ordinateur peut-il effectuer de tels calculs ? Avec les algorithmes et les logiciels actuels, même un ordinateur capable d'effectuer 1 000 milliards (10^{12}) d'opérations en virgule flottante par seconde mettrait plusieurs dizaines de milliers d'années pour calculer l'écoulement de l'air durant une seconde de vol !

Heureusement, les aérodynamiciens n'ont pas besoin de simuler l'écoulement autour d'un avion entier pour recueillir des informations utilisables. De surcroît, une telle simulation fournirait tant de données qu'on ne saurait probablement pas les exploiter. En pratique, les physiciens des fluides s'intéressent uniquement aux effets de la turbulence sur les paramètres techniquement utiles, tels que l'écoulement moyen d'un fluide ou, dans le cas d'un avion, les forces de frottement, la portance et le transfert de chaleur. Pour un moteur, on s'intéresse, par exemple, aux effets de la turbulence sur les vitesses auxquelles s'effectue le mélange du carburant et du comburant.

De la simulation à la modélisation

Pour cette raison, on effectue souvent des moyennes sur les échelles de longueur associées aux fluctuations de la turbulence : au lieu de calculer le comportement de chacun des petits tourbillons, on détermine l'écoulement des gros tourbillons, puis on utilise des modèles pour évaluer les effets des petits tourbillons sur les plus gros. On simule ainsi un champ de vitesses moyen, qui correspond à un écoulement plus régulier que l'écoulement réel et qui impose l'emploi d'un maillage beaucoup plus grossier.

Les modèles employés pour la simplification sont de types variés, du simple accroissement des coefficients de viscosité à l'introduction de systèmes d'équations supplémentaires. Tous sont fondés sur des hypothèses et emploient des coefficients que l'on peut ajuster par comparaison avec des résultats expérimentaux. Aussi les modélisations d'écoulements turbulents ont la même fiabilité que les hypothèses et les modèles dont elles sont issues.

Toutefois, grâce aux perfectionnements des superordinateurs, les physiciens des fluides peuvent simuler des tourbillons de tailles plus variées et réduire ainsi le domaine où les échelles de longueur doivent être modélisées. Ils approchent la simulation numérique complète de la turbulence.

Depuis des années, les météorologues fondent leurs prévisions sur une stratégie de ce type, nommée simulation des grandes échelles. Les mouvements turbulents à grande échelle présentant un intérêt particulier pour la météorologie, les tourbillons relativement grands y sont simulés dans leur totalité, et seule la modification apportée par les tourbillons plus petits sur la turbulence à grande échelle est modélisée. Récemment, des ingénieurs ont commencé à utiliser ces techniques pour simuler des écoulements fluides complexes, tel celui de gaz à l'intérieur d'un moteur à combustion interne.

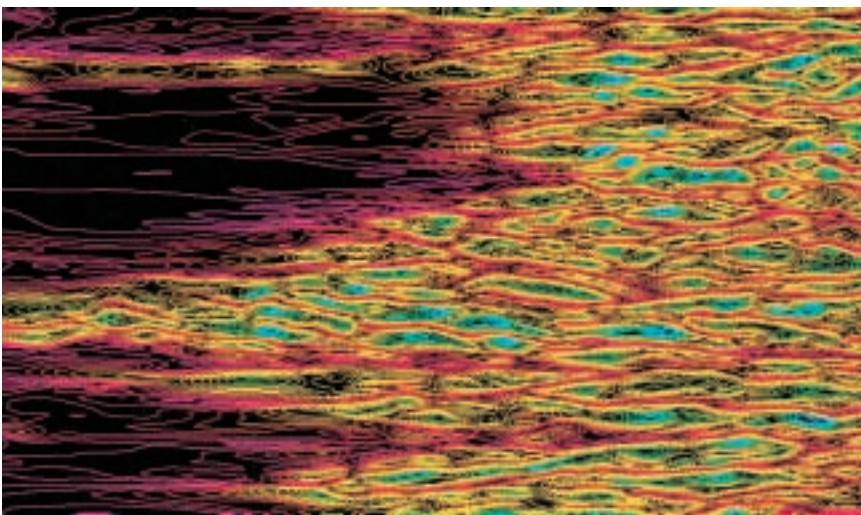
De même, les augmentations des puissances de calcul permettent le calcul complet d'écoulements relativement simples, tel l'écoulement dans un tuyau. Ces simulations – notamment aux faibles nombres de Reynolds – livrent de précieuses indications sur la nature de la turbulence. C'est ainsi qu'elles ont révélé la structure de base des tourbillons au voisinage d'une paroi et le rôle exact de ces tourbillons sur la traînée. Elles ont également affiné les modèles utilisés pour les simulations empiriques des écoulements complexes.

Ces derniers temps, tant d'ingénieurs et de scientifiques ont voulu utiliser ces données, que le Centre de recherche de la NASA a dû ouvrir à la consultation informatique son immense base de données. Si la majorité des chercheurs n'ont pas les moyens de calculs nécessaires pour effectuer des simulations directes de la turbulence, ils disposent de moyens suffisants pour explorer ces données archivées.

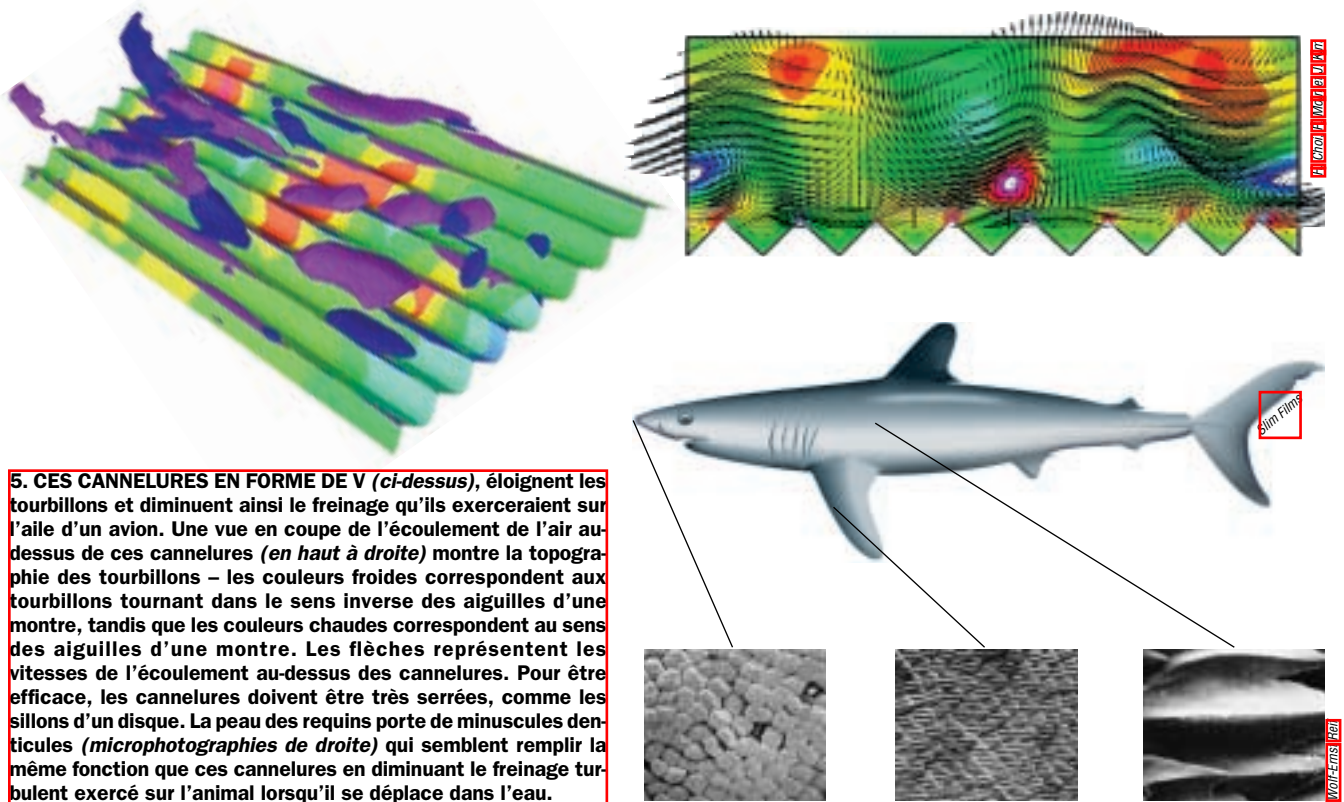
De la prévision à la commande

Grâce aux superordinateurs, les physiciens passent progressivement du stade de la prédiction des effets de la turbulence à celui de leur commande. Cette commande peut avoir des conséquences économiques considérables : si l'on réduisait de un pour cent la traînée des avions de ligne, on accroî-

trait de 40 pour cent le bénéfice des compagnies aériennes. Les premiers résultats sont déjà là : en plaçant des cannelures longitudinales en forme de V, à la surface des ailes ou du fuselage d'un avion, on réduit de cinq à six pour cent la traînée. Notons que la traînée diminue ainsi malgré l'accroissement de la surface exposée à l'écoulement de l'air. Aux vitesses de croisière standard des avions de transport, l'espace



4. CE DETAIL DE LA SIMULATION de l'écoulement de l'air sur une aile d'avion (en bas) montre la transition entre un écoulement lisse, laminaire (zones sombres à gauche) et la turbulence (zones ondulantes à droite). On pourrait réduire la traînée en plaçant sur l'aile des microvolets (microphotographie supérieure) qui, se soulevant en fonction des variations de pression, agiraient sur les petits tourbillons qui se forment au voisinage de l'aile.



5. CES CANNELURES EN FORME DE V (ci-dessus), éloignent les tourbillons et diminuent ainsi le freinage qu'ils exerceraient sur l'aile d'un avion. Une vue en coupe de l'écoulement de l'air au-dessus de ces cannelures (en haut à droite) montre la topographie des tourbillons – les couleurs froides correspondent aux tourbillons tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, tandis que les couleurs chaudes correspondent au sens des aiguilles d'une montre. Les flèches représentent les vitesses de l'écoulement au-dessus des cannelures. Pour être efficace, les cannelures doivent être très serrées, comme les sillons d'un disque. La peau des requins porte de minuscules denticules (microphotographies de droite) qui semblent remplir la même fonction que ces cannelures en diminuant le freinage turbulent exercé sur l'animal lorsqu'il se déplace dans l'eau.

séparant ces cannelures doit être très petit, de l'ordre de 40 micromètres, comme les sillons d'un disque; des cannelures plus espacées augmenteraient la traînée.

Des biologistes soviétiques avaient étudié des structures analogues à la surface de la peau des requins, qui réduisent la turbulence. La nature avait-elle ainsi découvert les cannelures anti-traînée? La simulation directe de l'écoulement turbulent le long de ces rainures confirma que les structures naturelles inhibent l'action des tourbillons en les empêchant de s'approcher trop de la surface (elles les maintiennent à une distance d'environ 50 micromètres).

La simulation numérique directe a également été utilisée pour la commande active (et non passive, comme avec les cannelures) de la turbulence: on envisage notamment de déformer la surface des ailes d'avion en réaction aux fluctuations de la turbulence du fluide. En pratique, la surface de l'aile serait constituée de composants comprenant des millions de capteurs et de microvolets qui réagiraient aux fluctuations de pression et de vitesse de l'air de manière à agir sur les petits tourbillons responsables du freinage turbulent (voir la figure 4).

Il y a trois ans seulement, cette technique semblait irréaliste; grâce à l'avènement des techniques microélectro-

mécaniques, elle est aujourd'hui sur le point d'aboutir: par ces techniques, on fabrique aujourd'hui des circuits intégrés contenant les capteurs, l'électronique de commande et les microvolets. La commande active de la turbulence au voisinage de la surface d'une aile a été observée chez les dauphins, dont la remarquable propulsion est probablement due à des mouvements de la peau.

Revenons aux balles de golf, qui montrent bien comment la texture d'une surface permet de contrôler avantageusement l'écoulement de l'air (voir la figure 3). Le freinage le plus important auquel est soumise une balle de golf est dû à la pression de l'air; il survient lorsque la pression devant la balle est notablement supérieure à la pression derrière elle. Grâce à la turbulence engendrée par ses bosselures, une balle de golf peut être projetée environ deux fois et demie plus loin qu'une balle de taille identique, mais de surface parfaitement lisse.

La mécanique des fluides numérique s'impose aujourd'hui pour l'étude de la turbulence, parce qu'elle donne enfin les résultats escomptés. Ces prochaines années, lorsque la vitesse des superordinateurs dépassera mille milliards d'opérations en virgule flottante par seconde, les mécaniciens des fluides aborderont des écoulements turbulents plus complexes, avec des nombres de

Reynolds supérieurs. Peut-être alors parviendront-ils à simuler l'écoulement de l'air à travers les passages cruciaux d'un réacteur d'avion et à obtenir une visualisation réaliste de l'ensemble piston-cylindre d'un moteur à combustion interne, de l'admission et de la combustion du mélange combustible, ainsi que de l'échappement des gaz à travers les soupapes. Ce type de simulations permettra enfin de commencer à éclairer les équations découvertes par Navier et Stokes il y a plus d'un siècle.

Parviz MOIN dirige le Centre de recherche sur la turbulence de l'Université Stanford. John KIM enseigne l'ingénierie à l'Université de Los Angeles.

P. SAGAUT, T.H. LÉ et P. MOSCHETTI, *Large Eddy Simulation and Direct Numerical Simulation*, in *New Tools in Turbulence Modelling*, École des Houches, mai 1996.

D.J. TRITTON, *Physical Fluid Dynamics*, Oxford Science Publications, 1988.

Tom MULLIN, *Turbulent Times for Fluids*, in *Exploring Chaos: A Guide to the New Science of Disorder*, sous la direction de Nina Hall, W.W. Norton, 1993.

Parviz MOIN et Thomas BEWLEY, *Feedback Control of Turbulence*, in *Applied Mechanics Reviews*, vol. 47, n° 6, deuxième partie, pp. S3-S13, juin 1994.

Les rayons cosmiques

J. CRONIN • T. GAISSER • S. SWORDY

Ces noyaux atomiques provenant de l'espace ont une énergie supérieure à celle que pourraient communiquer les plus gros accélérateurs de particules. Les astrophysiciens recherchent leur origine.

Une fois par seconde, un noyau atomique pénètre dans l'atmosphère terrestre avec autant d'énergie qu'une pierre lancée vigoureusement. Appliquée à un proton, cette même énergie est 100 millions de fois supérieure à celle qu'imprimeraient les accélérateurs terrestres les plus puissants. Quels mécanismes accélèrent-ils des noyaux atomiques et où se produisent-ils ?

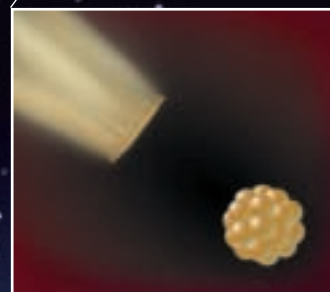
Cette question préoccupe les physiciens depuis la découverte des rayons cosmiques, en 1912. À l'époque, on ignorait la nature particulière des rayons cosmiques, d'où leur nom impropre, qui a subsisté. Le milieu interstellaire contient des noyaux atomiques de tous les éléments, qui se déplacent dans des champs électriques et magnétiques. Sans la protection de l'atmosphère terrestre, beaucoup plus de rayons cosmiques arriveraient jusqu'au sol. Les populations des régions montagneuses ou les personnes qui prennent fréquemment l'avion ont au-dessus d'elles une épaisseur d'atmosphère moindre et reçoivent plus de radiations que les autres.

La caractéristique la plus remarquable des rayons cosmiques est l'absence apparente de limite à l'énergie maximale de ces particules. La plupart des sources connues de particules électriquement chargées, tel le Soleil, émetteur de protons dans le vent solaire, ne produisent aucune particule d'énergie supérieure à une limite spécifique.

Certes, le nombre de rayons cosmiques observés décroît avec l'énergie, mais on en détecte jusqu'aux énergies les plus élevées mesurables. Aux énergies supérieures à 300 milliards de fois la masse au repos du proton (la masse est équivalente à l'énergie, selon la relation d'Einstein), les rayons cosmiques sont si rares qu'il n'existe pas encore de détecteur assez gros pour mesurer leur flux extrêmement faible.

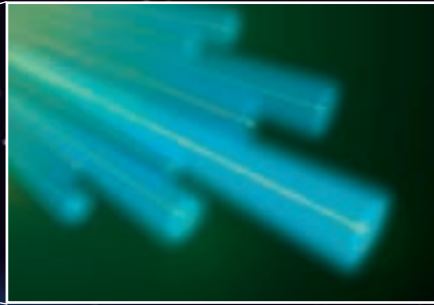
Toutefois, des rayons cosmiques de très haute énergie sont observés indirectement, à raison de un toutes les quelques années : lorsque ces rayons cosmiques percutent l'atmosphère, ils créent des myriades de particules secondaires, qui sont plus faciles à détecter. Le 15 octobre 1991, par exemple, un observatoire de rayons cosmiques installé dans le désert de l'Utah a enregistré une gerbe de particules secondaires créée par un rayon cosmique d'énergie égale à 50 joules (3×10^{20} électronvolts). Le flux de rayons cosmiques diminue régulièrement jusqu'à environ 10^{16} électronvolts, puis la diminution s'accroît aux énergies supérieures, ce qui indique que les rayons cosmiques d'énergie supérieure sont d'origine différente.

En 1960, à l'Institut Tata de Bombay, Bernard Peters proposa que les rayons cosmiques de faible énergie naissent principalement au sein de notre Galaxie, tandis que ceux d'énergie supérieure sont émis par des sources extragalactiques. En effet, les protons



Les rayons cosmiques, qui sont des noyaux atomiques se déplaçant presque à la vitesse de la lumière, vivent dans un univers étrange : leur temps s'écoule plus lentement que le nôtre en raison d'un phénomène bien décrit par la théorie de la relativité restreinte. Quand ils atteignent la Terre, ces noyaux percutent les noyaux atomiques du gaz atmosphérique à très haute altitude. Une partie importante de l'énergie incidente est transformée en particules subatomiques, tels des muons, qui, à leur tour, heurtent violemment d'autres atomes de l'atmosphère, ce qui crée une «gerbe atmosphérique». Des rayons gamma sont également émis.

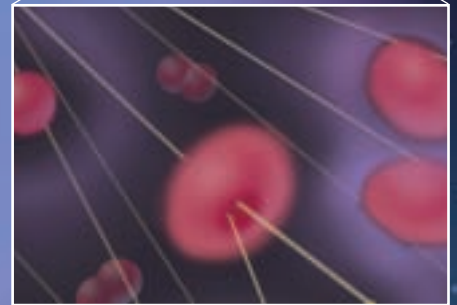
La vie d'un rayon cosmique



Les premières particules créées après la collision se propagent à des vitesses supérieures à la vitesse de la lumière dans l'atmosphère (inférieure à la vitesse de la lumière dans le vide) et, de ce fait, émettent des rayons gamma Cerenkov (cet effet est l'analogie optique du bang créé par les avions qui franchissent le mur du son).



Lorsque les particules créées lors de la collision initiale frappent des noyaux atmosphériques, elles engendrent d'autres particules ainsi que du rayonnement électromagnétique de haute énergie. En raison de la conservation de la quantité de mouvement, la majeure partie de la matière produite se propage dans la même direction que le rayon cosmique incident ; en revanche, les rayonnements électromagnétiques sont émis dans toutes les directions.



Les muons et les autres particules qui demeurent à la fin de la gerbe atmosphérique perdent enfin assez d'énergie pour que leur interaction avec l'atmosphère produise principalement du rayonnement ultraviolet, dû à l'excitation de l'azote atmosphérique. Ce rayonnement peut être détecté par des photomultiplicateurs sensibles. Au cours d'un événement particulièrement violent, certaines particules de la gerbe atteignent le sol, où elles peuvent aussi être détectées.

d'énergie supérieure à 10^{19} électrons-volts sont très peu déviés par les champs magnétiques de notre Galaxie. Si ces particules provenaient de notre Galaxie, leur répartition varierait selon la direction, car la Galaxie ne s'étend pas symétriquement autour de nous. Or, la répartition est isotrope.

Naissance dans les supernovae

Ce raisonnement montre à quel point les rayons cosmiques restent mystérieux. Les astrophysiciens ont émis des hypothèses sur les mécanismes de leur production, mais aucune n'est complètement satisfaisante. La difficulté tient en partie à la médiocre connaissance des conditions (très différentes de celles que l'on connaît sur la Terre) qui règnent dans les régions où naissent ces particules. Notamment, l'espace interstellaire ne contient qu'un atome par centimètre cube, une densité bien inférieure à celle du meilleur vide que l'on sache créer. En outre, dans ces régions, les champs électriques et magnétiques interagissent avec une population diffuse de particules char-

gées, encore moins nombreuses que les atomes neutres.

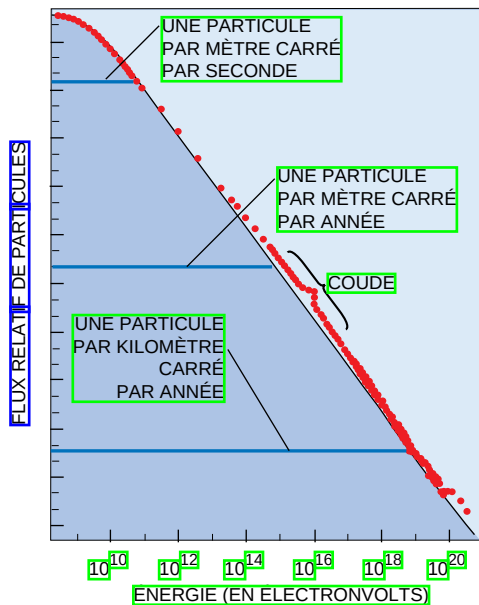
Ce milieu est moins calme qu'il n'y paraît : la matière est si rare que les forces électriques et magnétiques agissent sur de grandes distances sans être notablement amorties. Dans notre Galaxie, l'espace contient ainsi un plasma énergétique et turbulent, composé d'atomes partiellement ionisés. Les mouvements sont difficiles à détecter à l'échelle de temps humaine en raison des grandes distances qui nous en séparent, mais ces mêmes distances permettent à des forces modérées de produire des résultats impressionnants : une particule n'est habituellement accélérée que pendant quelques secondes dans les accélérateurs de particules, mais elle pourrait demeurer des années ou même des millénaires au sein d'un « accélérateur cosmique ».

Les astronomes pensent depuis longtemps que la majorité des rayons cosmiques – ceux dont l'énergie est inférieure à environ 10^{16} électrons-volts – provient des supernovae, c'est-à-dire des explosions d'étoiles. En effet, la puissance totale des rayons cosmiques observés n'est que légèrement inférieure

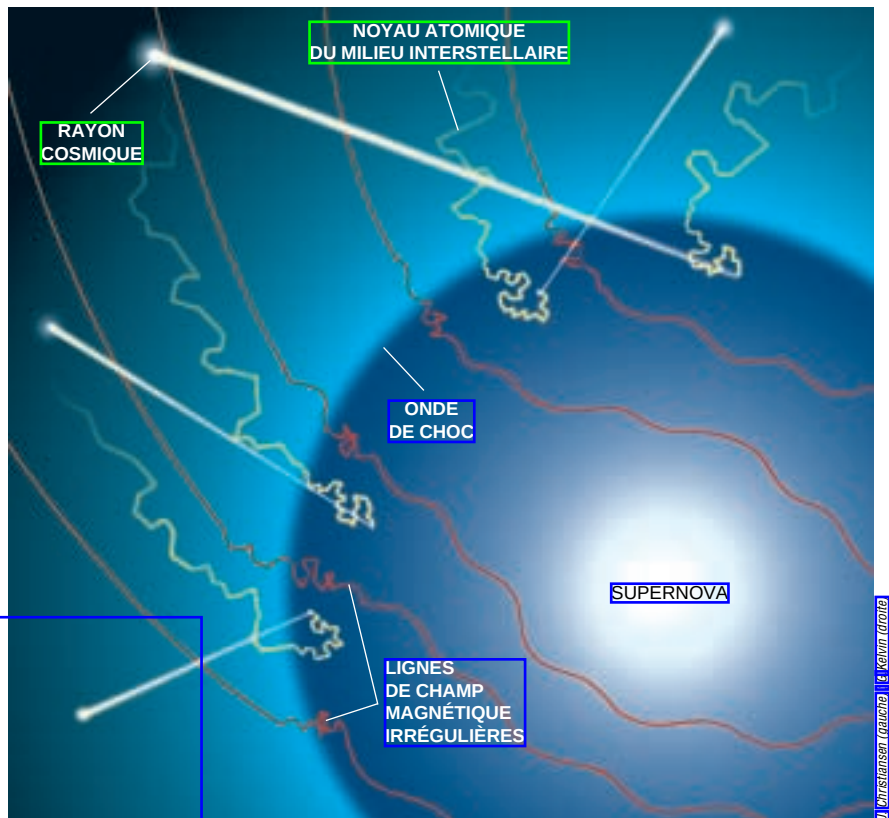
à celle libérée dans le milieu galactique par les supernovae, au nombre de trois par siècle en moyenne. Peu de sources ont cette puissance dans notre Galaxie.

Lors de l'effondrement d'une étoile massive, les couches externes de l'étoile sont éjectées à plus de 10 000 kilomètres par seconde. De même, une quantité considérable d'énergie est libérée lorsqu'une naine blanche se désintègre, lors d'une explosion thermonucléaire. Dans ces deux types de supernovae, la matière est éjectée à des vitesses supersoniques, ce qui crée une puissante onde de choc dans le milieu interstellaire. Cette onde de choc accélère les noyaux de la matière qu'ils traversent, les transformant en rayons cosmiques. Les rayons cosmiques étant électriquement chargés, ils ont des trajectoires tortueuses à travers les champs magnétiques interstellaires, de sorte que leur direction d'arrivée sur la Terre ne fournit aucune indication de leur origine.

En étudiant le rayonnement synchrotron parfois associé aux restes de supernovae, les astrophysiciens ont découvert des indications plus directes du rôle accélérateur des supernovae. Le rayonnement synchrotron est caracté-



1. LES SUPERNOVAE semblent être les accélérateurs de particules qui engendrent les rayons cosmiques. Lors de la traversée de l'onde de choc en expansion créée par l'éjection de matière des supernovae, les particules cosmiques gagnent un peu d'énergie. Les champs magnétiques environnants sont si irréguliers que les particules peuvent traverser l'onde de choc des centaines, voire des milliers de fois, jusqu'à ce qu'elle s'échappe sous la forme de rayons cosmiques. La plupart des noyaux seraient peu accélérés. Cette description est corroborée par la forme générale du spectre d'énergie des rayons cosmiques (à gauche), qui décroît lorsque l'énergie aug-



mente. Le « coude » dans la courbe indiquerait que la plupart des noyaux sont accélérés par un mécanisme incapable de fournir plus de 10^{15} électrons-volts environ. Les noyaux ayant des énergies supérieures seraient produits par une source dont on ignore encore la nature.



2. CE RESEAU DE DETECTEURS DE GERBES ATMOSPHERIQUES épie les sous-produits des rayons cosmiques qui pénètrent la haute atmosphère. Les photodétecteurs (à droite) enregistrent les éclairs lumineux provoqués par les rayons cosmiques qui heurtent les atomes

d'azote de l'atmosphère. A partir de ces données, on détermine l'énergie et l'identité probable des rayons cosmiques incidents. Le réseau Fly's Eye se trouve dans le désert de l'Utah ; une nouvelle version de ce réseau couvrira 1 000 kilomètres carrés.

ristique d'électrons de haute énergie se propageant dans un champ magnétique intense, tel celui qui semble agir dans les accélérateurs de rayons cosmiques. Récemment, le satellite japonais ASCA d'observations en rayons X a photographié le reste de la supernova 1006, qui explosa voici 991 ans : contrairement au rayonnement provenant de l'intérieur du reste de la supernova, le rayonnement X de la sphère en expansion possède les caractéristiques d'un rayonnement synchrotron associé à des électrons accélérés jusqu'à 10^{14} électronvolts.

Avec le détecteur EGRET, embarqué à bord de l'Observatoire Compton, les astrophysiciens ont également étudié les sources ponctuelles de rayons gamma associées aux restes de supernovae. L'analyse des intensités et des spectres enregistrés (jusqu'à des énergies de un milliard d'électronvolts) montre que ces rayons gamma pourraient résulter de la désintégration de pions neutres, des particules qui seraient produites par la collision de rayons cosmiques émanant des restes de l'étoile détruite avec le gaz interstellaire avoisinant. Toutefois l'Observatoire de rayons gamma Whipple, au sol, n'a pas détecté de rayons gamma avec l'intensité attendue si les supernovae accéléraient des particules à 10^{14} électronvolts ou plus.

Pour savoir si les supernovae sont les sources des rayons cosmiques, on analyse également la nature des noyaux

d'atomes qui composent le rayonnement cosmique. La taille de l'orbite d'une particule chargée dans un champ magnétique étant proportionnelle à la quantité de mouvement totale par unité de charge, les noyaux plus lourds ont plus d'énergie que les noyaux légers, à dimensions d'orbite égales. Tout phénomène qui accélère les noyaux jusqu'à une dimension d'orbite donnée (telle la traversée d'une région accélératrice d'étendue limitée) conduira donc à un excès de noyaux plus lourds aux hautes énergies.

Accélération sélective

Pourrait-on aller plus loin et retrouver, dans la nature des noyaux accélérés, le type des supernovae accélératrices ? Par exemple, l'explosion d'une naine blanche accélérerait n'importe quel noyau peuplant le milieu interstellaire local, tandis qu'une supernova résultant de l'effondrement d'une étoile massive accélérerait surtout le vent stellaire, émis par les couches externes de l'étoile progénitrice avant son explosion. Dans ce dernier cas, les rayons cosmiques contiendraient plus de noyaux d'hélium, de carbone et plus de noyaux lourds.

Malheureusement, l'identité des rayons cosmiques de haute énergie est perdue lors de leur interaction avec les atomes de l'atmosphère terrestre : la collision les transforme en une gerbe de particules secondaires. Pour être cer-

tain de la composition nucléaire des rayons cosmiques, on doit détecter les rayons cosmiques avant qu'ils n'interagissent avec l'atmosphère dense. La collecte de 100 rayons cosmiques d'énergie proche de 10^{14} électronvolts requiert un détecteur de 10 mètres carrés en orbite trois ans durant ; or, aujourd'hui, les expositions habituelles ne sont que de un mètre carré pendant trois jours.

Les astrophysiciens contournent cette difficulté de plusieurs façons. Par exemple, la NASA a mis au point des ballons stratosphériques qui embarquent des charges utiles lourdes (environ trois tonnes) pendant plusieurs jours (ces expériences sont beaucoup moins onéreuses que l'envoi de détecteurs dans des satellites). Les vols les plus fructueux ont eu lieu en Antarctique, où les vents de haute altitude soufflent en cercle autour du pôle Sud.

Une charge utile lancée du détroit de McMurdo, sur la côte antarctique, parcourt un cercle de rayon presque constant autour du pôle et revient près de son point de départ. En 1996, certains ballons ont tourné autour du pôle pendant dix jours. L'un d'entre nous (S. Swordy) collabore avec Dietrich Müller et Peter Meyer, de l'Université de Chicago, pour construire un détecteur de dix mètres carrés qui mesurera des rayons cosmiques lourds d'énergie atteignant 10^{15} électronvolts, lors d'un tel vol. Simultanément, des collègues cherchent à porter les temps

d'exposition à une centaine de jours, au cours de vols semblables, mais plus près de l'équateur.

De grandes gerbes de particules

L'étude des rayons cosmiques d'énergie encore supérieure – ceux produits par des sources inconnues – requiert de grands détecteurs au sol, qui surmontent le problème des faibles flux en surveillant des surfaces collectrices considérables pendant des mois, voire des années. Cependant, l'information doit être extraite des gerbes de particules secondaires – des électrons, des muons et des rayons gamma – engendrées à haute altitude, dans l'atmosphère, par la collision des noyaux incidents et des atomes de l'atmosphère. Ces méthodes indirectes ne donnent que des indications statistiques sur la composition des rayons cosmiques ; elles n'identifient pas directement les noyaux incidents.

Au sol, les millions de particules secondaires créées par chaque rayon cosmique se dispersent sur plusieurs centaines de mètres de diamètre. Comme aucun détecteur n'a une telle surface, on place quelques centaines de détecteurs espacés de plusieurs mètres.

Les détecteurs récemment mis au point, qui collectent des données de plus en plus précises, permettent de mieux interpréter les gerbes. Par exemple, l'expérience *CASA-MIA-DICE*, à laquelle deux d'entre nous participent (J. Cronin et S. Swordy), dans l'Utah, mesure les répartitions d'électrons et de muons au sol. Elle détecte aussi la lumière Cerenkov (due aux particules dont les vitesses sont supérieures à la vitesse de la lumière dans l'atmosphère) engendrée par les particules de la gerbe à diverses altitudes, dans l'atmosphère. Ces données nous permettent de reconstruire la forme de la gerbe avec plus de certitude et, donc, de mieux préciser l'énergie et l'identité du rayon cosmique qui a formé cette gerbe.

T. Gaisser, de son côté, utilise un réseau de détecteurs pour mesurer les gerbes qui atteignent le sol, au pôle Sud. Il compare ses données avec celles de l'expérience *AMANDA*, qui détecte les muons de haute énergie produits dans les mêmes gerbes, par observation du rayonnement Cerenkov engendré en profondeur dans la calotte polaire. L'expérience *AMANDA*



3. CE BALLON STRATOSPHERIQUE, lancé près de la base McMurdo, dans l'Antarctique, emporte un détecteur qui détectera directement les rayons cosmiques avant qu'ils ne créent des particules par collisions avec les atomes de l'atmosphère. À 40 kilomètres au-dessus de la calotte

cherche surtout à repérer les traces des neutrinos cosmiques qui engendrent des gerbes ascendantes après avoir traversé la Terre.

Simultanément, les physiciens perfectionnent des modélisations numériques des gerbes atmosphériques. Ces simulations révèlent les possibilités et les limitations des mesures effectuées au sol. La détection directe de rayons cosmiques d'énergie supérieure devrait compléter ces mesures.

Hautes énergies

Les rayons cosmiques d'énergie supérieure à 10^{20} électronvolts sont très rares : chaque kilomètre carré d'atmosphère terrestre n'en reçoit qu'un par siècle. Aussi leur étude nécessite-t-elle un détecteur de gerbes atmosphériques de dimension gigantesque. Outre l'événement observé en 1991 dans l'Utah, des particules d'énergie supérieure à 10^{20} électronvolts ont été observées par d'autres groupes aux États-Unis, à Akeno (au Japon), à Haverah Park (au Royaume-Uni) et à Yakoutsk (en Sibérie).

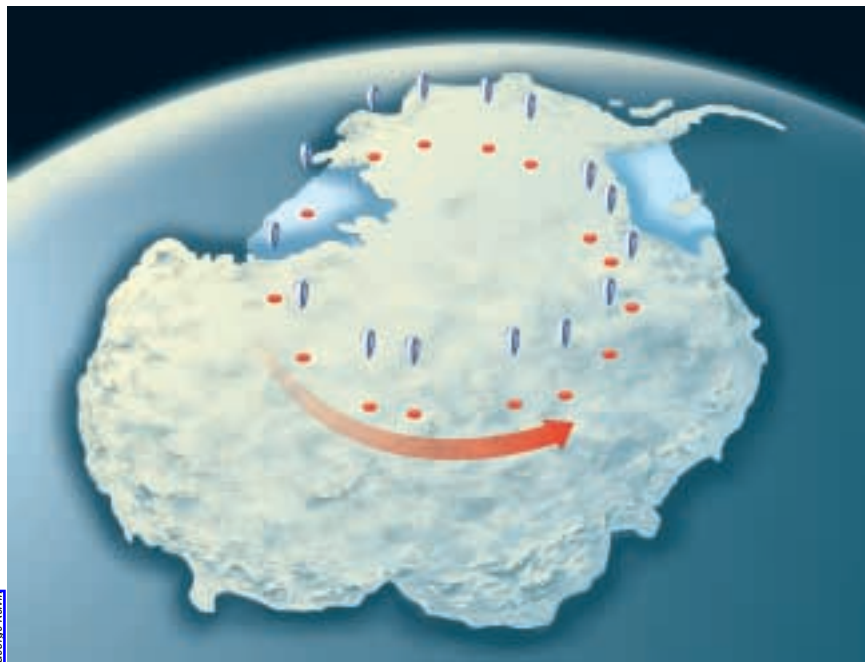
L'existence même de particules si énergétiques est paradoxale : d'une part, elles naissent très probablement en dehors de notre Galaxie, car aucun mécanisme d'accélération connu ne pourrait les produire dans la Voie lactée et parce qu'elles arrivent de

manière équivalente de toutes les directions ; d'autre part, leur source ne peut être éloignée de plus de 30 millions d'années-lumière (le diamètre du disque de notre Galaxie est de 100 000 années-lumière environ), sans quoi les particules auraient perdu leur énergie par interaction avec le fond diffus cosmologique, rayonnement fossile du Big Bang.

Si les sources de ces particules de très haute énergie étaient uniformément réparties dans l'Univers, l'interaction avec le rayonnement fossile ferait chuter le nombre de particules d'énergie supérieure à 5×10^{19} électronvolts, mais tel n'est pas le cas. Nous avons aujourd'hui observé trop peu de tels rayons cosmiques énergétiques pour savoir avec certitude d'où ils viennent, mais la poursuite de leur observation devrait être éclairante : comme ces rayons ne sont presque pas déviés par les faibles champs magnétiques galactiques, la mesure de leur direction de propagation pourrait révéler leur origine.

Quelles pourraient être les sources des rayons cosmiques les plus énergétiques ? Trois possibilités sont avancées : les disques d'accrétion autour de trous noirs galactiques, les zones de sursauts gamma, et les défauts topologiques de l'espace-temps.

Les astrophysiciens pensent que des trous noirs de un milliard de masses



polaire, les vents qui soufflent en cercle autour du pôle ont ramené le ballon près de son point de départ après une dizaine de jours. Les détecteurs embarqués sur des ballons sont moins sensibles que ceux dont on équipe les satellites, mais ils sont plus grands et moins onéreux.

solaires ou plus, qui attirent la matière dans les noyaux actifs de galaxies, émettent des jets dans l'espace intergalactique, à des vitesses approchant celle de la lumière ; de tels jets ont été observés à l'aide de radiotélescopes. Peter Biermann et ses collègues de l'Institut de radioastronomie de Bonn supposent que les points chauds observés dans les lobes radios sont des ondes de choc qui accélèrent des rayons cosmiques ; or des rayons cosmiques de très haute énergie semblent provenir des radiogalaxies.

D'autre part, les sursauts gamma demeurent des phénomènes mystérieux qui seraient créés par des explosions résultant de la collision et de la fusion d'étoiles à neutrons. Mario Vietri, de l'Observatoire astronomique de Rome, et Eli Waxman, de l'Université Princeton, ont remarqué un accord approximatif entre l'énergie libérée par de tels événements et celle qui serait nécessaire pour alimenter le flux observé des rayons cosmiques de haute énergie. Ils supposent que les chocs très violents dus à ces explosions agissent comme des accélérateurs cosmiques.

Enfin quelques astrophysiciens envisagent que les rayons cosmiques très énergétiques proviennent de la désintégration de monopôles, de cordes cosmiques, de murs cosmiques ou d'autres défauts topologiques qui seraient apparus au début de l'Uni-

vers. Ces objets sont de formidables réservoirs d'énergie, des vestiges de l'Univers primordial, lorsque la force de gravité, la force électromagnétique et les forces nucléaires faible et forte étaient encore unifiées.

Lors d'un effondrement de ces réservoirs et d'une «brisure de symétrie» (c'est-à-dire une différenciation des divers types de forces à partir de la force unifiée), l'énergie emmagasinée s'échapperait sous la forme de particules très massives, qui se désintégreraient immédiatement en jets de particules dont l'énergie serait 100 000 fois supérieure à celle des rayons cosmiques les plus énergétiques connus. Dans cette hypothèse, les rayons cosmiques de très haute énergie que nous observons seraient les produits léthargiques de cascades cosmologiques de particules.

On cherche aujourd'hui à observer assez de ces rayons cosmiques pour identifier les objets extragalactiques dont ils proviennent. Le réseau AGASA, au Japon, surveille ainsi 200 kilomètres carrés à la surface du Globe, et la nouvelle expérience à haute résolution *Fly's Eye*, dans l'Utah, couvrira environ 1 000 kilomètres carrés. Chaque détecteur, cependant, ne détectera que quelques noyaux énergétiques par an.

Ces dernières années, J. Cronin et Alan Watson, de l'Université de Leeds,

ont proposé un projet international afin d'accumuler les données. Dans ce projet de l'«Observatoire Auger» (du nom de Pierre Auger, le physicien français qui, le premier, étudia les gerbes de particules issues de rayons cosmiques), deux réseaux de détecteurs (un par hémisphère) couvriraient une surface équivalant à 9 000 kilomètres carrés et enregistreraient alors des centaines d'événements de très haute énergie par an. Chaque réseau se composerait de 1 600 stations réparties tous les 1,5 kilomètre ; une seule gerbe pourrait être détectée par plusieurs dizaines de stations.

Au cours d'un colloque qui s'est tenu au Laboratoire Fermi, en 1995, les astrophysiciens ont envisagé la réalisation d'un tel observatoire à l'aide de systèmes déjà commercialisés : panneaux solaires, téléphones cellulaires, récepteurs GPS... Chaque réseau, aussi grand qu'un département français, pourrait être construit pour environ 200 millions de francs.

Alors que les astrophysiciens envisagent la construction et la gestion de réseaux de détecteurs aussi gigantesques, la question fondamentale demeure : existe-t-il des rayons cosmiques à des énergies encore supérieures, ou avons-nous commencé à détecter les particules les plus énergétiques que l'Univers puisse engendrer ?

James CRONIN, professeur de physique à l'Université de Chicago, a reçu le prix Nobel de physique en 1980 pour son travail sur les violations de symétrie lors de la désintégration des mésons. Thomas GAISSER est professeur de physique à l'Université du Delaware. Simon SWORDY est professeur à l'Université de Chicago.

Jean-Noël CAPDEVIELLE, *Les rayons cosmiques*, collection Que sais-je ?, éditions des Presses universitaires de France, 1984.

Pierre SOKOLSKY, *Introduction to Ultra-high Energy Cosmic Ray Physics*, Addison-Wesley, 1988.

Thomas K. GAISSER, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press, 1992.

Simon SWORDY, *Cosmic Ray Observations below 10^{14} eV*, in *Proceedings of the XXIII International Cosmic Ray Conference*, sous la direction de D.A. Leahy, R.B. Hicks et D. Venkatesan, World Scientific, 1994.

La maladie de Parkinson

MOUSSA YOUDIM • PETER RIEDERER

Les radicaux libres, des molécules extrêmement réactives, participeraient à la dégénérescence des neurones responsable de cette maladie fréquente.

L'ouverture des Jeux olympiques de 1996, à Atlanta, fut émouvante : Muhammad Ali, ancien champion du monde de boxe, catégorie poids lourds, et médaille d'or aux Jeux olympiques de 1960, prit la torche qu'on lui tendait et alluma d'une main tremblante la flamme olympique. Sa difficulté à exécuter ce geste rappela au monde les ravages que la maladie de Parkinson produit dans le système nerveux humain. M. Ali qui, avant sa maladie, s'enorgueillissait de «voleter comme un papillon et de piquer comme une abeille», luttait pour commander son corps et ne pas tomber.

Bien que l'on ne dispose pas encore de remède efficace contre cette maladie, les progrès réalisés dans la connaissance des mécanismes ont été considérables. Des substances visant à soulager les symptômes, mais aussi à limiter l'évolution de la maladie sont en cours d'élaboration.

La maladie de Parkinson détruit progressivement une zone cérébrale qui assure la coordination des mouvements. Elle a été décrite par James Parkinson, un médecin britannique qui en rassembla les symptômes dans son *Essai sur la paralysie agitée*, publié en 1817. Au début de la maladie, les malades ont les mains ou les pieds qui tremblent, notamment lorsque les membres sont au repos (le pape Jean-Paul est sans doute atteint de la maladie de Parkinson, car il présente ce type de tremblements). Puis leurs mouvements sont de plus en plus lents, et leurs membres de plus en plus rigides. Ils changent difficilement de position, se lèvent avec peine à partir de la position assise, perdent l'équilibre, coordonnent mal leurs



1. MUHAMMAD ALI, atteint de la maladie de Parkinson, a allumé la flamme olympique au début des Jeux de 1996, à Atlanta. Les gestes mal assurés de cet athlète naguère invincible ont rappelés l'urgente nécessité de trouver des traitements plus efficaces de cette maladie.

mouvements, se figent parfois subitement.

D'autres symptômes apparaissent parfois : une transpiration excessive, des mouvements involontaires, des troubles psychologiques, des dépressions, voire une démence en fin de maladie. La plupart de ces troubles, moteurs ou non, sont d'abord légers, puis s'aggravent avec le temps et sont souvent invalidants au bout de 5 à 15 ans. Les premiers symptômes apparaissent, en général, après 60 ans.

Depuis longtemps, on sait que les troubles moteurs résultent de la destruction de certains neurones du tronc cérébral qui communiquent avec une région sous-corticale : les neurones qui dégénèrent contiennent un pigment brun, la neuromélanine. Ils sont localisés dans la substantia nigra, naguère nommée *locus niger* ou substance noire. Ces neurones ont des prolongements

qui atteignent une région nommée le striatum (en raison de son aspect «strié»).

En 1959, à l'Université de Gothenburg, Arvid Carlsson a montré que les neurones de la substantia nigra participent à la commande des mouvements en libérant dans le striatum un messenger chimique, la dopamine. Les neurones du striatum transmettent alors le message véhiculé par la dopamine jusqu'au cortex, en passant par les centres supérieurs de contrôle du mouvement ; enfin le cortex utilise ces informations pour commander les mouvements musculaires. Lorsque les neurones qui produisent de la dopamine, ou neurones dopaminergiques, meurent, la concentration en dopamine diminue, ce qui perturbe le fonctionnement de l'ensemble du réseau moteur et l'activité

motrice des personnes atteintes. Les symptômes non moteurs résultent de la destruction de neurones localisés dans d'autres régions du cerveau, mais on ignore l'origine de ces lésions.

Les neurologues ont surtout étudié la substantia nigra, responsable de la plupart des symptômes, et ils ont découvert que, tous les dix ans, les adultes perdent inexorablement quatre pour cent de leurs neurones dopaminergiques. Toutefois, la maladie de Parkinson n'est pas une composante normale du vieillissement : c'est un mécanisme pathologique qui accélère la mort neuronale et provoque des symptômes lorsque 70 pour cent des neurones sont détruits. On ignore encore si ce mécanisme est déclenché par un poison présent dans l'environnement ou par une anomalie génétique (une anomalie du chromosome 4 a récemment été mise en cause dans certains cas).

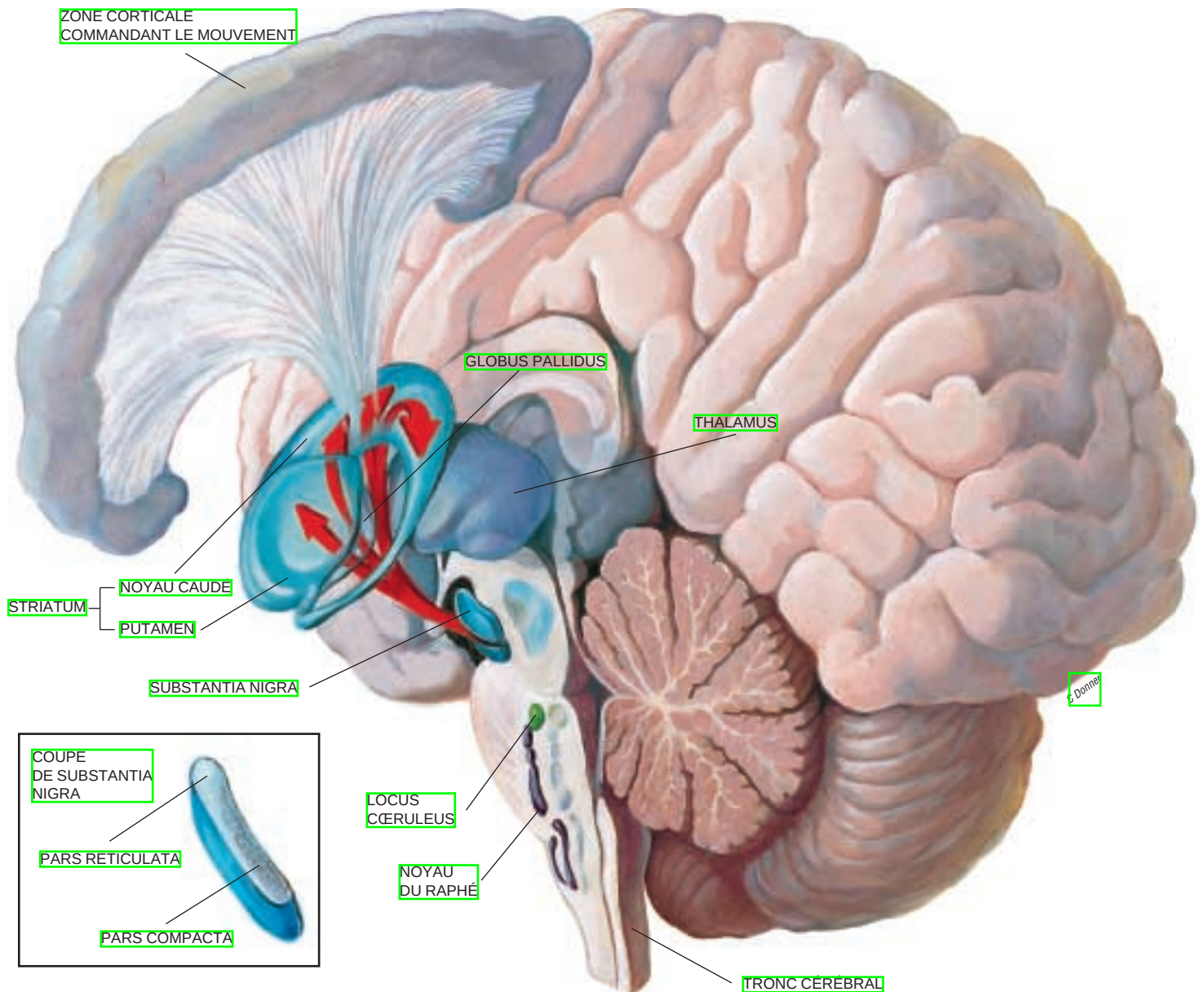
Pas de panacée

Les premiers médicaments contre la maladie de Parkinson ont été découverts par hasard. Au XIX^e siècle, des pharmaciens ont remarqué que des extraits de belladone soulageaient certains symptômes ; les médecins commencèrent à en prescrire. Puis les pharmacologues ont découvert que le médicament agit en inhibant, dans le striatum, l'activité de l'acétylcholine, une des molécules qui transmettent les messages entre les neurones. On en a

déduit que la dopamine, libérée dans le striatum, est nécessaire pour équilibrer les effets de l'acétylcholine ; en l'absence de dopamine, l'acétylcholine exciterait excessivement les neurones du striatum dont les prolongements commandent l'activité de neurones participant au contrôle de la motricité.

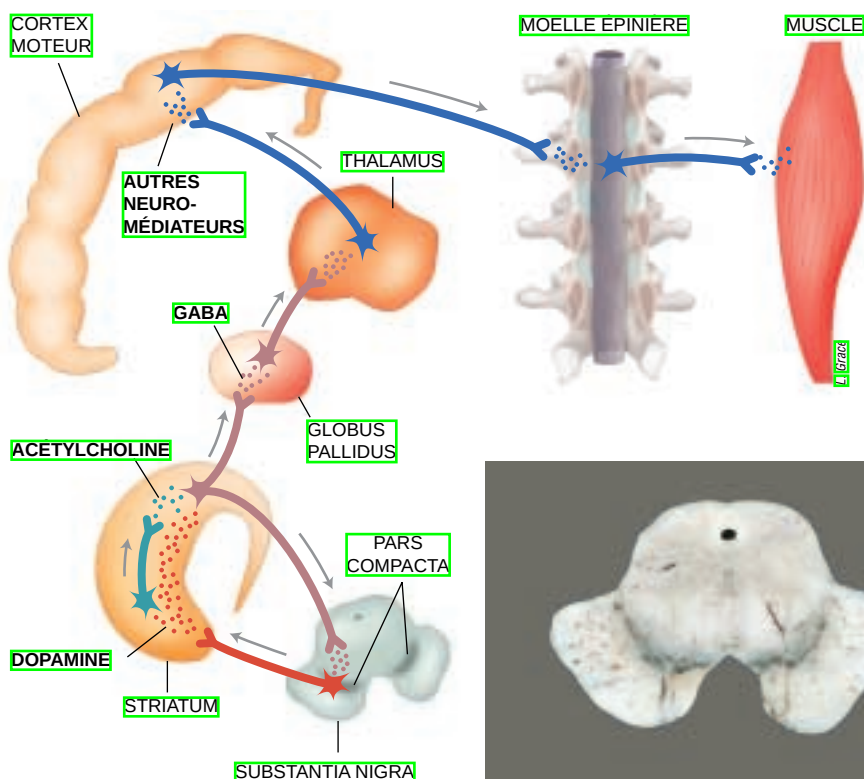
Les inhibiteurs de l'acétylcholine amélioraient l'état de certains malades, mais les symptômes persistaient et ces médicaments avaient des effets secondaires désagréables, notamment des troubles de la vision et de la

mémoire. Aussi les médecins accueillirent-ils avec intérêt la L-dopa, découverte dans les années 1960 : cette molécule, qui reste fréquemment utilisée, compense la baisse de la dopamine dans le cerveau des malades. Les pharmacologues savaient que les neurones dopaminergiques transforment la tyrosine (un acide aminé) en L-dopa, puis la L-dopa en dopamine. On ne peut administrer directement de dopamine, car elle ne traverse pas la barrière hémato-encéphalique, qui empêche cette molécule et beaucoup

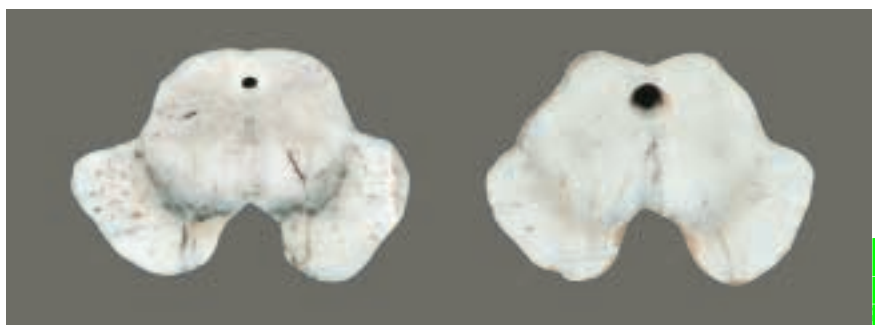


2. LES ZONES DU CERVEAU atteintes dans la maladie de Parkinson : la partie dite « pars compacta » de la substantia nigra (détaillée dans le cartouche) perd des neurones qui, normalement, émettent des signaux de commande des mouvements (flèches rouges) vers le striatum ; les molécules de dopamine synthétisées par le cerveau sont la manifestation matérielle de ces signaux. Les neurones du striatum activent alors des centres moteurs supérieurs (en gris). Quand les neu-

rones de la substantia nigra meurent, la concentration en dopamine devient insuffisante, le circuit est interrompu et le malade ne commande plus ses mouvements. Des neurones localisés en dehors de la substantia nigra continuent d'émettre de la dopamine, mais d'autres types de neurones disparaissent dans des régions comme les noyaux du raphé et le locus cœruléus : cette perte neuronale déclenche des symptômes dépressifs et d'autres symptômes, non moteurs, de la maladie.



3. LE CIRCUIT NEURONAL de la commande motrice est interrompu dans la maladie de Parkinson. Quand les neurones émetteurs de dopamine meurent, la concentration en dopamine diminue dans le striatum. Les neurones qui produisent l'acétylcholine, un neuromédiateur excitateur, activent alors excessivement leurs cellules cibles, les neurones qui produisent le GABA (un neuromédiateur inhibiteur). Les neurones du cortex moteur cérébral sont hypoactivés. La zone dite «pars compacta» de la substantia nigra, dans un cerveau normal, apparaît en sombre (la photographie de gauche), car les neurones dopaminergiques sont très pigmentés; à mesure que les neurones meurent chez les patients atteints de la maladie de Parkinson, la coloration disparaît (photographie de droite).



d'autres substances de pénétrer dans le cerveau. En revanche, la L-dopa traverse facilement cette barrière. Elle est ensuite transformée en dopamine par les neurones dopaminergiques qui subsistent dans la substantia nigra.

Toutefois, les médecins ont déchanté: après quatre années d'utilisation de la L-dopa, l'efficacité du composé diminue progressivement, et la fréquence des effets secondaires augmente. De nombreux malades souffrent notamment de troubles psychologiques, alternant entre des périodes où ils sont paralysés et des périodes où leurs mouvements sont normaux ou involontaires. Les préparations plus récentes agissent plus longtemps, reproduisent plus fidèlement la libération de la dopamine par les neurones et minimisent certains de ces effets secondaires, mais elles restent imparfaites. Aussi les pharmacologues ont-ils cherché d'autres médicaments. En 1974, ils ont essayé des médicaments, nommés agonistes de la dopamine, qui agissent comme la dopamine. Ces substances évitent les fluctuations de la commande motrice associée à l'usage intensif de la L-dopa, mais elles sont plus coûteuses et produisent des effets indésirables, tels que confusion, vertiges en position debout et mouvements involontaires.

Puis, en 1975, nous avons proposé la sélégiline (ou L-déprényl), une

substance synthétisée par un scientifique hongrois, qui avait été testée sans résultat dans le traitement de la dépression, puis était tombée dans l'oubli. Elle inhibe la dégradation de la dopamine qui reste disponible dans le striatum. Normalement la dopamine est dégradée par les neurones qui la fabriquent, par les cellules microgliales et par les astrocytes présents au voisinage des sites de libération. La sélégiline inhibe la monoamine oxydase B, l'enzyme qui dégrade la dopamine dans les astrocytes et dans les cellules microgliales.

La sélégiline n'est pas le médicament idéal, mais elle a des propriétés intéressantes. Ainsi, elle potentialise les effets de la L-dopa, de sorte que l'on peut réduire les doses de ce médicament. D'autre part, elle ne présente pas les inconvénients d'autres médicaments qui bloquent la dégradation de la dopamine.

Nos premiers résultats avaient montré que la sélégiline épargnait, chez les personnes atteintes de la maladie de Parkinson, les neurones qui produisaient encore de la dopamine, mais ces résultats n'ont pas été confirmés. Que la sélégiline exerce ou non une action protectrice, son étude a eu deux conséquences intéressantes: d'une part, elle a conduit à la mise au point de nouveaux inhibiteurs enzymatiques, qui seront peut-être utilisables chez les

patients atteints de la maladie de Parkinson, mais aussi de la maladie d'Alzheimer et de dépression; d'autre part, plusieurs neurologues ont pensé qu'il ne leur suffisait pas d'augmenter la concentration ou l'activité de la dopamine dans le striatum et, plutôt que de soulager les symptômes, ils ont voulu s'attaquer aux causes de la maladie, la dégénérescence des neurones.

Le rôle clé des radicaux libres

Pour préserver les neurones, on doit bloquer un ou plusieurs des événements qui aboutissent à leur destruction. Dans la maladie de Parkinson, la mort des neurones serait due, en grande partie, à l'accumulation de radicaux libres oxygène, des molécules très réactives. Manquant d'un électron, les radicaux libres en prennent un aux molécules qu'ils rencontrent, par le même type de réaction d'oxydation que dans la formation de la rouille ou le rancissement du beurre. Dans l'organisme, les radicaux libres endommagent tout ce qu'ils touchent, que ce soit les membranes lipidiques des cellules, le matériel génétique ou des protéines vitales. De surcroît, en arrachant des électrons à leurs proies, les radicaux libres engendrent souvent d'autres radicaux libres, ce qui amplifie les mécanismes de destruction.

Au début des années 1970, à New York, Gerald Cohen et Richard Heikkila furent les premiers à penser que les radicaux libres pouvaient provoquer la maladie de Parkinson. D'autres équipes avaient montré qu'une toxine utilisée lors de certaines expérimentations animales déclenche des symptômes parkinsoniens, parce qu'elle détruit les neurones dopaminergiques dans la substantia nigra ; G. Cohen et R. Heikkila montrèrent que la toxine empoisonne les neurones en provoquant la formation d'au moins deux types de radicaux libres.

L'autopsie de patients décédés de la maladie a validé leur hypothèse. Connaissant les modifications chimiques causées par les radicaux libres aux composants cellulaires, nous avons recherché des « preuves » de l'activité de tels radicaux libres dans la substantia nigra. Plusieurs indicateurs chimiques sont anormaux dans le cerveau des parkinsoniens : ainsi, les composés formés lors de l'oxydation de certains lipides des membranes cellulaires y sont anormalement concentrés.

D'autres observateurs corroborent cette indication. Ainsi la zone de la substantia nigra lésée chez les patients parkinsoniens contient des concentrations anormalement élevées en substances (le fer, par exemple) qui favorisent la formation de radicaux libres. Simultanément, le tissu cérébral contient très peu d'antioxydants, des molécules qui neutralisent les radicaux libres ou empêchent leur formation.

Des biochimistes ont également observé une diminution de l'activité de l'enzyme nommée complexe I de la chaîne respiratoire mitochondriale des neurones lésés. Les mitochondries sont les centrales énergétiques des cellules, et le complexe I de la chaîne respiratoire participe à la production de l'énergie nécessaire aux cellules (celles-ci dépensent de l'énergie notamment pour excréter du calcium et d'autres ions qui facilitent les réactions oxydatives). Lorsque le complexe I est défectueux, la production d'énergie décroît, les concentrations en radicaux libres augmentent, et les concentrations en antioxydants diminuent ; tous ces mécanismes se conjuguent pour augmenter l'oxydation et aggraver les dysfonctionnements cellulaires dus à un manque d'énergie.

Quels mécanismes déclenchent les réactions oxydatives et les lésions dans le cerveau des personnes atteintes de

Un tremblement régulier de la main apparaît d'abord ; il ressemble au mouvement qui consiste à faire rouler une bille entre le pouce et l'index.



Une inclinaison vers l'avant ou vers l'arrière s'observe en cas de trouble de l'équilibre et de la coordination.

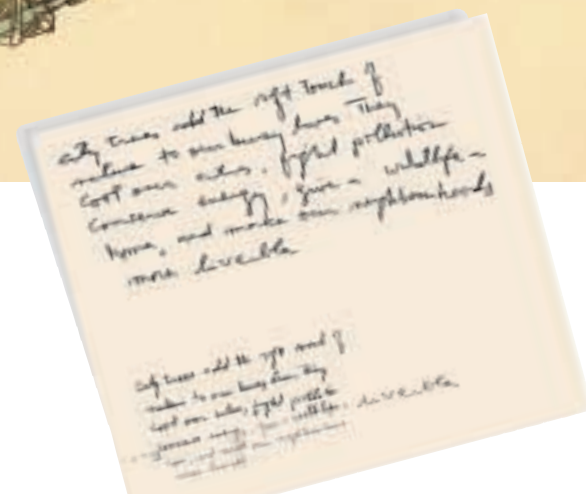


La difficulté à se lever à partir de la position assise indique une anomalie de la commande des mouvements. Certains malades se sentent très faibles et ont la sensation d'être attachés par des cordes ou retenus par une force externe.



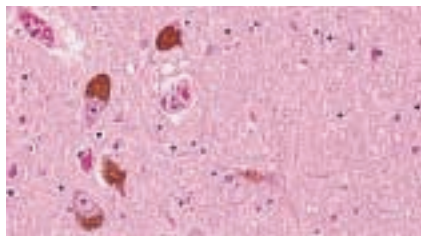
La rigidité musculaire se traduit par le phénomène de la « roue dentée » : les mouvements du bras sont saccadés au lieu d'être continus.

Une diminution de la taille des lettres est un signe chez certains malades. Les exemples ci-dessous montrent l'écriture de deux personnes : le traitement était efficace chez l'une (*en haut*), mais pas chez l'autre (*en bas*).

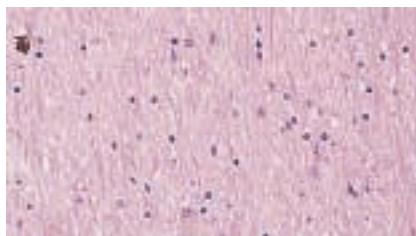


4. LES SYMPTOMES de la maladie de Parkinson sont des tremblements, une rigidité musculaire et une bradykinésie, c'est-à-dire un ralentissement des fonctions motrices, puis une perte des mouvements volontaires. On observe souvent des troubles de l'équilibre et une modification de l'écriture.

la maladie de Parkinson? Plusieurs hypothèses ont été avancées. En 1982, William Langston, neurologue à l'Université de Stanford, s'étonna de voir plusieurs héroïnomanes subitement rigides après avoir consommé de la drogue. C'était comme s'ils avaient été frappés d'une forme aiguë de mala-



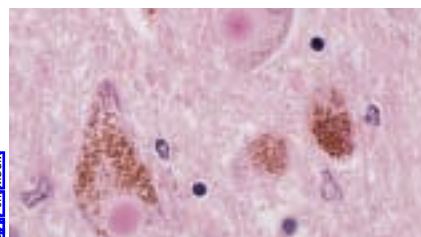
die de Parkinson, survenue en une seule nuit. Alors que W. Langston cherchait comment l'héroïne avait produit cet effet, un toxicologue lui signala un cas similaire : un étudiant en médecine, toxicomane, s'était retrouvé paralysé après injection d'une préparation de mépéridine de fabrication artisanale,



contenant une impureté nommée MPTP; cette dernière avait détruit les neurones dopaminergiques de la substantia nigra. Après avoir montré que la drogue consommée par son patient contenait aussi du MPTP, W. Langston conclut que cette impureté déclenche les symptômes parkinsoniens des toxicomanes.

Cette déduction ayant été confirmée, on a voulu savoir si une substance apparentée au MPTP déclencherait également la maladie de Parkinson. La piste était bonne : en étudiant les mécanismes de destruction des neurones dopaminergiques par le MPTP, les pharmacologues ont découvert l'un des modes d'action de la toxine.

Le MPTP est toxique, parce qu'il est modifié dans l'organisme : après son passage dans le cerveau et après avoir été capturé par les cellules microgliales, il atteint les mitochondries, où la monoamine oxydase B le transforme en une molécule plus réactive qui, lorsqu'elle est libérée, endommage les neurones dopaminergiques de la substantia nigra.



5. LES LÉSIONS CÉRÉBRALES sont nettes chez les personnes décédées de la maladie de Parkinson. Les neurones dopaminergiques (les ovales foncés), visibles dans la substance noire d'un cerveau sain (en haut à gauche), disparaissent chez les parkinsoniens (ci-dessus). Les neurones qui survivent ont souvent un aspect anormal : elles contiennent notamment des structures anormales nommées les corps de Lewy (ci-contre, les ronds roses).

Accumulation de fer et stress oxydatif

Il y aurait, en France, environ 80 000 malades parkinsoniens, soit un peu plus d'une personne sur 1 000. Chez les personnes âgées, cette maladie est la deuxième cause de handicap moteur, après les accidents vasculaires cérébraux. C'est la destruction des neurones de la substantia nigra utilisant la dopamine comme messager chimique qui est responsable des signes cliniques de la maladie.

Selon une des hypothèses proposées pour expliquer les mécanismes de la destruction neuronale, le stress oxydatif augmente parce que la production de radicaux libres croît et/ou que les défenses contre les mécanismes oxydants diminuent. Le stress oxydatif serait impliqué dans de nombreuses maladies neurodégénératives, mais la production excessive de radicaux libres n'est pas l'unique cause de ces maladies. De plus, on ignore encore si les radicaux libres déclenchent la mort des neurones de la substantia nigra ou si leur production surabondante résulte de cette mort neuronale ; si le stress oxydatif délétère se produit au début ou à la fin du mécanisme de neurodégénérescence.

De nombreuses études ont montré que le fer est anormalement concentré dans la substantia nigra des patients atteints de la maladie de Parkinson et dans le cerveau des animaux qui servent de modèle pour la maladie de Parkinson. Or, cet élément, indispensable à la vie et au bon fonctionnement du cerveau, peut jouer un rôle nocif en stimulant la production de radicaux libres s'il est présent en excès. On pensait que le fer pénètre dans les neurones dopaminergiques par les récepteurs de la transferrine, mais nous avons montré que la densité de ces récepteurs est plus faible sur les neurones qui subsistent chez les malades que sur les neurones des sujets

témoins. Or, on sait qu'un mécanisme de rétroaction abaisse, dans les cellules de mammifères, le nombre des récepteurs de la transferrine quand la concentration en fer intracellulaire est élevée.

Au contraire, nous avons montré qu'une autre protéine qui lie le fer, la lactoferrine, et ses récepteurs sont très abondants dans la substantia nigra. Chez les malades parkinsoniens, la perte neuronale est d'autant plus importante que le nombre de récepteurs de la lactoferrine portés par les neurones épargnés est élevé. On s'interroge : l'abondance de ces récepteurs est-elle la cause de la mort des neurones disparus, détruits par un stress oxydatif excessif ou, au contraire, permet-elle aux neurones épargnés de survivre ? Il semble que des quantités excessives de fer pénètrent, par l'intermédiaire des récepteurs de la lactoferrine, dans des neurones vulnérables, où la concentration en fer serait déjà trop élevée.

Dans d'autres maladies neurodégénératives, telles la maladie d'Alzheimer ou la sclérose latérale amyotrophique, des augmentations du contenu en fer et en lactoferrine ont également été détectées dans les régions où se produisent les pertes neuronales. Le rôle du fer dans la neurodégénérescence ne semble pas spécifique à la maladie de Parkinson : toute accumulation de fer accélérerait la mort neuronale. Des recherches combinant l'étude du cerveau humain, *post-mortem* et *in vivo*, et l'étude de modèles expérimentaux devraient éclairer les relations entre les phénomènes de stress oxydatif et les autres mécanismes responsables de la mort neuronale.

Baptiste FAUCHEUX et Étienne HIRSCH – INSERM U 289

Chez le singe, on a montré que la sélégiline protège les animaux contre le parkinsonisme, parce qu'elle empêche la transformation du MPTP en inhibant la monoamine oxydase B.

En l'absence d'un tel inhibiteur, le MPTP modifié inhibe le complexe I de la chaîne respiratoire mitochondriale des neurones de la substantia nigra. Alors, les neurones manquent d'énergie, la production de radicaux libres augmente, l'activité antioxydante diminue et, finalement, les neurones sont détruits.

Tout analogue chimique du MPTP naturel ou artificiel risquerait de déclencher une maladie de Parkinson par un mécanisme identique. Aussi plusieurs équipes ont-elles cherché de tels composés... en vain. D'autre part, on a récemment pensé que les carbolines

bêta seraient des neurotoxines potentielles, mais leur concentration dans le cerveau de patients parkinsoniens est trop faible pour déclencher la maladie. Après plusieurs années de recherche, personne n'a trouvé de lien entre l'une des toxines connues et la maladie de Parkinson, de sorte que l'on a cherché d'autres explications de l'accumulation de radicaux libres chez les parkinsoniens.

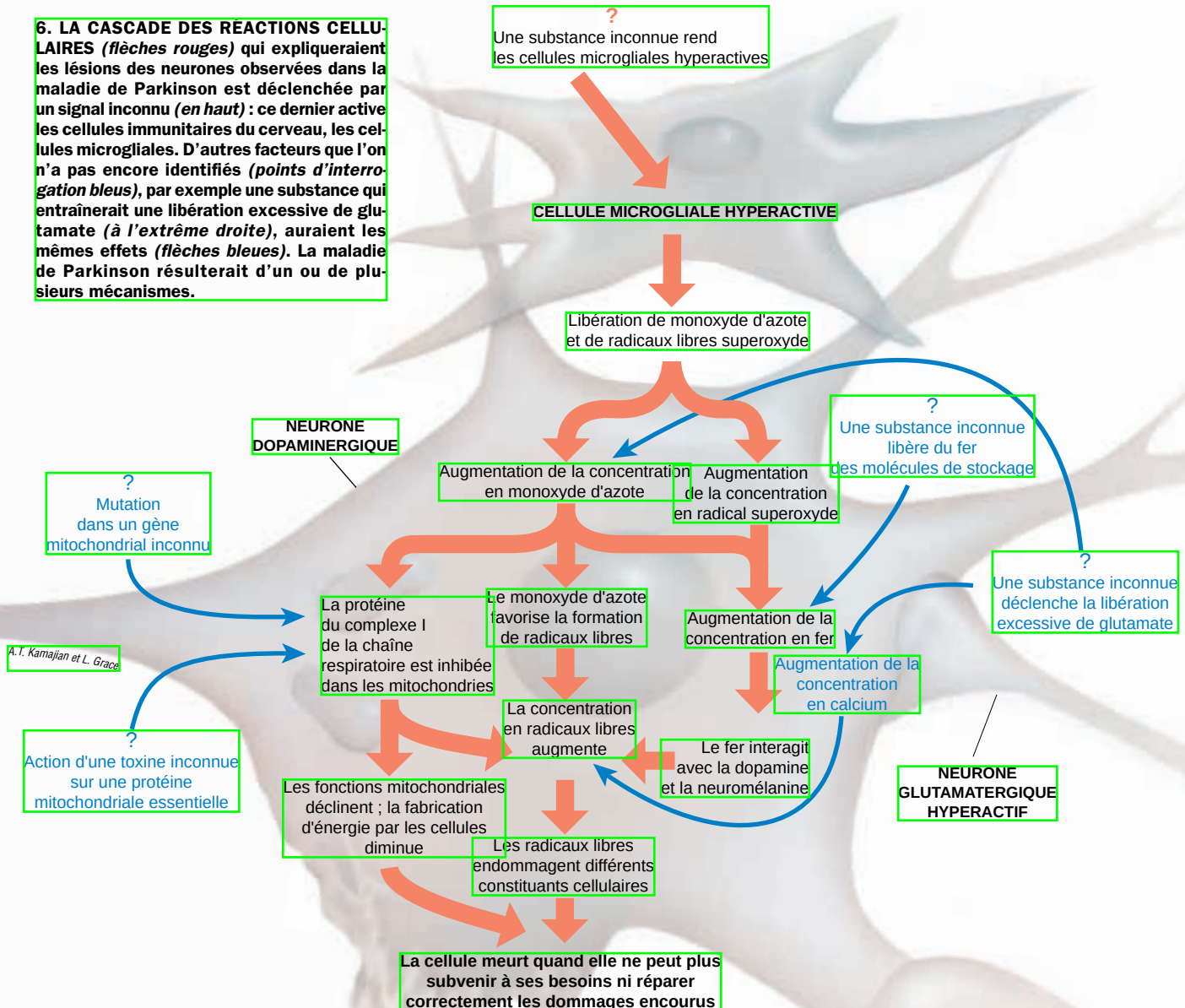
Hyperactivité des cellules immunitaires?

Une autre hypothèse est fondée sur l'observation de cellules microgliales (les cellules immunitaires du cerveau), anormalement actives dans la substantia nigra des parkinsoniens. En général,

le cerveau empêche les cellules microgliales de devenir trop actives, sinon elles produisent des radicaux libres et risquent d'endommager les neurones. Toutefois, les neurones peuvent être endommagés quand les inhibitions sont insuffisantes dans la substantia nigra, en raison, par exemple, d'une augmentation excessive de certaines cytokines (des messagers chimiques du système immunitaire).

Les neurologues qui ont étudié les neurones dopaminergiques entrevoient aujourd'hui comment les cellules microgliales activées participeraient à la destruction oxydative des neurones dopaminergiques de la substantia nigra. La plupart des mécanismes envisagés reposent sur la production de radicaux libres de monoxyde d'azote.

6. LA CASCADE DES RÉACTIONS CELLULAIRES (flèches rouges) qui expliqueraient les lésions des neurones observées dans la maladie de Parkinson est déclenchée par un signal inconnu (en haut) : ce dernier active les cellules immunitaires du cerveau, les cellules microgliales. D'autres facteurs que l'on n'a pas encore identifiés (points d'interrogation bleus), par exemple une substance qui entraînerait une libération excessive de glutamate (à l'extrême droite), auraient les mêmes effets (flèches bleues). La maladie de Parkinson résulterait d'un ou de plusieurs mécanismes.



Ainsi, quand les cellules microgliales sont hyperactives, elles produisent du monoxyde d'azote qui s'échappe des cellules, pénètre dans les neurones voisins et participe aux réactions qui engendrent d'autres radicaux libres destructeurs. En outre, le monoxyde d'azote inhibe directement l'enzyme du complexe I de la chaîne respiratoire mitochondriale et cause les mêmes lésions oxydatives que le MPTP ou les toxines apparentées.

De surcroît, nous avons montré que le monoxyde d'azote et un autre radical libre, le radical superoxyde, produit par les cellules microgliales suractivées, libèrent du fer de ses sites de stockage dans le cerveau, ce qui déclenche de nouvelles cascades de réactions oxydatives : le fer réagit avec la dopamine et ses dérivés d'au moins deux façons différentes, ce qui participe à l'augmentation des concentrations en radicaux libres dans les neurones dopaminergiques.

Le fer favorise l'auto-oxydation de la dopamine qui donne de la neuromélanine. Lorsque les concentrations en fer sont faibles, la neuromélanine sert d'antioxydant, mais elle devient elle-même oxydante et favorise la formation de radicaux libres quand elle se lie au fer ou à d'autres métaux de transition.

Le fer qui agit sur la neuromélanine favorise-t-il l'apparition de la maladie

de Parkinson? Apparemment, car, dans le cerveau de patients décédés de la maladie de Parkinson, le pigment porte beaucoup d'atomes de fer, alors qu'il en est dépourvu dans le cerveau des personnes décédées d'une autre maladie.

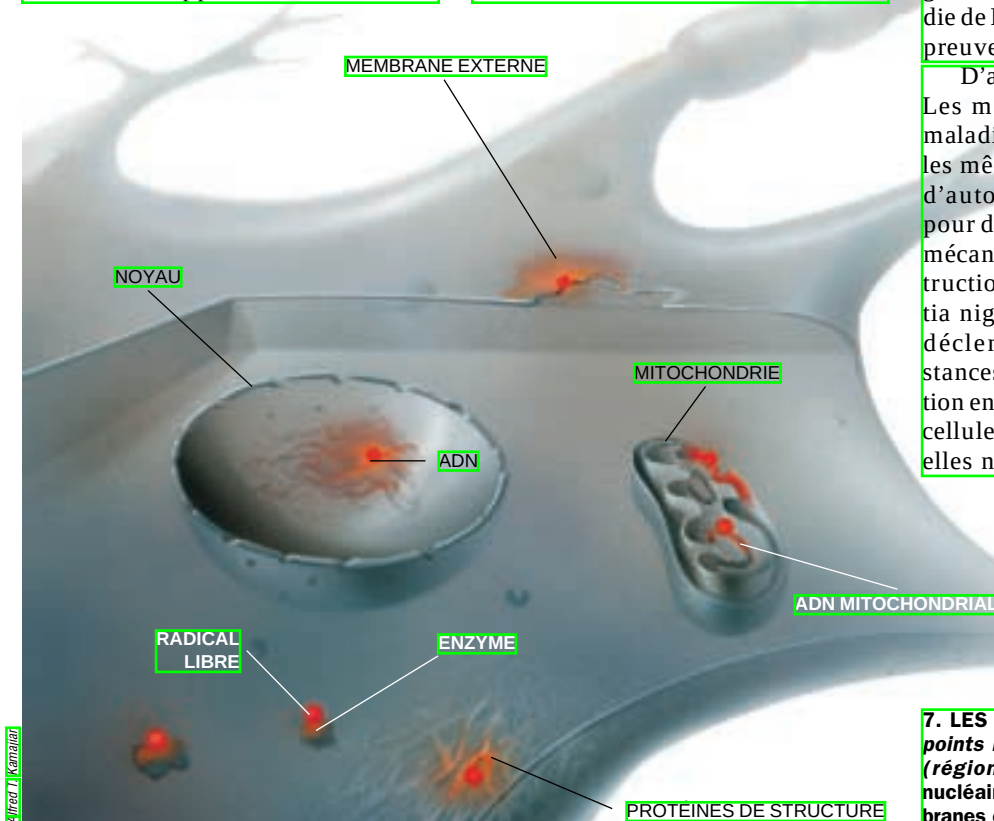
D'autre part, le fer bloque la dégradation de la dopamine en composés inertes. Normalement les neurones et les cellules microgliales transforment la dopamine en une substance inactive et en peroxyde d'hydrogène, lui-même transformé en eau. En présence de fortes concentrations en fer, le peroxyde d'hydrogène se dissocie en oxygène et en un radical libre. C'est peut-être parce que la dopamine favorise la synthèse de radicaux libres que les neurones dopaminergiques sont particulièrement sensibles aux mécanismes oxydatifs. On a même parfois craint que la L-dopa, qui augmente les concentrations en dopamine, n'endommage – paradoxalement – les neurones de la substantia nigra. La question reste ouverte, mais nous pensons que les débats passionnés auxquels elle donne lieu sont exagérés.

En résumé, les cellules microgliales de la substantia nigra détruiraient les neurones dopaminergiques par des cascades de réactions oxydatives déclenchées par le monoxyde d'azote. Le fer libéré par le monoxyde d'azote ou par d'autres radicaux libres accélérerait la destruction. Nous l'avons vu, les cel-

lules cérébrales contiennent des molécules qui neutralisent les radicaux libres et des enzymes qui réparent les lésions oxydatives. Toutefois les dispositifs de protection sont moins performants qu'ailleurs dans l'organisme et ils sont insuffisants pour résister à une attaque trop brutale de substances oxydantes. Ainsi, les neurones de la substantia nigra seraient progressivement détruits jusqu'à l'apparition des symptômes de la maladie de Parkinson.

Dans cette hypothèse, tout facteur qui augmenterait la production de monoxyde d'azote, qui libérerait le fer stocké ou qui réduirait l'activité du complexe I de la chaîne respiratoire mitochondriale dans la substantia nigra, déclencherait une maladie de Parkinson. On pourrait également attribuer la maladie à une libération excessive de glutamate (un neuromédiateur exciteur) par des neurones qui se projettent dans le striatum et dans la substantia nigra. En stimulant la production de monoxyde d'azote et la libération de fer, un excès de glutamate déclencherait la même cascade de réactions destructives que celle envisagée dans l'hypothèse de l'hyperactivité microgliale. Un excès de glutamate est aussi incriminé dans les accidents vasculaires cérébraux notamment. Personne n'a prouvé que les neurones produisant le glutamate sont hyperactifs dans la maladie de Parkinson, mais on en a quelques preuves indirectes.

D'autres questions restent ouvertes. Les mécanismes d'apparition de la maladie de Parkinson sont-ils toujours les mêmes? Aussi bien qu'un moteur d'automobile peut tomber en panne pour de nombreuses raisons, plusieurs mécanismes peuvent aboutir à la destruction des neurones de la substantia nigra. Quels sont les facteurs qui déclenchent la maladie? Des substances qui augmentent la concentration en cytokines ou l'hyperactivité des cellules produisant du glutamate? Si elles n'ont pas encore répondu à ces



7. LES RADICAUX LIBRES OXYGENE (les points rouges) endommagent les cellules (région orangée), et notamment l'ADN nucléaire et l'ADN mitochondrial, les membranes cellulaires et les protéines.

questions, les recherches ont ouvert des voies thérapeutiques qui visent à bloquer les mécanismes d'oxydation et à protéger les neurones.

Les nouveaux traitements

Si les hypothèses envisagées ont un fondement, les agents qui inhibent les cellules microgliales ou qui bloquent la libération de glutamate dans la substantia nigra ou dans le striatum devraient protéger les neurones de certains patients. On recherche donc des composés capables de traverser la barrière hémato-encéphalique et d'agir sans perturber le fonctionnement des autres neurones ni déclencher d'effets indésirables. Avec Johannes Kornhuber, de l'Université de Würzburg, l'un d'entre nous (P. Riederer) a récemment montré que l'amantadine, un très ancien médicament antiparkinsonien dont on ignorait le mécanisme d'action, bloque les effets du glutamate. Ce médicament a-t-il des vertus protectrices? Un autre inhibiteur du glutamate, le dextrométhorphan, est actuellement en phase d'essai clinique.

De surcroît, chez l'animal, les chélateurs du fer (qui piègent le fer et bloquent ainsi de nombreuses réactions oxydatives), les inhibiteurs de la formation du monoxyde d'azote et les antioxydants protègent les neurones dopaminergiques de la substantia nigra contre le stress oxydatif. Chez l'homme, un essai thérapeutique a montré que la vitamine E, un antioxydant, est inefficace ; toutefois, elle traverse très mal la barrière hémato-encéphalique et, dans l'essai réalisé, les doses testées étaient trop faibles. Un autre antioxydant capable d'atteindre le cerveau est en cours d'essai clinique.

Quelle que soit la cause de la destruction des neurones, des médicaments qui limiteraient la dégénérescence des neurones devraient être utiles. Les médecins de plusieurs laboratoires pharmaceutiques tentent ainsi d'administrer directement dans le cerveau des malades une molécule nommée le facteur neurotrophique dérivé des cellules gliales, ou GDNF. On recherche aussi des molécules plus petites qui activeraient les facteurs de croissance des neurones et la régénérescence neuronale. L'une de ces substances, la rasagiline, est en cours d'évaluation chez l'homme, après des études qui ont démontré son action chez des animaux. D'autre part, la nicotine semble avoir



8. DES TOXICOMANES akinétiques et rigides ont été photographiés en 1991 après avoir été traités. Neuf ans auparavant, ils s'étaient tous subitement figés, comme s'ils avaient été atteints d'une maladie de Parkinson foudroyante, après s'être injecté une préparation impure de stupéfiant. En étudiant comment l'impureté contenue dans la drogue avait agi, les neurologues ont précisé certains mécanismes de la maladie de Parkinson.

un effet protecteur, de sorte que l'on étudie en laboratoire l'action thérapeutique potentielle d'analogues de la nicotine. Toutefois il serait absurde de se mettre à fumer pour retarder la progression du parkinsonisme : personne n'a encore prouvé que la nicotine ralentit réellement la perte des neurones dopaminergiques, et les risques du tabagisme sont bien supérieurs à ses éventuels effets bénéfiques.

Les recherches sur la protection des neurones se doublent d'études visant à compenser leur perte. Ainsi, on tente de greffer des neurones dopaminergiques dans le cerveau des malades : l'état de certaines personnes ainsi traitées s'est amélioré, mais les résultats sont inégaux et l'on dispose de peu de neurones à greffer (on utilise des neurones prélevés sur des fœtus issus

d'interruptions volontaires de grossesse). En outre, les mécanismes responsables de la destruction des neurones risquent de détruire aussi les cellules greffées. On détruit parfois chirurgicalement, avec quelque succès, certaines régions du cerveau qui fonctionnent mal quand la dopamine est en concentration insuffisante.

Pour bien traiter le parkinsonisme, il faudrait toutefois que l'on détecte les mécanismes pathologiques dès qu'ils apparaissent, bien avant les premiers symptômes. Personne ne sait quand de nouveaux traitements efficaces seront disponibles, mais les chercheurs devraient progresser, au cours des prochaines années, tant dans le domaine de la détection précoce de la maladie que de la protection des neurones dopaminergiques.

Moussa YODIM est professeur de pharmacologie à l'Institut de technologie de Haïfa, en Israël. Peter RIEDERER est professeur de neurochimie clinique à l'Université de Würzburg, en Allemagne.

A.D. MORRIS, *James Parkinson : His Life and Times*, sous la direction de F. Clifford Rose, Birkhauser, 1989.

Emerging Strategies in Parkinson's Disease, sous la direction de H.L. Klawans, in *Neurology* (numéro spécial), vol. 40, n° 10, supplément 3, octobre 1990.

M.B.H. YODIM, D. Ben SHACHER et P. RIEDERER, *Iron-Melanin Interaction and Parkinson's Disease*, in *News in Phy-*

siological Sciences, vol. 8, pp. 45-49, février 1993.

M.D. YAHR, *Parkinson's Disease : The L-dopa Era*, in *Advances in Neurology*, vol. 60, pp. 11-17, 1993.

M. GERLACH, D. Ben SHACHER, P. RIEDERER et M.B.H. YODIM, *Altered Brain Metabolism of Iron as a Cause of Neurodegenerative Diseases?*, in *Journal of Neurochemistry*, vol. 63, n° 3, pp. 793-807, septembre 1994.

Neurodegeneration and Neuroprotection in Parkinson's Disease, sous la direction de C.W. Olanow et al., Academic Press, 1996.

Des animaux transgéniques produisent des médicaments

WILLIAM VELANDER • HENRYK LUBON • WILLIAM DROHAN

Les femelles de mammifères qui ont été dotées de gènes humains produisent dans leur lait des protéines humaines que l'on peut utiliser comme médicaments.

Un an après sa naissance, notre truie expérimentale, Genie, a allaité sept porcelets : son lait leur donnait toutes les substances nutritives nécessaires, mais il contenait, en supplément, une substance indispensable à la survie de quelques malades, la protéine C humaine. Les laboratoires pharmaceutiques obtiennent aujourd'hui cette protéine en l'extrayant de grandes quantités de sang humain ou en cultivant des micro-organismes dans d'immenses bioréacteurs en acier inoxydable. Genie a été la première truie du monde à produire, dans son lait, de grandes quantités de protéine C humaine.

Cette capacité de fabriquer ainsi une substance à usage thérapeutique résultait de recherches commencées presque dix ans auparavant : avec des biologistes de la Croix-Rouge américaine, nous voulions modifier la composition du lait animal pour y introduire ces substances vitales pour l'homme ; en théorie, la méthode devait permettre de produire n'importe laquelle de ces protéines sanguines dont il y a fréquemment pénurie.

De nombreux malades ont besoin de telles substances : il manque aux hémophiles certaines protéines qui assurent la coagulation du sang, notamment le facteur VIII et le facteur IX ; certaines personnes ne produisent pas assez de protéine C, qui participe aussi à la coagulation du sang ; on administre parfois la protéine C aux opérés à qui l'on remplace une articulation. Après les accidents vasculaires (cérébraux ou cardiaques), les personnes atteintes ont également besoin d'une substance qui

dissout les caillots sanguins : on leur administre aussi rapidement que possible une protéine, l'activateur tissulaire du plasminogène. Enfin des aérosols contenant de l'antitrypsine alpha 1, une autre protéine, permettent à certaines personnes atteintes de formes graves d'emphysème de respirer plus facilement.

Ces protéines sont en si faible concentration dans le sang des donneurs qu'elles sont difficiles à obtenir et que leur coût limite notablement leur utilisation thérapeutique. Par exemple, un traitement par le facteur VIII purifié, strictement réservé aux hémophiles qui ont des hémorragies, coûte plusieurs dizaines de milliers de francs par an. L'idéal serait d'administrer en continu cette protéine sanguine, mais le traitement coûterait plus de 500 000 francs par malade et par an.

Ces sommes traduisent la difficulté de l'extraction de ces protéines sanguines et de la mise au point d'unités de production à partir de cellules en culture. Plus précisément, des unités de production coûtant déjà plus de 120 millions de francs ne produisent pourtant que de faibles quantités des diverses protéines. La mise au point d'animaux transgéniques, c'est-à-dire d'animaux porteurs de gènes d'une autre espèce, coûte notablement moins cher et permet de fabriquer de grandes quantités de protéines sanguines humaines.

En outre, les protéines sanguines ainsi produites ne risquent pas d'être contaminées par des agents infectieux, comme cela est parfois le cas pour les protéines extraites du sang de donneurs. Bien que les protéines sanguines

d'extraction soient aujourd'hui plus sûres, depuis que les donneurs sont soigneusement sélectionnés et que l'on traite les prélèvements pour inactiver les virus qui s'y trouveraient, un agent pathogène risque toujours de subsister. Pour éviter tout risque de contamination accidentelle par le virus du SIDA ou par le virus de l'hépatite C, les biologistes cherchent des substituts aux médicaments extraits du sang humain. De même, certains lots de sang ont été retirés des réserves européennes et américaines, car ils risquaient d'avoir été contaminés par l'agent de la maladie de Creutzfeldt-Jakob. La fabrication de protéines sanguines à partir d'animaux transgéniques, dont on est certain qu'ils sont indemnes de ces maladies, supprimerait ces risques.

La chasse à la souris

Les nombreux avantages des animaux transgéniques nous ont incités à persévérer jusqu'à atteindre notre objectif : créer une étable modèle abritant des animaux sains et porteurs de quelques gènes humains importants. Toutefois, quand nous avons commencé ces travaux, nous avons rencontré plusieurs difficultés techniques, qu'il a fallu surmonter pour élever des animaux transgéniques et pour obtenir des quantités suffisantes de protéines dans le lait.

Dès 1980, Jon Gordon et ses collègues de l'Université Yale avaient montré comment on peut introduire des segments d'ADN dans les chromosomes d'embryons de souris. Peu après, Thomas Wagner et ses collègues de l'Université de l'Ohio mon-

trèrent qu'un gène (un segment d'ADN codant une protéine) de lapin restait fonctionnel chez une souris. Ils injectaient, par l'intermédiaire d'un tube de verre très fin, un segment d'ADN de lapin dans un embryon de souris au stade d'une seule cellule. En général, l'ADN s'intégrait aux chromosomes de la souris, peut-être parce qu'il était considéré par la cellule comme un morceau d'ADN endommagé, qui devait être réparé.

Lorsque les embryons modifiés étaient ensuite implantés dans une souris, quelques souriceaux de la portée avaient le gène de lapin dans tous leurs tissus. Puis, ces souris transgéniques transmettaient, à leur tour, le gène étranger à leur descendance. Le gène était exprimé chez les souris : ces sou-

ris avaient, dans leur sang, de l'hémoglobine de lapin.

Un autre jalon, sur la voie des animaux transgéniques utilisés comme bioréacteurs, fut atteint en 1987, quand une équipe américaine et une équipe anglaise trouvèrent comment activer des gènes étrangers uniquement dans les glandes mammaires des souris. Ainsi les protéines étrangères étaient directement libérées dans le lait des souris transgéniques, d'où l'on pouvait aisément les extraire. Si la réalisation était impressionnante, son principe était simple : les biologistes avaient combiné le gène étranger avec un court segment d'ADN qui, normalement, active le gène d'une protéine du lait de souris.

Les souris de John Clark et de ses collègues, à l'Institut de physiologie

animale et de génétique d'Édimbourg, produisirent jusqu'à 23 grammes d'une protéine du lait de brebis (la lactoglobuline bêta) par litre de lait, c'est-à-dire presque autant que leurs propres protéines de lait. Toutefois, la lactoglobuline bêta n'est pas une des protéines humaines qui font défaut, et les minuscules souris ne fournissent pas beaucoup de lait. Aussi l'équipe écossaise décida-t-elle d'injecter à des embryons de brebis de l'ADN contenant le gène d'une protéine thérapeutique humaine.

Ils choisirent le gène qui code un des facteurs de coagulation du sang, le facteur IX, associé à un segment d'ADN de brebis qui, normalement, déclenche la production de lactoglobuline bêta dans la glande mammaire. Deux ans plus tard, les brebis trans-

1. LES BIOREACTEURS sont de gros réservoirs en acier inoxydable, équipés de dispositifs qui règlent la composition et la température du milieu de culture, où se multiplient d'innombrables cellules. On

évite cet appareillage élaboré et coûteux en introduisant des gènes humains dans des animaux «transgéniques», telles des truies (photographie de gauche), qui produisent ces protéines dans leur lait.



© J. M. H. 1987



© J. M. H. 1987

géniques sécrétaient du facteur IX dans leur lait, mais en quantités infimes. Pourquoi cet échec? Nous avons analysé ces travaux et essayé une autre stratégie.

Un cochon magique

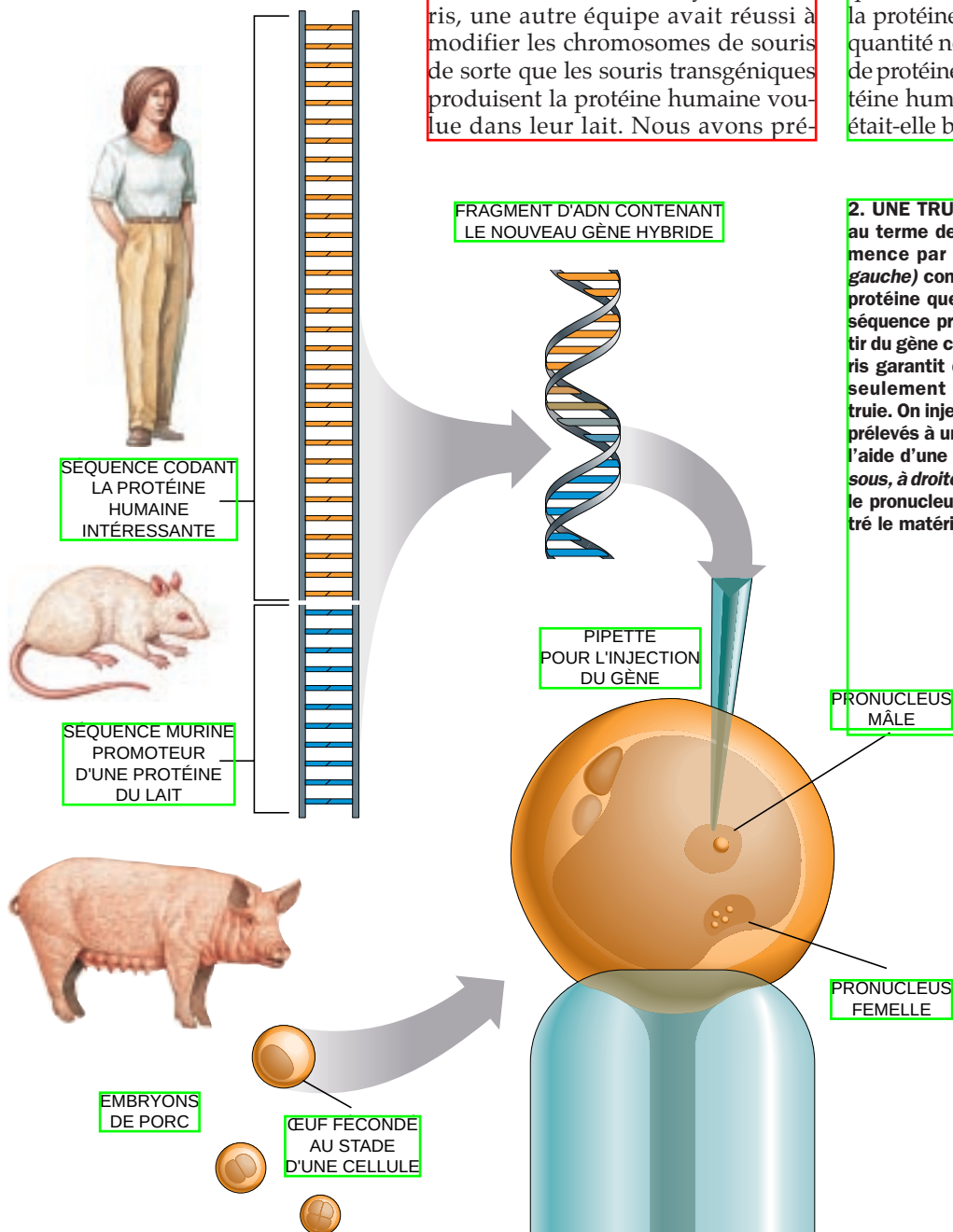
Au lieu de travailler sur des brebis, des chèvres ou des vaches, comme les autres équipes, nous avons choisi la truie, pour produire des protéines humaines. Les truies présentent plusieurs avantages : la période de gestation est courte (quatre mois) ; les femelles ont leur première portée à un an environ, et les portées sont com-

posées d'une dizaine de porcelets. Au total, la production de cochons transgéniques est plus rapide que pour d'autres espèces domestiques, et l'on récupère beaucoup de lait : en période de lactation, une truie produit environ 300 litres de lait par an. Restait la principale question : les truies transgéniques produiraient-elles suffisamment de protéines humaines dans leur lait?

Pour mettre les chances de notre côté, nous avons décidé d'utiliser un segment d'ADN composé d'un gène humain et du promoteur d'une protéine du lait de souris, la protéine acide du lactosérum. En injectant cette combinaison d'ADN à des embryons de souris, une autre équipe avait réussi à modifier les chromosomes de souris de sorte que les souris transgéniques produisent la protéine humaine voulue dans leur lait. Nous avons pré-

paré un fragment d'ADN contenant le gène humain de la protéine voulue, ici la protéine C, et le promoteur de la protéine acide du lactosérum de souris. Nous avons ensuite injecté cet ADN à des embryons de porc.

Nous avons implanté les cellules modifiées chez une truie et, après quatre mois d'inquiétude, nous avons constaté qu'un des porcelets femelles portait l'ADN étranger dans toutes ses cellules. C'était Genie! Nous avons dû patienter encore un an, le temps qu'elle puisse procréer, pour savoir si elle produirait la protéine humaine dans son lait. Effectivement, le lait de Genie contenait la protéine C. Sans être aussi abondante que certaines protéines porcines du lait, la protéine humaine était présente en quantité notable : environ un gramme de protéine C par litre de lait. Cette protéine humaine fabriquée par un porc était-elle biologiquement active?



2. UNE TRUIE TRANSGENIQUE est obtenue au terme de plusieurs opérations : on commence par préparer un segment d'ADN (à gauche) contenant le gène humain codant la protéine que l'on cherche à produire et une séquence promoteur. Celle-ci, obtenue à partir du gène codant une protéine du lait de souris garantit que le gène humain s'exprimera seulement dans le tissu mammaire de la truie. On injecte alors cet ADN à des embryons prélevés à une truie (ci-dessous, à gauche), à l'aide d'une très fine pipette de verre (ci-dessous, à droite). L'ADN modifié est introduit dans le pronucleus mâle, une zone où est concentré le matériel génétique apporté par le spermatozoïde qui a fécondé l'œuf. Un des chromosomes du porc incorpore l'ADN étranger : les fragments isolés sont peut-être considérés comme des fragments de son propre matériel génétique qu'il faudrait réparer. Enfin, on réimplante les embryons modifiés.



La question était grave, car les détails de la synthèse des protéines dans les cellules sont encore mystérieux. Si l'on sait assez bien comment fonctionne la machinerie cellulaire qui lit le code génétique et le traduit en des séquences d'acides aminés (les protéines sont des enchaînements d'acides aminés), on connaît mal les modifications subtiles que les cellules font subir aux protéines, une fois les acides aminés assemblés. Ces modifications «post-traductionnelles» donnent aux protéines la forme et la composition chimique finales qui assureront leur fonctionnement correct : au cours d'opérations cellulaires complexes, certaines régions de la protéine sont éliminées, et des groupes chimiques sont ajoutés. Les cellules du tissu mammaire de Genie allaient-elles fabriquer une version biologiquement active de la protéine sanguine humaine?

Avant d'étudier la question, nous devions extraire du lait la protéine humaine. Nous avons d'abord éliminé les matières grasses du lait par centrifugation, puis nous avons purifié le lactosérum en utilisant un procédé qui devait séparer la fraction biologiquement active de la protéine humaine du reste : un tiers des molécules de protéine C étaient actives! C'était la première fois que l'on produisait et que l'on isolait autant de protéine C fonctionnelle à partir d'un animal transgénique, et le rendement était même supérieur à celui des bioréacteurs. Genie était la preuve vivante qu'une protéine humaine complexe pouvait être produite par des animaux transgéniques.

Les modèles de demain

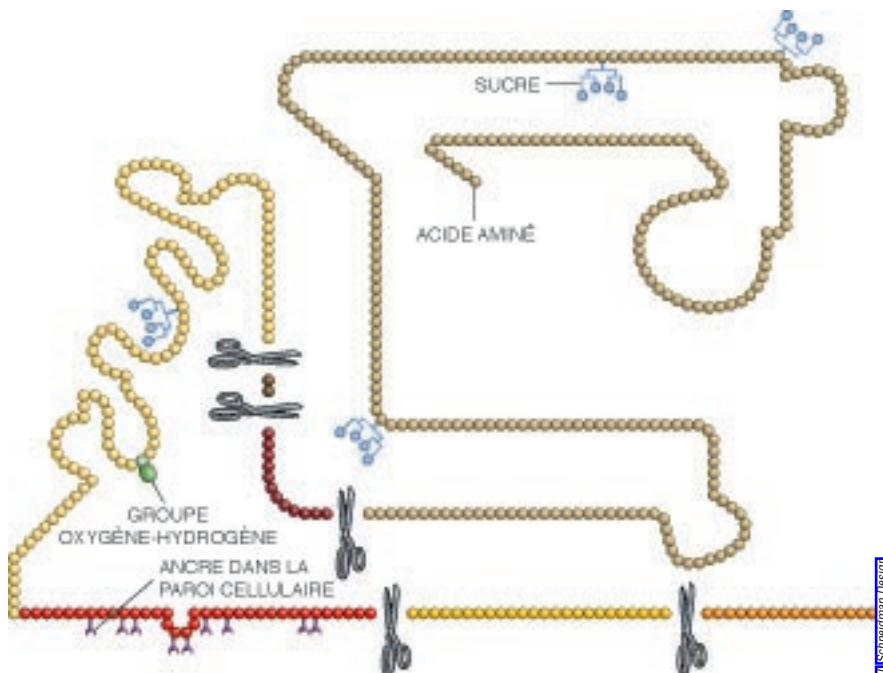
Pendant plusieurs années, nous avons étudié Genie et sa nombreuse descendance ; puis nous nous sommes efforcés d'augmenter la quantité de protéine humaine active dans le lait. Si un tiers seulement de la protéine C excrétée était active, c'était que le tissu mammaire n'effectuait pas correctement la mise en forme de la protéine.

Nous avons alors découvert que la plupart des molécules de protéine C restaient figées dans une configuration immature, et par conséquent inactive, car les cellules ne produisaient pas suffisamment d'une enzyme de maturation indispensable, la furine.

Augmenterions-nous le rendement en introduisant dans le génome un gène qui favoriserait la synthèse de cette enzyme?

Pour le savoir, nous avons temporairement abandonné le porc pour la souris, un des mammifères transgéniques les plus étudiés, qui se repro-

duit très rapidement. En 1995, nous avons obtenu une lignée de souris transgéniques qui portaient deux gènes humains : celui de la protéine C et celui de la furine. Pour que ces deux «transgènes» s'expriment dans la glande mammaire, nous les avons associés au promoteur d'ADN déjà uti-



3. LA PROTÉINE C HUMAINE est synthétisée en plusieurs étapes. La machinerie cellulaire commence par assembler 461 acides aminés conformément aux informations stockées dans le gène de la protéine C (c'est l'étape de traduction). Après cet assemblage, la protéine se replie pour adopter une configuration caractéristique, qui délimite plusieurs domaines (les différentes régions colorées). Puis la protéine subit plusieurs modifications dites post-traductionnelles : certaines régions sont éliminées, et des groupes chimiques sont ajoutés à des endroits précis de la chaîne d'acides aminés.

Qu'en pense Genie ?

Quelle est la vie des animaux transgéniques? Les «transgènes» injectés aux embryons finissent par faire partie de chacune des cellules des animaux adultes. Que se passerait-il si un transgène produisait une protéine étrangère, nocive pour les tissus environnants?

Pour parer à cette éventualité, nous fabriquons des transgènes qui ne s'expriment que dans la glande mammaire, c'est-à-dire dans des tissus qui, naturellement, produisent des protéines et les évacuent. Nous pensons avoir atteint cet objectif dans nos porcs transgéniques : grâce à un promoteur d'un gène du lait, c'est-à-dire une séquence génétique présente chez tous les mammifères qui contrôle l'expression du (ou des) gène(s) situé(s) en aval, nous commandons le lieu de production des protéines thérapeutiques.

Néanmoins, ce contrôle n'est pas parfait, puisque nous avons constaté que les

gènes introduits dans les porcs produisent de petites quantités des protéines étrangères dans les glandes salivaires, dont la composition ressemble beaucoup à celle du tissu mammaire. Nous avons prévu cette production parasite, mais nous sommes convaincus qu'elle est sans conséquence sur le bien-être des porcs.

De toute façon, la fabrication d'animaux transgéniques ne s'imposera que si les animaux ne souffrent pas des gènes humains qu'on leur a introduits et s'ils sont en parfaite santé. Dès lors, les animaux transgéniques qui produisent des protéines humaines présentent l'avantage essentiel de limiter le risque de transmission de maladies aux patients traités ; pour produire des médicaments de qualité et en quantité suffisante, et pour éviter de transmettre quelque agent pathogène inconnu, on doit sélectionner les animaux les plus sains.

Une nouvelle branche de l'industrie pharmaceutique

Jusqu'à l'avènement du génie génétique, une quantité notable de substances d'intérêt pharmaceutique, les protéines, n'étaient pas utilisables, car elles n'étaient pas disponibles. Les protéines ont généralement une structure trop complexe pour être synthétisées par des réactions chimiques. Les seules protéines exploitables provenaient d'extraits d'organes ou de sang d'animaux ou d'hommes. Le génie génétique permet d'isoler des gènes, de les modifier si nécessaire, et de les utiliser pour produire la protéine correspondante. Pour ce faire il faut trouver le moyen de décoder le gène, opération difficile et que seules peuvent réaliser des cellules qui ont l'équipement enzymatique nécessaire. Les bactéries et les levures déjà utilisées pour divers usages sont les cellules les plus aisées à manipuler industriellement. Ces organismes monocellulaires sont aptes à assembler les acides aminés sous la direction du gène étranger qu'elles ont reçu, puisque le code génétique est le même pour tous les organismes vivants. En revanche, les multiples modifications que subissent bon nombre des protéines humaines après leur synthèse ne sont pas assurées par les bactéries ou par les levures, dépourvues des enzymes requises. Les gènes doivent être décodés par des cellules animales, que l'on peut cultiver dans des fermenteurs, tout comme les bactéries et les levures. Ces méthodes sont d'une efficacité limitée.

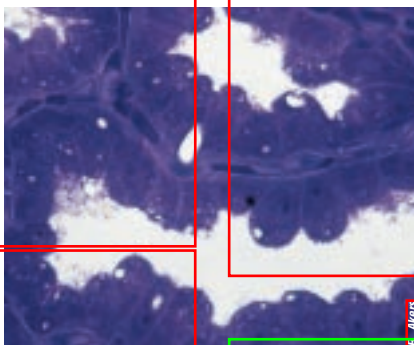
Au contraire, les animaux transgéniques sont des fermenteurs vivants très efficaces et le lait est le fluide biologique à peu près idéal pour recueillir les protéines recombinantes ayant un intérêt pharmaceutique. Dix ans environ après les premiers essais, cette technique atteint les premiers stades de la maturité et le passage à l'échelle industrielle a commencé. Trois protéines préparées à partir du lait sont en cours d'essais cliniques. Plus de dix autres protéines attendent leur tour. Il semble raisonnable d'imaginer que 100, voire 200, protéines seront ainsi produites dans les décennies à venir. Ces protéines seront des facteurs de coagulation, d'autres facteurs sanguins, des hormones, des facteurs de croissance, des antigènes utilisables pour les vaccinations par voie orale ou par injection, ou encore des anticorps.

Aussi prometteurs que soient certains résultats, la méthode rencontre encore de cuisants échecs. La quantité de protéines recombinantes sécrétées dans le lait des animaux transgéniques est parfois très faible sans que l'on sache pourquoi. Pour que les gènes intéressants ne s'expriment que dans la glande mammaire, divers fragments d'ADN doivent se recombiner, mais les gènes obtenus sont parfois peu actifs. De plus, les protéines recombinantes sécrétées dans le lait ne sont pas toutes

sous une forme biologiquement active, car les cellules mammaires ne traitent pas toujours correctement les chaînes qui viennent d'être synthétisées. Enfin, si la synthèse de la protéine recombinante a lieu essentiellement dans la glande mammaire, elle n'est pas toujours strictement restreinte à cet organe. La protéine humaine circule alors dans le sang de l'animal. Or, certaines protéines recombinantes destinées à l'espèce humaine sont parfaitement actives chez l'animal transgénique, et sa santé est alors altérée. Ces imperfections ne seront pas toutes corrigées et constituent les limites à l'utilisation des animaux transgéniques comme fermenteurs vivants.

L'avenir de la méthode paraît assuré même si des systèmes concurrents sont en cours d'élaboration. Ainsi, les bactéries et les levures pourront être génétiquement modifiées et rendues plus aptes à assurer la finition des protéines recombinantes. Les plantes transgéniques, tel le tabac, peuvent produire un kilogramme de protéine comme l'albumine humaine par hectare. Le blanc des œufs de poule sera peut-être un concurrent du lait lorsque l'on

maîtrisera mieux la transgénèse dans cette espèce. Toutefois, les cellules végétales n'assurent pas correctement la finition et notamment la glycosylation des protéines animales. On peut prévoir que, dans les décennies à venir, les différents systèmes de production des protéines recombinantes cohabiteront, chacun assurant ce qu'il sait faire le mieux, au moindre coût.



LE TISSU MAMMAIRE d'une truie transgénique contient un réseau dense de cellules (en violet) qui produisent une protéine humaine thérapeutique. La structure de la glande mammaire permet à la protéine humaine ainsi produite d'être libérée dans les canaux de sécrétion (en blanc) en même temps que les autres composants du lait de l'animal.

La Grande-Bretagne, les États-Unis sont en position dominante dans le domaine de la production de protéines recombinantes. En France, deux équipes de l'INRA maîtrisent la technique. Celle de Jean-Claude Mercier s'intéresse aux modifications de la composition du lait et la nôtre à la production des protéines recombinantes

d'intérêt pharmaceutique. Nous utilisons le promoteur du gène de la protéine acide du lactosérum de lapin. Ce promoteur commande la sécrétion d'hormones de croissance et d'un inhibiteur enzymatique, l'antitrypsine $\alpha 1$, à des concentrations comprises entre 1 et 20 milligrammes par millilitre de lait. Avec une entreprise suédoise, nous avons obtenu des lapins qui expriment le gène de la E-C-superoxyde dismutase humaine, qui a des effets antioxydants. Des lapins produisant l'érythropoïétine humaine (une des hormones qui stimule la croissance des globules rouges) ont également été obtenus, mais la santé des animaux était altérée par la présence de l'hormone. De plus gros animaux, des chèvres, des moutons ou des vaches pourraient produire de la même façon des protéines humaines thérapeutiques. Pour le moment, aucun industriel ne s'est montré intéressé pour exploiter ce savoir-faire.

Louis-Marie HOUDEBINE
Laboratoire de biologie cellulaire et moléculaire – INRA

lisé chez Genie. Après plusieurs mois de travail, nous avons obtenu des souris capables de produire la forme mature de la protéine C dans leur lait. Nous avons alors commencé les travaux qui nous donneront un porc doté des gènes humains de la protéine C et de la furine. Nous espérons avoir bientôt une truie qui produira trois fois plus de protéine C active que Genie.

Perspectives imaginaires

Il y a quelques années seulement, l'idée de fabriquer de grandes quantités de protéines humaines à un coût raisonnable aurait paru fantaisiste : depuis plus de 20 ans, les biologistes moléculaires et les biochimistes s'acharnaient à résoudre les difficultés que pose la production de ces protéines dans des bioréacteurs, et la fabrication de substances biologiques à usage thérapeutique dans de vastes cuves en acier inoxydable contenant des cellules génétiquement modifiées était restée très difficile.

La construction de ces bioréacteurs est très coûteuse, et leur rendement dépend beaucoup de la température et de la composition du milieu où poussent les cellules. Les animaux transgéniques, eux, sont des bioréacteurs que l'on fabriquera par des croisements de parents transgéniques et que l'on élèvera comme n'importe quel animal de ferme : en les protégeant des maladies et en leur donnant à manger, on obtiendra les protéines voulues à des concentrations bien supérieures à celles que l'on obtient dans les bioréacteurs.

Bien que l'on ne puisse exclure le risque que des agents pathogènes ne

se transmettent de l'animal à l'homme, des méthodes rigoureuses permettent d'obtenir des animaux indemnes des maladies répertoriées.

Les protéines humaines ainsi produites devront, comme n'importe quel nouveau médicament, être testées. Les premiers essais cliniques ont commencé, il y a quelques mois, pour une protéine anticoagulante, l'antithrombine III, fabriquée à partir de chèvres transgéniques de la Société Genzyme Transgenics.

Les cellules humaines et les cellules animales n'opèrent pas tout à fait les mêmes modifications post-traductionnelles, ce qui modifie peut-être le fonctionnement et la stabilité des protéines : certaines protéines sanguines sont rapidement dégradées par le foie, de sorte que leur concentration efficace diminue rapidement. On espère que les protéines fabriquées par l'animal, qui n'auront pas subi les mêmes modifications post-traductionnelles, seront dégradées moins rapidement, ce qui augmentera d'autant leur durée d'action.

Si les animaux transgéniques se révèlent finalement un succès du génie génétique, on ne devra pas oublier que ce succès est dû au génie de la nature. La glande mammaire contient de nombreuses cellules capables de produire des protéines thérapeutiques, et elle est bien plus efficace que n'importe quel système de culture cellulaire. En dépit de tous les efforts consacrés au perfectionnement des bioréacteurs industriels, toute une génération de biochimistes n'a pu atteindre, avec cette méthode de fabrication des protéines, les potentialités qu'offre la nature.

William VELANDER est professeur de génie biochimique à l'Institut polytechnique de Virginie. Henryk LUBON travaille au Laboratoire de la Croix-Rouge américaine. William DROHAN dirige le Département des dérivés sanguins, dans ce laboratoire.

Charles T. ESMON, *The Regulation of Natural Anticoagulant Pathways*, in *Science*, vol. 235, pp. 1348-1352, 13 mars 1987.

Rudolf JAENISCH, *Transgenic Animals*, in *Science*, vol. 240, pp. 1468-1474, 10 juin 1988.

Rekha PALEYANDA, Janet YOUNG, William VELANDER et William DRO-

HAN, *The Expression of Therapeutic Proteins in Transgenic Animals*, in *Recombinant Technology in Hemostasis and Thrombosis*, sous la direction de L.W. Hoyer et W.N. Drohan, Plenum Press, 1991.

Tulin MORCOL, Robert M. AKERS, John L. JOHNSON, Barry L. WILLIAMS, Francis C. GWAZDAUSKAS, James W. KNIGHT, Henryk LUBON, Rekha K. PALEYANDA, William N. DROHAN et William H. VELANDER, *The Porcine Mammary Gland as a Bioreactor for Complex Proteins*, in *Recombinant DNA Technology*, vol. 2 : numéro spécial de *Annals of the New York Academy of Science*, vol. 721, pp. 218-233, 2 mai 1994.

Comment les aveugles dessinent

JOHN KENNEDY

Pour dessiner, les aveugles utilisent les mêmes conventions que ceux qui voient. L'analyse des dessins exécutés par les aveugles révèle que le cerveau traite de la même façon des informations provenant de la vue et du toucher.

J'ai rencontré Betty en 1973, lorsque j'interrogeais des candidats à une étude sur la perception par le toucher. Betty, alors adolescente, était aveugle depuis l'âge de deux ans. Comme elle avait perdu la vue avant d'avoir appris à dessiner, je fus étonné qu'elle m'annonce qu'elle aimait dessiner le profil des membres

de sa famille : j'avais toujours pensé que les images étaient des reproductions du monde visible et je pensais que les personnes aveugles avaient peu d'intérêt ou de talent pour créer des images. Betty me montra que je me trompais. Se fiant à son imagination et à son toucher, elle prenait plaisir à dessiner la silhouette reconnaissable des visages.

Était-elle exceptionnelle? Les aveugles peuvent-ils interpréter les symboles graphiques utilisés par ceux qui voient? Les aveugles accèdent à l'univers graphique à l'aide de maquettes, de dispositifs d'affichage à fil et, surtout, d'appareils à dessiner en relief, constitués d'une tablette rigide recouverte d'une couche de



ALBERTO CREMONA

1. DES ARTISTES AVEUGLES se fient à leur toucher pour observer des objets. Tracy, qu'un cancer de la rétine a totalement privée de vision à l'âge de deux ans, détermine la forme d'un verre en le palpan. En tâtant le papier placé sur un support de feutre, elle sait où son stylo

a laissé une marque. Les tracés, dans la plupart des dessins simples, indiquent les contours des surfaces, qui sont aussi facilement repérables par le toucher que par la vision. Les dessins exécutés par les aveugles sont donc aisément reconnus par les personnes voyantes.

caoutchouc et d'une mince feuille de plastique sur laquelle la pression d'un banal stylo à bille trace un sillon. Des études menées grâce à cet équipement ont modifié notre compréhension de la perception sensorielle, montrant qu'aveugles et voyants dessinent souvent de la même façon : ils représentent les limites des surfaces avec des lignes ; ils donnent une impression de profondeur avec des fuyantes qui convergent et des formes de tailles différentes selon leur distance au dessinateur. Les aveugles, comme les voyants, dessinent des paysages à partir d'un point de vue et ils expriment le mouvement par des tracés prolongés ou irréguliers ; ils utilisent aussi des formes symboliques, tels des cœurs ou des étoiles, pour représenter des idées abstraites. Ainsi des représentations, même simples, contiennent bien davantage que ce que l'œil perçoit.

Toucher, c'est voir

Tous les aveugles reconnaissent-ils des profils de visages dont ils ne peuvent palper que les contours ? Avec Yvonne Eriksson, de l'Université de Linköping, nous avons testé neuf adultes, trois hommes et six femmes. Quatre d'entre eux étaient aveugles de naissance, trois avaient perdu la vue après l'âge de trois ans, et deux étaient malvoyants. Chacun devait examiner quatre profils en relief, fabriqués par collage de fils plastifiés sur une tablette métallique plane (voir la figure 3).

Nous leur avons demandé de désigner le caractère principal de chaque silhouette parmi une liste de quatre : sourire, cheveux bouclés, barbe, gros nez. Cinq d'entre eux, dont un homme totalement aveugle de naissance, ont identifié correctement les quatre images, et un seul n'en a reconnu aucune. Le score moyen du groupe a ainsi été de 2,8 sur 4. Un groupe témoin de 18 étudiants voyants à qui l'on avait bandé les yeux eut un résultat à peine meilleur, avec une moyenne de 3,1.

De nombreux travaux, par des équipes de plusieurs pays, confirment que les aveugles reconnaissent les contours d'objets familiers. Comment ceux qui ont toujours été privés de la vue ont-ils acquis une notion de l'apparence qu'ont des visages ou d'autres objets ? Dans des dessins simples, les traits ne correspondent

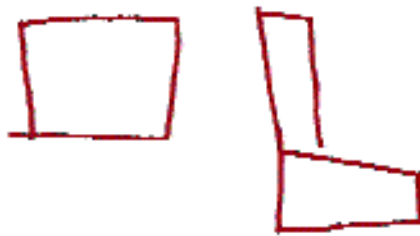
qu'à deux cas : le chevauchement de deux surfaces ou leur jonction suivant un angle. Ni l'un ni l'autre n'ont besoin d'être vus pour être perçus : le toucher suffit.

Tous les aveugles n'interprètent pas aussi bien les dessins en relief ; l'âge auquel ils ont perdu la vue semble déterminer leurs capacités. Des personnes aveugles de naissance ou dès la prime enfance, aveugles précoces, trouvent quelquefois que ces dessins en relief sont une épreuve difficile. En 1993, toutefois, une équipe japonaise a constaté que 60 pour cent des aveugles précoces qu'ils avaient testés savaient reconnaître les contours d'objets courants, tels un poisson ou une bouteille. Le pourcentage de reconnaissance était un peu supérieur pour des sujets voyants aux yeux bandés, qui sont plus habitués aux images.

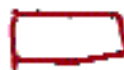
Selon les travaux de Morton Heller, de l'Université Winston-Salem, les sujets qui ont perdu la vue tardivement, les « aveugles tardifs », interprètent les contours en relief avec plus de facilité que les voyants ou que les aveugles précoces. Ils bénéficieraient d'un double avantage : ils sont plus habitués aux images que les aveugles précoces, et ils sont plus habitués que les voyants à utiliser le toucher.

La perspective

Une autre aveugle qui aimait dessiner, Kathy, m'orienta vers un autre problème : la représentation de la perspective. Kathy, qui avait 30 ans lorsque je l'ai rencontrée, était devenue complètement aveugle à l'âge de trois ans, sans avoir jamais eu une vision précise, à cause d'un cancer de

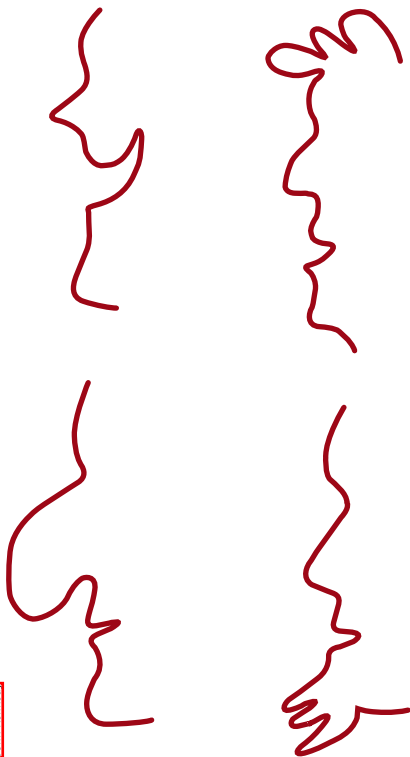


2. LES DESSINS réalisés par Kathy, complètement aveugle depuis l'âge de trois ans, prouvent que les dessinateurs aveugles et voyants se servent des mêmes représentations. Ils utilisent des lignes pour représenter des surfaces, comme le montre le dessin d'un aigle (en haut). Les aveugles représentent les objets, une maison par exemple, à partir d'un seul point de vue (au milieu). Pour faire passer des messages abstraits, les artistes aveugles utilisent des formes : Kathy a dessiné un cœur autour d'un berceau pour exprimer l'amour dont un enfant est entouré. Enfin, ils font appel au rétrécissement pour suggérer la perspective : Kathy a dessiné le bloc en forme de L et le cube en leur donnant la même taille lorsqu'ils étaient côte à côte, mais elle a dessiné le cube plus petit quand il était plus éloigné d'elle (en bas).



KATHY KONIGS

la rétine apparut à moins d'un an. Pourtant elle réalisait des dessins en relief avec une certaine habileté. Notamment Kathy dessina un jour un cube et un bloc en forme de L dans différentes positions relatives. Lorsque les deux objets étaient côte à côte, elle les avait représentés de la même taille, mais lorsque le cube était plus



Lothi Kermach

3. DES PROFILS réalisés avec des fils plastifiés collés sur une tablette métallique ont été proposés à neuf sujets aveugles qui devaient décrire chaque modèle en utilisant l'un des quatre qualificatifs suivants : sourire, cheveux bouclés, barbe ou gros nez. En moyenne, le groupe a identifié correctement 2,8 des quatre profils : les aveugles reconnaissent les contours d'objets simples. Des sujets de contrôle voyants, mais qui avaient les yeux bandés, obtinrent un résultat à peine meilleur.

éloigné que l'autre bloc, elle l'avait dessiné plus petit.

Ce deuxième dessin contenait un principe fondamental de la perspective : un objet est vu sous un angle d'autant plus faible qu'il est plus éloigné (ainsi, les piquets tous identiques d'une barrière qui se prolonge devant nous semblent de plus en plus courts). L'utilisation par Kathy de ce principe m'incita à penser que les aveugles ont des notions de perspective. Là encore, cette étonnante capacité était compréhensible. Après tout, lorsque nous palpons un objet, les articulations de notre corps mesurent des angles, comme ceux que forment les rayons lumineux qui convergent des bords de l'objet vers notre œil.

Pour confirmer cette intuition, nous avons préparé cinq dessins en relief : l'un représente une table et les quatre autres des cubes (*voir la figure 4*). Le dessin de la table est composé d'un carré et de quatre segments (chacun figure un pied) qui partent des sommets. Nous avons montré ces dessins à 24 volontaires, aveugles de naissance, et nous leur avons dit qu'un aveugle avait dessiné la table en disant : «Je l'ai dessinée de cette façon pour montrer qu'elle est symétrique des quatre côtés», et qu'un autre avait dessiné la table de la même façon en fournissant une explication différente : «Je l'ai dessinée vue de dessous pour bien montrer la forme du plateau et des quatre pieds. Si vous montrez la table vue du dessus ou latéralement, vous ne pouvez pas vraiment montrer à la fois le plateau et les quatre pieds.»

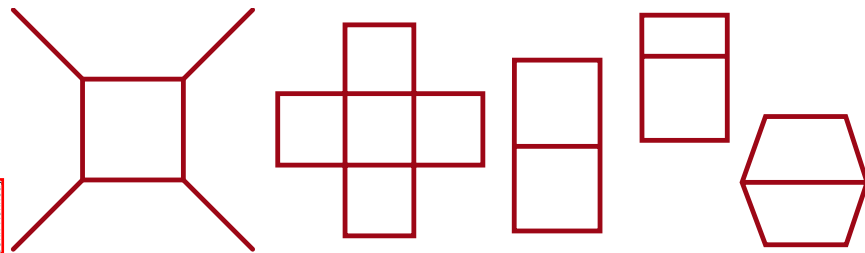
Nous avons alors demandé quel dessin de cube avait été fait par chacun de ces deux dessinateurs. Pour répondre, ils devaient comprendre

quelle stratégie avait été utilisée pour dessiner la table et chaque cube. L'un des cubes ressemble à une boîte dépliée : la face avant du cube est entourée des faces supérieure, inférieure, gauche et droite. Un autre dessin montre deux carrés, les faces avant et supérieure du cube. Un troisième dessin montre un carré pour la face avant du cube, surmonté d'un rectangle pour la face supérieure, comme si le cube était vu de face, d'une faible hauteur. Le quatrième montre deux trapèzes accolés par leur plus grande base, qui est l'arête la plus proche de l'observateur.

En réponse à la question : «Quel cube a été dessiné par la personne qui a montré la table vue de dessous?», la majorité des aveugles ont désigné le dessin aux deux trapèzes, qui fait l'usage le plus élaboré de la perspective, tandis qu'ils jugeaient que le dessin du cube déplié, qui n'utilise pas du tout la perspective, était le moins vraisemblable. De surcroît, ils ont majoritairement pensé que ce dessin avait été fait par la personne qui voulait montrer la symétrie de la table.

Avec M. Heller, pour prouver que les aveugles comprennent et utilisent la perspective, nous avons mis en œuvre un autre test, que le psychologue suisse Jean Piaget appelait «test des trois montagnes» (*vous pouvez le faire vous-même, voir la figure 5*). Sur une table rectangulaire, nous disposions une sphère, un cône et un cube. Les sujets aveugles s'asseyaient toujours du même côté de la table. Nous leur demandions de dessiner les objets vus de là où ils étaient assis, puis d'imaginer comment on les voyait de quatre autres points d'observation : de chacun des trois autres côtés de la table, et du dessus. Beaucoup d'adultes et d'enfants trouvent ce problème difficile. Pourtant les sujets aveugles l'ont aussi bien réussi que des sujets voyants d'un groupe de contrôle : ils ont dessiné correctement en moyenne 3,4 images sur les cinq.

Nous avons ensuite demandé à nos sujets de déterminer le point d'observation de cinq dessins des trois objets ; nous leur avons présenté les dessins deux fois, dans un ordre aléatoire, de sorte que le score maximum était de dix réponses exactes. Les sujets aveugles ont donné 6,7 bonnes réponses, en moyenne, tandis que les sujets voyants obtenaient une moyenne de 7,5, à peine supérieure.



Lothi Kermach

4. LA PERSPECTIVE est une notion qu'ont les aveugles. 24 volontaires aveugles de naissance ont examiné un dessin d'une table (*à gauche*) et quatre dessins d'un cube. On leur avait dit qu'une personne aveugle avait dessiné la table en forme d'étoile pour montrer comment on la voyait de dessous, et qu'une autre personne aveugle l'avait dessinée de façon identique, pour montrer sa symétrie. Ils devaient indiquer celui des dessins de cube qui correspondait à la table vue de dessous. La plupart d'entre eux désignèrent l'image composée de deux trapèzes (*à l'extrême droite*), c'est-à-dire le dessin pour lequel la perspective était la plus élaborée.

Les neuf aveugles tardifs du groupe avaient un peu mieux réussi que les aveugles précoces et que les voyants, atteignant un résultat de 4,2 pour le test de dessin et de 8,3 pour celui de reconnaissance. Là encore, leur bon score provenait sans doute de leur plus grande habitude des images et de leur toucher plus développé.

Figurer le mouvement

Les divers résultats prouvent que les aveugles peuvent utiliser les contours et la perspective pour décrire la disposition d'objets et de surfaces dans l'espace. Les dessins, toutefois, ne sont pas des représentations à la lettre des objets. Ce sont des interprétations. Ainsi, au cours de l'une de mes études, une femme aveugle a dessiné une roue en train de tourner. Je fus stupéfait d'observer que, pour exprimer le mouvement, elle traçait une courbe à l'intérieur du cercle : de telles représentations du mouvement sont une invention récente dans l'histoire de l'illustration. Par exemple, les dessins de Wilhelm Busch, caricaturiste allemand du XIX^e siècle, créateur de Max et Moritz, ne contiennent quasiment aucun tracé exprimant le mouvement avant 1877.

Lorsque j'ai demandé à d'autres sujets aveugles de dessiner une roue en rotation, un symbole a été utilisé à plusieurs reprises : les rayons de la roue étaient des lignes incurvées. Interrogés à propos de ces courbes, ils déclaraient que cette incurvation devait donner une idée du mouvement.

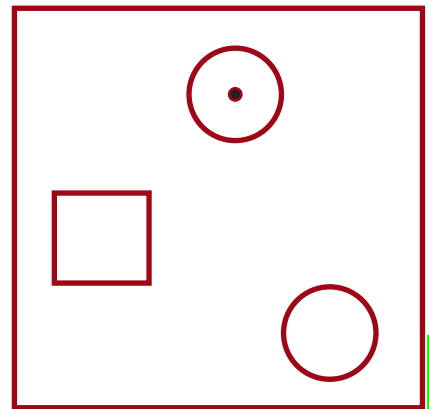
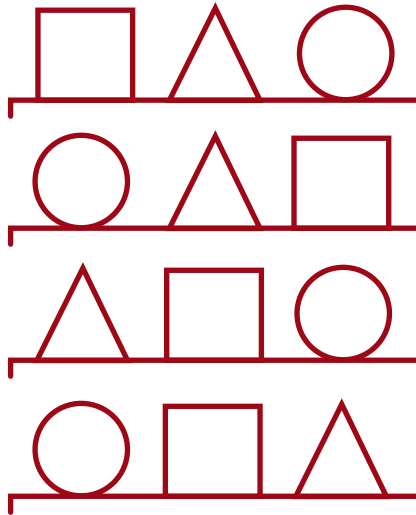
On a le sentiment que le mouvement est bien représenté de cette façon, mais des lignes courbes sont-elles un meilleur indicateur de mouvement que des lignes brisées ou ondulées ? Y a-t-il une convergence sur le sens de différents types de lignes ou celui-ci dépend-il de l'observateur ? Les aveugles et les voyants interprètent-ils de la même façon les lignes exprimant le mouvement ?

Pour le savoir, nous avons dessiné en relief cinq roues différentes, avec des rayons dont les tracés sont respectivement courbés, en lignes brisées, ondulés, en tirets, ou droits et dépassant du périmètre de la roue (voir la figure 6). Nous avons demandé à 18 volontaires aveugles d'attribuer un mouvement à chaque roue : oscillation, rotation rapide, rotation régulière, mouvement saccadé ou freinage.

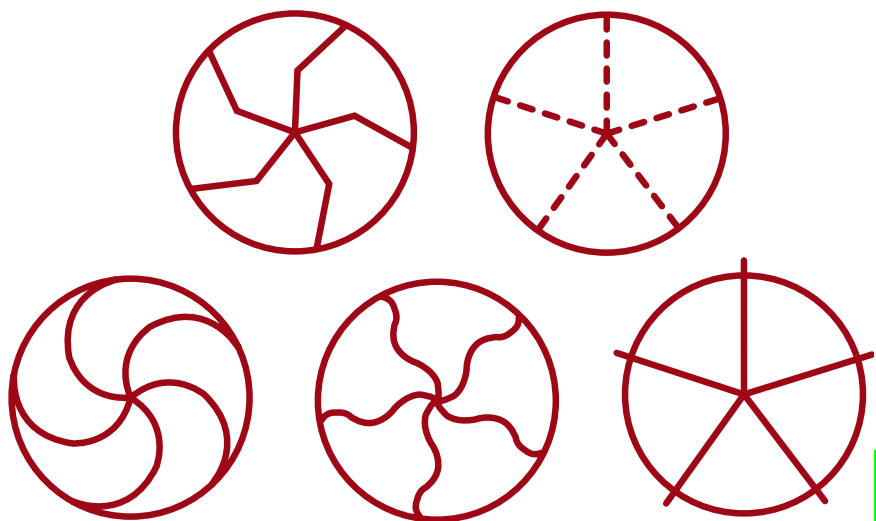
Quelle est la roue qui s'accorde avec chaque mouvement ? Comme les dispositifs en mouvement ne sont pas familiers aux aveugles, cette question était difficile. Tous les sujets aveugles, sauf un, attribuèrent pourtant un mouvement différent à chaque roue. En outre, le choix majoritaire des aveugles était le même que celui du groupe de contrôle formé de voyants. Enfin l'accord était à peine meilleur parmi les voyants que parmi les aveugles.

Les aveugles utilisent aussi d'autres types de symboles visuels. Kathy a dessiné un jour un berceau à l'intérieur d'un cœur : elle a expliqué qu'elle avait choisi ce symbole pour exprimer que l'enfant était entouré d'amour.

Nous avons commencé à étudier la manière dont les aveugles interprètent le symbolisme des formes qui, comme les cœurs, ne représentent pas immédiatement leur sens premier. Nous avons remis à des voyants une liste de 20 paires de mots et nous leur avons



5. ON TESTE LA PERCEPTION de l'espace en disposant une sphère, un cône et un cube sur une table. Le dessin de droite montre cette disposition vue de dessus. Parmi les autres dessins, lequel montre les solides vus du bord de la table qui est en bas ? Quel est celui des dessins qui les montre vus du bord opposé ? Vus du bord situé à gauche ? Situé à droite ? Aveugles et voyants donnent des réponses similaires : c'est la preuve que les aveugles savent déterminer de quelle manière des objets apparaissent de divers points d'observation.



6. LE MOUVEMENT peut être représenté à l'aide de tracés irréguliers. Des volontaires aveugles et voyants auxquels on avait proposé cinq représentations de roues en mouvement les ont interprétées de la même manière. La plupart ont estimé que les rayons courbés correspondent à une roue en rotation régulière ; selon eux, les rayons ondulés suggèrent que la roue oscille, et les rayons en lignes brisées signifient que la roue a un mouvement saccadé. De même, les rayons qui dépassent du périmètre signifient généralement que la roue ralentit, et les rayons en tirets indiquent une rotation rapide.

demandé de sélectionner, dans chaque paire, le mot qui correspond le mieux à un cercle et celui qui correspond le mieux à un carré (voir la figure 7).

Par exemple, nous avons demandé : qu'est-ce qui s'accorde avec «mou»? Un cercle ou un carré? Quelle forme

MOTS ASSOCIES À CERCLE-CARRÉ	ACCORD PARMIL LES RÉPONDANTS (EN POUR CENT)
MOU-DUR	100
MERE-PERE	94
HEUREUX- MALHEUREUX	94
BIEN-MAL	89
AMOUR-HAINE	89
VIVANT-MORT	87
LUMINEUX-SOMBRE	87
LEGER-LOURD	85
CHAUD-FROID	81
ETE-HIVER	81
FAIBLE-FORT	79
RAPIDE-LENT	79
CHAT-CHIEN	74
PRINTEMPS- AUTOMNE	74
CALME-BRUYANT	62
MARCHE-IMMOBILITE	62
IMPAIR-PAIR	57
LOIN-PROCHE	53
VEGETAL-ANIMAL	53
PROFOND- SUPERFICIEL	51

7. DES PAIRES DE MOTS ont été utilisées pour tester le symbolisme qu'expriment les formes abstraites, et vérifier si aveugles et voyants font les mêmes analogies. Dans chaque paire de mots, les participants devaient en associer un au cercle et l'autre au carré. Par exemple, quelle forme décrit le mieux le mot «mou»? Il y eut unanimité pour dire que c'était le cercle. Les pourcentages de la colonne de droite montrent le degré d'accord obtenu avec des participants qui étaient tous voyants. Des sujets aveugles ont fait les mêmes choix.

correspond à «dur»? Pour tous nos sujets, le cercle correspondait à «mou» et le carré à «dur». Pour 94 pour cent d'entre eux, «heureux» était attribué au cercle, et «malheureux» au carré. Pour d'autres paires, l'accord était moins parfait : 79 pour cent ont fait correspondre «rapide» et «lent» au cercle et au carré respectivement, et seulement 51 pour cent ont associé «profond» au cercle et «superficiel» au carré.

Les choix de quatre volontaires complètement aveugles ont été très proches de ceux effectués par les voyants. Un homme, aveugle de naissance, ne s'écarta qu'une seule fois du résultat d'ensemble : comme près de la moitié des voyants, il avait attribué «loin» au carré et «près» au cercle. Les aveugles interprètent donc les formes abstraites de la même manière que les voyants.

Vue, toucher et traitement cérébral

Au total, nos expériences montrent que le toucher peut transmettre une grande partie des informations sur les surfaces et les volumes que nous percevons visuellement. Ce n'est pas très surprenant : quand nous voyons quelque chose, nous savons plus ou moins ce que nous ressentirions au toucher, et réciproquement. Toutefois le toucher et la vue sont deux sens très différents : le premier perçoit des variations de pression, et le second des variations de lumière. Comment ces informations de nature différente conduisent-elles, pour un objet aussi simple qu'une ligne, à la même interprétation par le cerveau? Pour répondre à cette question, nous devons examiner quelles informations nos sens retirent d'un contour.

L'hypothèse la plus évidente est que, sur un dessin, chaque ligne représente la limite physique d'une surface ou d'une forme. Ce n'est pourtant

pas aussi simple, car toutes les lignes, aussi fines soient-elles, ont deux bords. Il en résulte que nous percevons différemment des lignes épaisses et des lignes minces. Quand le tracé d'un profil est assez épais, on voit deux profils qui regardent dans la même direction, un sur chaque bord (voir la figure 8) ; en revanche, lorsque la ligne est mince, nous ne voyons qu'un seul visage. Le toucher procure un effet semblable. J'ai réalisé une série de dessins de profils où les deux bords du tracé étaient en relief. Lorsqu'ils n'étaient écartés que d'un millimètre, une volontaire aveugle ne percevait qu'un seul profil ; lorsque l'écart atteignait huit millimètres, elle percevait deux visages.

Selon une autre théorie, les lignes expriment n'importe quelle frontière perceptible, y compris celles qui ne sont pas réelles, telles les ombres. Cette théorie est contredite par les deux images de la figure 9. À gauche, des ombres, définies par un seul contour épais entre les zones claires et les zones sombres, traversent le visage. Sur l'autre, les mêmes zones d'ombre sont délimitées par des lignes plus fines. Bien que les formes dessinées sur les deux images soient identiques, nous identifions facilement un visage sur la première, pas sur la seconde.

Notre système visuel et notre système tactile ne lisent pas les deux contours d'un trait épais comme un seul trait. La région du cerveau responsable de l'interprétation des contours à partir des informations sensorielles est donc un système général de perception des surfaces. La discrimination qu'elle assure ne repose pas sur des critères purement visuels, tels la brillance ou la couleur, mais prend en compte les deux bords d'un trait épais et les traite comme des indicateurs de la position d'un seul bord d'une surface. Si, pour des personnes voyantes, ce sont des fron-



8. LA PERCEPTION DES CONTOURS dépend de leur épaisseur : selon l'épaisseur, on voit un ou deux profils. La variation est identique dans le cas du toucher. Des sujets aveugles considèrent deux

tracés en relief situés l'un près de l'autre comme un unique contour de surface, ou au contraire comme deux contours distincts s'ils sont éloignés l'un de l'autre.



9. LES OMBRES et les autres frontières immatérielles ne sont pas reconnaissables seulement à leurs contours. À gauche, un seul trait noir épais représente les ombres : nous reconnaissons un visage. Ce n'est pas le cas sur le dessin de droite, où les mêmes formes sont dessinées par des contours fins.

tières de brillance qui sont traitées comme des indicateurs de limite de surfaces, pour les aveugles ce sont les frontières de pression qui sont traitées de la même façon.

Les principes qui sont ici en jeu ne sont pas seulement visuels : la région du cerveau qui les accomplit pourrait donc être qualifiée d'amodale. Un tel système amodal reçoit à la fois des informations visuelles et tactiles et les considère comme des informations relatives à des caractéristiques telles que recouvrement, avant-plan, arrière-plan, surfaces planes ou courbes, et points de perspective. Chez les voyants, les signaux visuels et les signaux tactiles sont coordonnés par ce système amodal.

Ce système reste capable d'interpréter les limites des surfaces même lorsqu'il ne reçoit aucun signal visuel. C'est pour cette raison que les aveugles savent identifier des dessins et des symboles graphiques. Cette découverte devrait encourager les spécialistes et les éducateurs à mettre au point pour les aveugles des systèmes utilisant des images. Plusieurs organismes sont sur cette voie. Par exemple, Éducation artistique des aveugles, une organisation associée au Musée Whitney d'art américain et au Musée d'art moderne de la ville de New York, a réalisé des versions en relief de tableaux d'Henri Matisse et d'œuvres de l'art des cavernes. Les images en relief seront-elles bientôt aussi répandues que les textes en braille?

John KENNEDY est professeur de psychologie à l'Université de Toronto.

Y. HATWELL, *Toucher l'espace. La main et la perception tactile de l'espace*, Presses universitaires de Lille, 1986.

M.A. HELLER, *Picture and Pattern Perception in the Sighted and the Blind : The Advantage of the Late Blind*, in *Perception*, vol. 18, n° 3, pp. 379-389, 1989.

J.M. KENNEDY, *Drawing and the Blind : Pictures to Touch*, Yale University Press, 1993.

J.M. KENNEDY et Y. ERIKSSON, *Profiles and Orientation of Tactile Pictures*, European Psychology Society, Tampere, 2-5 juillet 1993.

C.H. LIU et J.M. KENNEDY, *Symbolic Forms and Cognition*, in *Psyke & Logos*, vol. 14, n° 2, pp. 441-456, 1993.

Y. SHIMIZU, S. SAIDA et H. SHIMURA, *Tactile Pattern Recognition by Graphic Display : Importance of 3-D Information for Haptic Perception of Familiar Objects*, in *Perception and Psychophysics*, vol. 53, n° 1, pp. 43-48, janvier 1993.

A.B. SAFRAN et A. ASSIMACOPOULOS, *Le déficit visuel. De la neurophysiologie à la pratique de la réadaptation*, éditions Masson, 1995.

D. BURGER, *New Technologies in the Education of the Visually Handicapped*, éditions INSERM - John Libbey Eurotext, 1996.

Les réfrigérateurs d'Einstein et de Szilard

GENE DANNEN

Dans les années 1920, deux physiciens théoriciens visionnaires unirent leurs efforts pour perfectionner les réfrigérateurs domestiques.

En juillet 1939, Leo Szilard rendit visite à Albert Einstein, à Long Island, pour discuter des dangers de la bombe atomique. Szilard s'alarmait de la découverte de la fission de l'uranium et de la possibilité de «réactions en chaîne» qu'il avait observée six ans auparavant. Einstein fut persuadé de la faisabilité des armes atomiques et inquiet d'une utilisation éventuelle de telles armes par l'Allemagne nazie ; c'est pourquoi il écrivit à Franklin Roosevelt une lettre célèbre, qui exhortait le président des États-Unis à augmenter les efforts de recherche.

Avec cette visite à Einstein, Szilard renouait une collaboration qui datait de l'âge d'or de la physique à Berlin. On a parfois avancé que Szilard et Einstein avaient déposé de nombreux brevets communs pour des réfrigérateurs domestiques sans pièces mobiles, dans les années 1920, mais on avait peu d'informations sur ces brevets. Intéressé par la vie de Szilard, j'ai retrouvé l'histoire détaillée de cette collaboration. À Stockholm, par exemple, le fabricant d'appareils électroménagers *Electrolux* possédait les dossiers de deux brevets déposés par Einstein et par Szilard. Et, à Budapest, l'ingénieur Albert Korodi conservait des souvenirs précieux de l'entreprise. Récemment décédé, à l'âge de 96 ans, Korodi avait conservé des copies des rapports techniques – y compris les seules photographies connues des prototypes d'Einstein et de Szilard – qu'on a longtemps crus perdus. Ces sources, la correspondance de Szilard conservée à l'Université de San Diego et les archives sur Einstein conservées à l'Université hébraïque de Jérusalem révèlent com-

bien Einstein et Szilard furent proches. Leur projet était plus vaste, plus lucratif et techniquement plus ambitieux qu'on ne l'imaginait. Einstein apparaît sous un jour nouveau, avec des préoccupations d'application des sciences.

Les débuts d'une collaboration

Szilard et Einstein s'étaient rencontrés à Berlin en 1920. Einstein, alors âgé de 41 ans, était déjà le physicien le plus célèbre du monde. Szilard, âgé de 22 ans, était un étudiant bulgare brillant, qui préparait sa thèse de physique à l'Université de Berlin ; il parvint notamment à étendre la thermodynamique classique à des systèmes fluctuants, appliquant la théorie d'une façon qu'Einstein avait jugée impossible. Impressionné, le «Herr Professor» se prit d'amitié pour son cadet. Après la soutenance de thèse, Einstein conseilla à Szilard d'entrer à l'Office des brevets : «Ce n'est pas une bonne chose pour un scientifique de dépendre de la ponte d'œufs en or. Je n'ai jamais été aussi heureux que lorsque je travaillais à l'Office des brevets.» Pourtant Szilard choisit de faire carrière à l'Université, où il résolut bientôt le problème du démon de Maxwell : ce petit diable, imaginé par James Clerk Maxwell, semblait violer le deuxième principe de la thermodynamique en triant les molécules lentes et rapides, déjouant leur tendance naturelle au désordre ; il alimentait alors en énergie une machine à mouvement perpétuel. Szilard démontra que le démon ne pouvait fonctionner comme Maxwell l'avait imaginé, parce que l'ordre gagné

nécessitait de l'information. Son idée devait ultérieurement devenir la base de la théorie de l'information.

À la fin de 1924, le physicien Max von Laue (prix Nobel en 1914) proposa à Szilard un poste d'assistant à l'Institut de physique théorique. À cette époque, Szilard était devenu un visiteur habituel de la maison d'Einstein. Les deux hommes étaient très diffé-



1. LE CHASSIS DU RÉFRIGÉRATEUR (au centre), vu de l'arrière, attend l'installation de la pompe électromagnétique inventée par Leo Szilard (à gauche)

rents : Szilard était extraverti et sûr de lui (certains le disaient arrogant) ; Einstein était modeste et renfermé. Cependant, sur les points les plus importants, ils étaient parfaitement d'accord. Ils partageaient le plaisir du maniement des idées, une forte conscience politique et un goût immodéré de l'invention.

Selon le physicien Bernard Feld, qui avait recueilli quelques anecdotes de Szilard lui-même, le projet de réfrigérateur était né d'un article de journal qui avait rapporté qu'une famille entière – les parents et plusieurs enfants – avait été tuée dans son sommeil par une fuite de gaz toxiques provenant de la pompe du réfrigérateur. À cette époque, de tels accidents étaient de plus en plus nombreux, car les réfrigérateurs électromécaniques remplaçaient progressivement les traditionnelles glaciers. L'industrie chimique n'avait pas encore trouvé de réfrigérant non toxique : les trois fluides les plus utilisés étaient le chlorure de méthyle, l'ammoniac et le dioxyde de soufre, en quantités suffisantes pour tuer.

Einstein fut affligé par l'accident : «Il doit exister un meilleur moyen que la compression et la détente de ces gaz toxiques», dit-il à Szilard. Les deux physiciens conclurent que le problème ne se limitait pas aux fluides réfrigérants ; des fuites par les roulements et par les joints étaient inévitables dans des systèmes ayant des pièces mobiles.

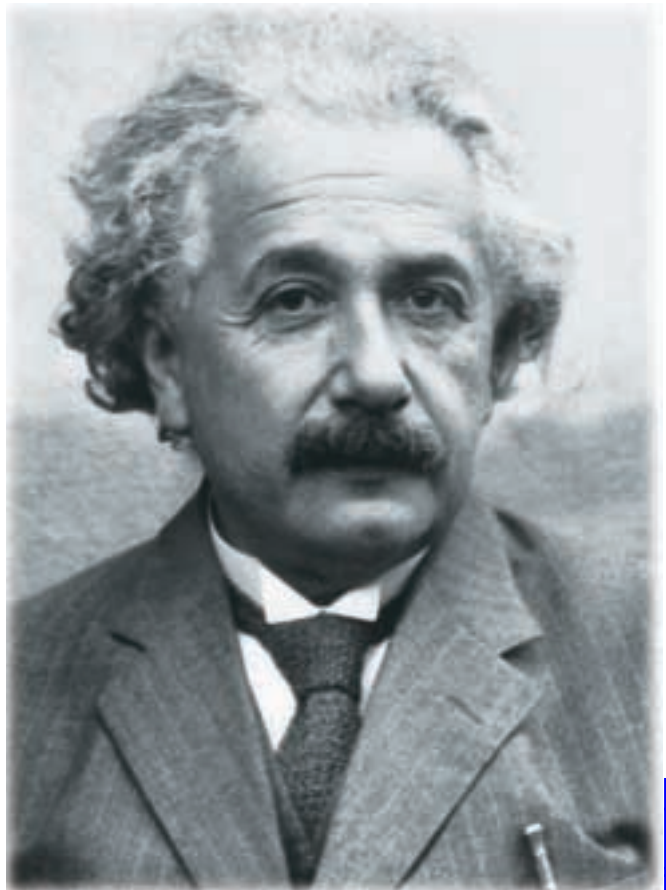
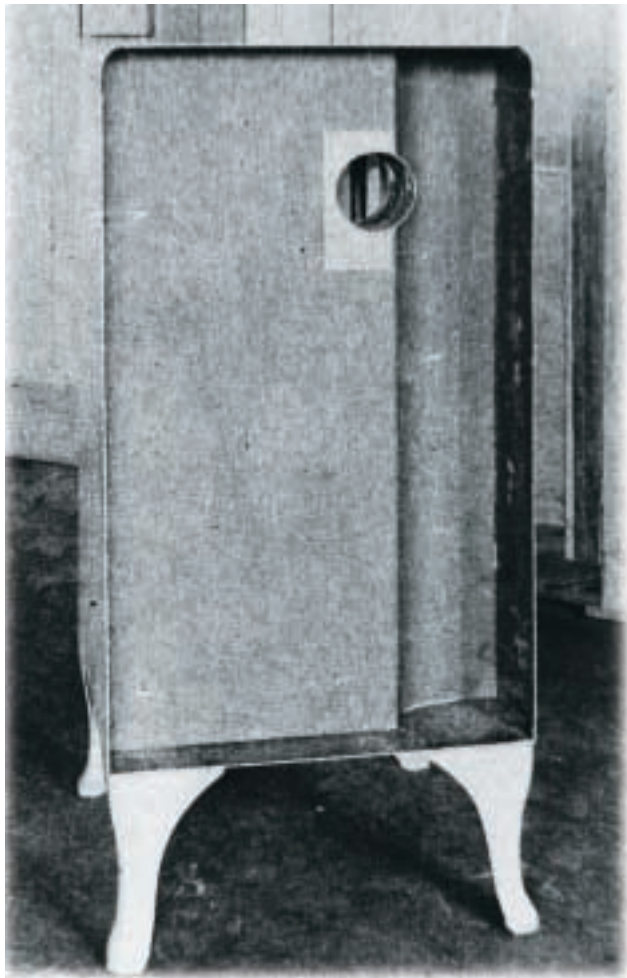
Cependant la thermodynamique permettait d'imaginer plusieurs moyens de produire un refroidissement sans mouvement mécanique. Pourquoi ne pas les mettre en application ? Ce travail aurait, en outre, l'avantage d'aider Szilard, qui, en cet hiver de la fin 1925, préparait son dossier de candidature au professorat, position où, en Allemagne, on devait se contenter de maigres honoraires recueillis auprès des étudiants (tandis qu'il recevait un salaire, tant qu'il était assistant). Les inventions, si elles aboutissaient, faciliteraient les débuts de Szilard.

Désireux d'aider son ami, Einstein accepta une collaboration : une lettre de Szilard à Einstein fixe les conditions

de leur accord. Toutes les inventions de l'un ou de l'autre, dans le domaine de la réfrigération, seraient propriété commune. Szilard serait le premier bénéficiaire si son revenu était inférieur au salaire d'un assistant universitaire ; sinon toutes les redevances seraient réparties à parts égales.

Premières ébauches

Dans les années 1920 comme aujourd'hui, la plupart des réfrigérateurs utilisaient des compresseurs électromécaniques qui liquéfiaient le fluide réfrigérant par compression ; puis, lors de la détente, la vaporisation absorbait la chaleur d'un compartiment intérieur. Einstein et Szilard considéraient que des réfrigérateurs à absorption seraient plus sûrs que ces modèles à compression et à détente. Dans un réfrigérateur à absorption, la chaleur issue de la combustion du gaz naturel alimente le cycle de refroidissement. Un système de ce type avait été inventé par les Suédois Baltzar von Platen et Carl Munters ; il était commercialisé par la Société AB Electrolux. Szilard l'améliora.



et par Albert Einstein (à droite). Le réfrigérateur, mis au point au Centre de recherches de la Société A.E.G., à Berlin, ne fut jamais commercialisé, en partie à cause de la crise économique de la fin des années 1920.

Mieux encore, avec Einstein, il trouva plusieurs conceptions nouvelles. Einstein ayant exercé la profession d'examineur de brevets, ils purent éviter les habituels officiers de brevets et, au début de 1926, Szilard commença de remplir une série de demandes de brevets pour leurs inventions. À l'automne, ils s'étaient décidés sur les trois concepts les plus prometteurs. Chaque type était fondé sur un concept physique particulier : l'absorption, la diffusion et l'électromagnétisme.

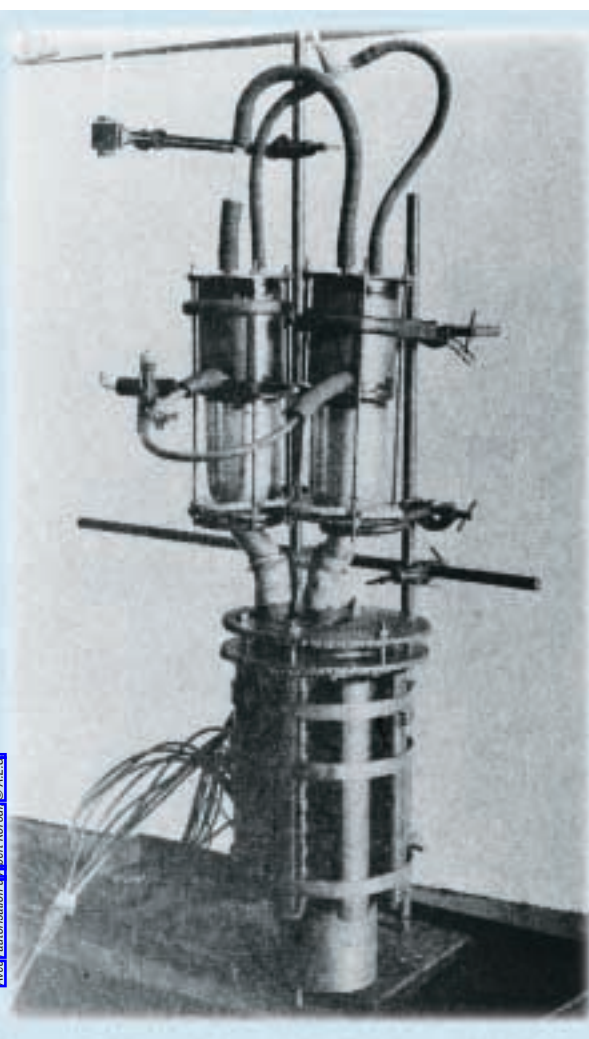
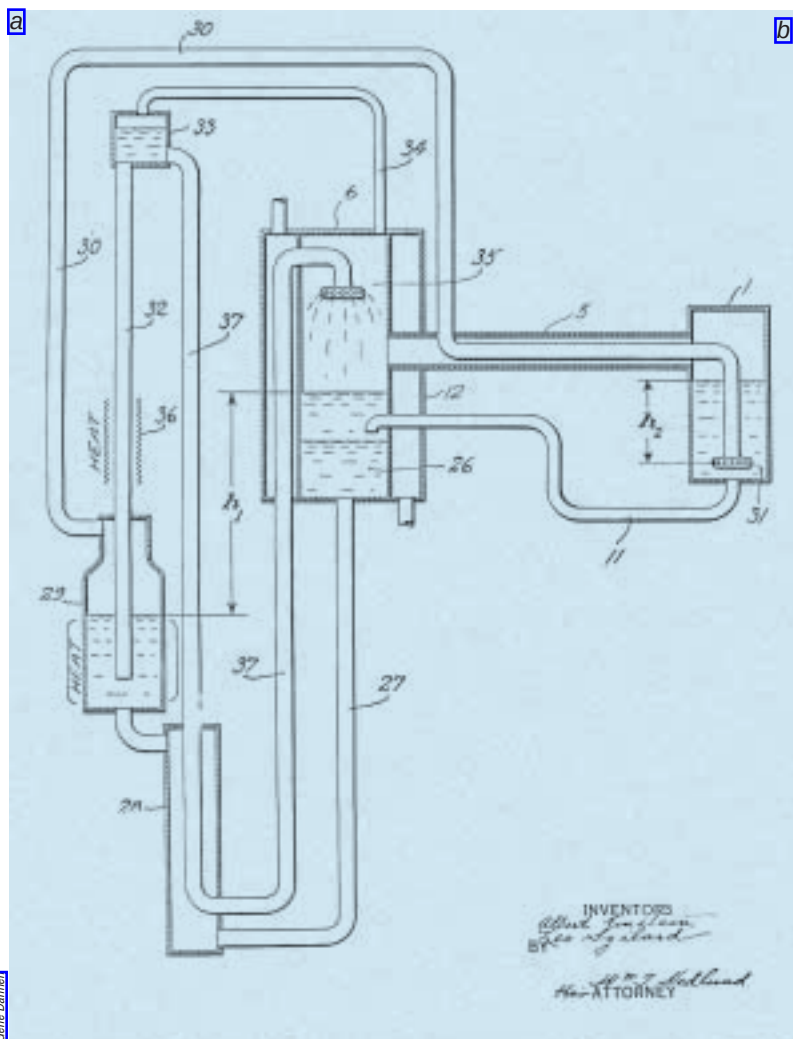
Dans une lettre à son frère Bela, écrite en octobre, Szilard décrivait leurs progrès : «Les demandes de brevets pour les réfrigérateurs, que j'ai déposées avec le professeur Einstein, sont maintenant si avancées qu'il est sans doute temps de prendre des contacts avec l'industrie. Les trois machines fonctionnent sans pièces mobiles et

sont hermétiquement scellées [...] L'une des trois est presque identique à l'un des appareils de la Société *Electrolux* (la meilleure actuellement, à mon avis) [...] Les deux autres sont complètement différentes de toute machine actuellement connue.»

Szilard négocia rapidement un contrat avec la Société *Bamag-Megu*, un gros fabricant d'équipements fonctionnant au gaz et dont les usines se trouvaient à Berlin et à Anhalt. À la fin de 1926, il commença à superviser la mise au point de prototypes dans les laboratoires de l'Institut de technologie de Berlin. Albert Kornfeld, un Hongrois qui travaillait au Laboratoire de génie électrique de l'Institut, participa au travail (Kornfeld se fit ultérieurement appeler Korodi, nom que j'utiliserai dans toute la suite). En 1916, il avait remporté le prix Eötvös, la pres-

tigieuse compétition hongroise de mathématiques ouverte aux étudiants âgés de 18 ans. Après avoir rencontré Szilard lors de cette compétition, Korodi avait étudié avec lui à l'Université technique de Budapest. Plus tard, il avait suivi Szilard à Berlin où, vivant dans le même immeuble, ils devinrent bientôt des amis intimes.

Malheureusement, l'accord passé avec la Société *Bamag-Megu* dura moins d'un an. «*Bamag-Megu* avait des difficultés, à cette époque. Je pense qu'ils ont abandonné tous les projets incertains», se souvient Korodi. Toutefois, moins de quelques mois plus tard, les deux physiciens passèrent de nouveaux accords avec deux autres sociétés, l'une suédoise et l'autre, allemande. La société suédoise était *AB Electrolux* : le 2 décembre 1927, la Division des systèmes réfrigérants *Platen-*



2. EINSTEIN ET SZILARD mirent au point plusieurs réfrigérateurs qui fonctionnaient selon des principes différents. Un système à absorption (a), vendu à la Société *AB Electrolux*, utilisait une source de chaleur et une combinaison de fluides pour faire circuler du butane dans un circuit complexe. Initialement liquide, le butane se vapori-

sait en présence d'ammoniac dans la chambre 1 de réfrigération (sur la droite), captant de la chaleur. Le mélange gazeux passait ensuite dans la chambre 6 (au centre), où l'eau absorbait l'ammoniac, libérant du butane liquide qui était recyclé. La pompe électromagnétique (b) mise au point par la Société *A.E.G.* poussait un

Munters du groupe *Electrolux*, à Stockholm, acheta le brevet du réfrigérateur à absorption pour la somme de 3150 reichsmark. Les deux parties étaient satisfaites de la transaction : les dossiers de la Société *Electrolux* montrent qu'elle considérait le prix d'achat comme «très faible» ; néanmoins Szilard et Einstein touchèrent environ 55 000 francs d'aujourd'hui.

La demande d'un brevet américain pour le réfrigérateur à absorption causa l'étonnement de l'officier des brevets chargé du dossier : «Je serais curieux de savoir si cet Albert Einstein est la même personne qui a proposé la théorie de la relativité, déclara-t-il. Dans ce cas, l'Office des brevets ne devrait pas être gêné par la double citoyenneté suisse et allemande du demandeur, car le dictionnaire indique, sous la rubrique «einsteinienne», la définition : «relatif

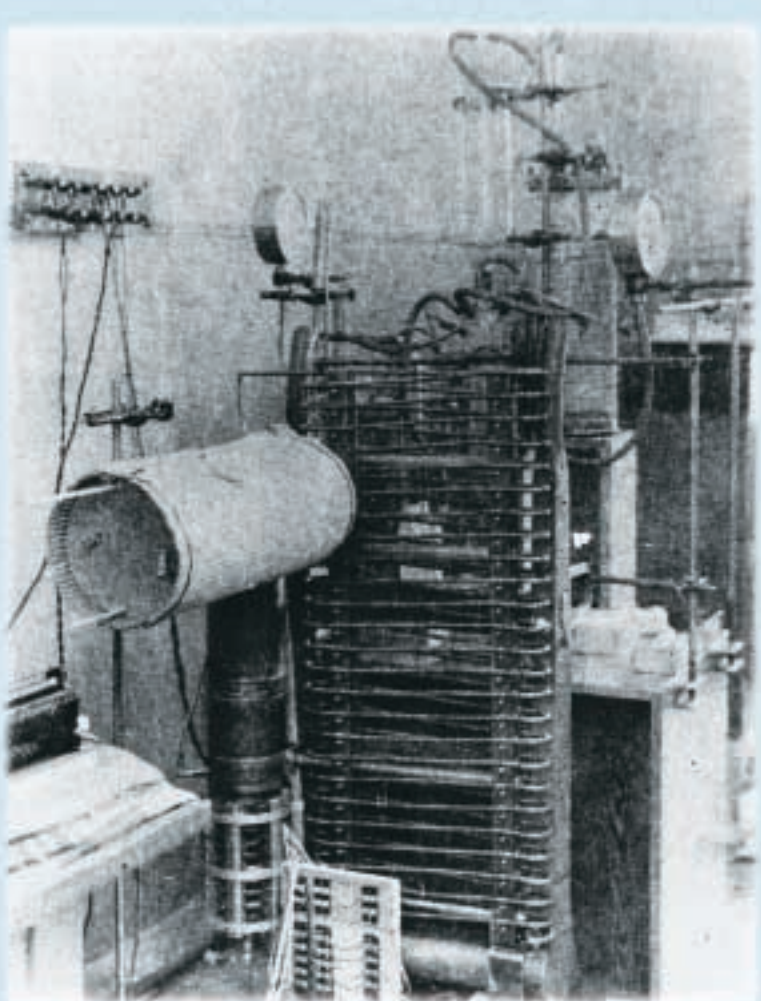
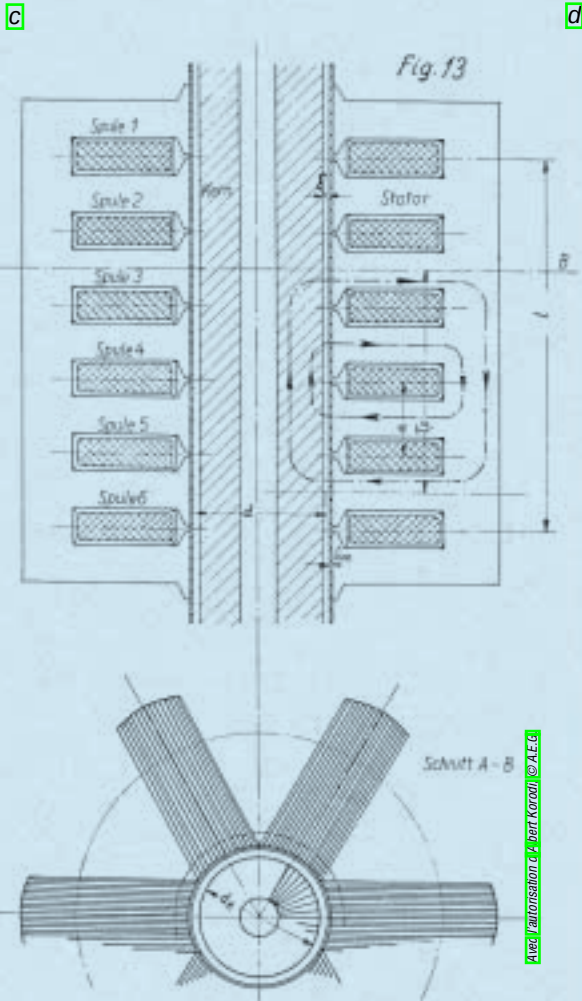
à la théorie de la relativité, vient du nom d'Albert Einstein, un citoyen à la fois de Suisse et d'Allemagne». Avec cette désignation dans l'un des dictionnaires agréés, je crois que l'Office des brevets devra admettre que le professeur Einstein est un citoyen de deux pays différents.»

Ultérieurement, la Société *Electrolux* acheta aussi le projet de réfrigérateur à diffusion ; toutefois, le brevet qu'elle prit sur l'invention ne mentionne ni Einstein ni Szilard, et elle ne réalisa jamais aucun des deux appareils présentés dans les brevets déposés. Les archives indiquent qu'en dépit de l'admiration pour leur ingéniosité, la Société *Electrolux* acheta surtout les idées afin de protéger ses propres appareils.

Une autre invention d'Einstein et de Szilard, très différente des précédentes, conduisit à un partenariat avec

la Société *Citogel*, de Hambourg. Selon Korodi, Einstein fit cette invention parce qu'il ne se satisfaisait pas des systèmes à absorption, trop complexes : «Il proposa un système assez simple et peu coûteux, particulièrement adapté aux petits réfrigérateurs. Le dispositif était un petit refroidisseur à immersion qui pouvait être plongé, par exemple, dans un verre afin de refroidir son contenu. Il tirait toute son énergie de la pression de l'eau du robinet : une trompe à vide faisait le vide dans un compartiment d'où l'eau et une petite quantité de méthanol s'évaporaient. Le méthanol s'épuisait lentement, mais ce composé était bon marché et facile à fabriquer.

Ce refroidisseur fonctionnait si bien qu'un prototype fut exposé par la Société *Citogel* à la Grande Foire de Leipzig, au début de 1928. Korodi,



métal liquide à travers un cylindre. Le plan (c) montre le cylindre en coupe longitudinale (en haut) et transversale (en bas). Un courant alternatif circulant dans les bobines (disposées comme les rayons d'une roue) engendrait une induction électromagnétique qui guidait le liquide, lequel agissait comme un piston qui comprimait le réfi-

gérant. L'assemblage réfrigérant presque complet qui figure à droite (d) utilisait un alliage de potassium et de sodium (la pompe est le cylindre vertical sombre dans le bas) et du pentane comme réfrigérant. L'ensemble des serpentins condenseurs avait la même fonction que dans les réfrigérateurs modernes.

qui partit à Hambourg pour perfectionner l'invention, se souvint que Szilard attendait impatientement d'éventuelles retombées. Toutefois le méthanol acheté au détail était plus coûteux que prévu et, pis encore, le système ne fonctionnait pas quand l'eau était délivrée par le système de distribution allemand, rudimentaire à l'époque : la pression de l'eau du robinet variait selon les bâtiments et, même, selon les étages. Finalement, les imperfections du réseau de distribution d'eau eurent raison de l'invention, qui ne fut pas commercialisée.

La pompe Einstein-Szilard

L'invention la plus révolutionnaire, et la plus fructueuse, était ce qui fut ultérieurement nommé la pompe électromagnétique Einstein-Szilard. C'était une pompe parfaitement fonctionnelle sans pièces mobiles ; un champ électromagnétique variable provoquait la circulation d'un métal liquide, qui était utilisé comme piston pour comprimer le réfrigérant (le cycle de réfrigération était ensuite le même que dans les réfrigérateurs ordinaires).

Korodi se rappelait qu'Einstein et Szilard avaient initialement imaginé une pompe à conduction élec-

trique, avec un courant électrique passant dans le métal liquide. Le mercure était le métal initialement choisi, mais les deux physiciens avaient calculé que sa faible conductivité conduirait à de médiocres rendements. Aussi Szilard avait plutôt proposé un alliage de potassium et de sodium, de conductivité bien supérieure : bien que le sodium et le potassium soient tous deux solides à température ambiante, un mélange optimal des deux est liquide aux températures supérieures à -11 degrés. Cependant les métaux étaient chimiquement corrosifs, de sorte qu'ils auraient attaqué l'isolant des fils électriques conduisant le courant.

Szilard et Korodi cherchèrent alors d'autres alliages, avant de soumettre le problème à Einstein : après avoir réfléchi quelques minutes, ce dernier proposa d'éliminer les fils en appliquant une force indirecte, induite par des bobines extérieures. L'invention devint alors une pompe à induction.

Korodi, qui calcula l'efficacité théorique de la pompe à l'alliage sodium-potassium, trouva qu'elle était bien inférieure à celle des compresseurs ordinaires, mais ce qu'elle perdait en efficacité, elle le gagnait en fiabilité : cela valait la peine de construire un prototype. À l'automne 1928, la Société A.E.G. (*Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft*) accepta de mettre au point la pompe pour la réfrigération. La Société A.E.G. était une firme prospère de Berlin, qui possédait son propre institut de recherche, où elle ouvrit pour l'occasion un département spécial, avec deux ingénieurs à plein temps : Korodi fut engagé pour résoudre les problèmes électriques, tandis qu'un autre ingénieur hongrois, un ami de

Szilard, nommé Lazislas Bihaly, fut chargé de la partie mécanique. Szilard, au titre de consultant, dirigeait l'équipe. Korodi et Szilard recevaient des salaires mensuels de 500 reichsmark, soit la moitié du prix d'une automobile.

Pour Szilard, le contrat avec la Société A.E.G. était encore plus lucratif, car les redevances du brevet, ajoutées aux honoraires de consultation, portaient finalement son revenu annuel à quelque 200 000 francs actuels. Szilard et Einstein ouvrirent un compte bancaire commun, mais les sommes qu'accepta Einstein restent inconnues. Ce dernier se préoccupait activement du projet : il vint au laboratoire à chaque étape de la mise au point des prototypes.

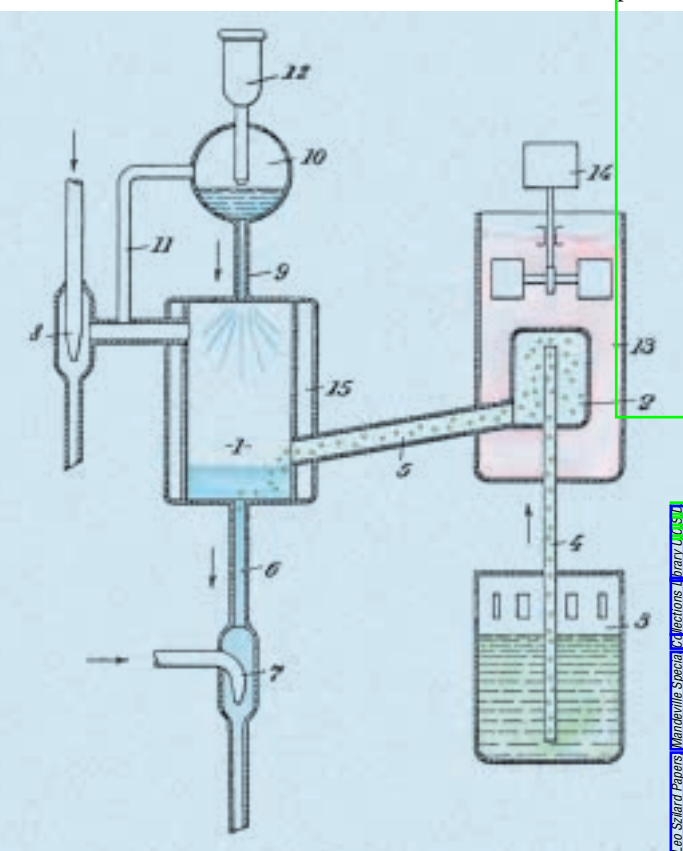
Korodi se souvient également d'avoir rendu visite une dizaine de fois à Einstein dans son appartement de Berlin en compagnie de Szilard, pour discuter de nouvelles inventions : il n'a jamais parlé de physique avec Einstein, tandis que Szilard produisit de nombreux articles cosignés avec Einstein et qui montrent une collaboration prolongée.

À l'Université de Berlin, Szilard donnait des séminaires de physique quantique et de physique théorique, aux côtés de John von Neumann et d'Erwin Schrödinger. Durant cette période, il inventa notamment l'accélérateur linéaire, le cyclotron et le microscope électronique, pendant qu'Einstein recherchait sans relâche une théorie unifiée des champs et qu'il inventait un gyroscope et un appareil de correction auditive.

Alors que le réfrigérateur progressait, le drame se préparait : lors des élections du Reichstag, le 14 septembre 1930, le minuscule parti nazi recueillit près de 20 pour cent des votes. Le 27 septembre, Szilard adressa un avertissement prophétique à Einstein : « De semaine en semaine, je détecte de nouveaux signes, si mon nez ne me trompe pas, qu'il ne faut pas escompter un développement [politique] paisible de l'Europe au cours des dix prochaines années [...] Je ne sais pas s'il nous sera possible de construire notre réfrigérateur en Europe. »

Un réfrigérateur fonctionnel

Encore récemment, on ne se souvenait que du bruit gênant du prototype de pompe électromagnétique d'Einstein-Szilard : la pompe était le siège



3. LA PRESSION DE L'EAU du robinet devait actionner ce petit système réfrigérant, construit (après simplification) par la Société *Citögel*, à Hambourg. Le méthanol contenu dans la chambre 3 s'évaporerait dans la chambre 2, refroidissant le compartiment 13 qui l'entourait. La turbine 14 délivrerait de la crème glacée ou tout autre aliment glacé. Le méthanol, qui se dissolvait dans l'eau de la chambre 1, devait être progressivement remplacé. Le dispositif ne fut pas commercialisé, parce que la pression d'eau fluctuait trop dans les immeubles allemands, vers 1930.

d'un phénomène de cavitation, des bulles vides se créant et implosant quand le liquide métallique traversait la pompe. Le physicien Denis Gabor, qui était l'un des meilleurs amis de Szilard à Berlin, rapporta plus tard que la pompe «hurlait comme un charcal». Un autre «témoin auditif» mentionna qu'elle «gémissait comme une sorcière». Korodi, lui, admettait qu'elle faisait un bruit d'eau turbulente. Un rapport final de la Société A.E.G. signale que le bruit dépendait de la force et de la vitesse de la pompe ; quelques modifications, telle une réduction de la tension appliquée au début de chaque course du piston, finirent par réduire le bruit à un niveau acceptable. Ce problème sonore était pourtant mineur : il ne doit pas faire oublier que les ingénieurs avaient réussi à imaginer l'emploi de métaux chimiquement réactifs. Un équipement spécial permettait de remplir la pompe sans oxydation (potentiellement explosive) du sodium et du potassium ; selon Korodi, le réfrigérateur aurait été sans danger, car les métaux liquides étaient enfermés dans un réservoir d'acier inoxydable soudé. De nombreux problèmes avaient été résolus, à l'exception de celui du bruit, quand le premier prototype complet fut construit, après deux ans d'études : le 31 juillet 1931, un réfrigérateur Einstein-Szilard fonctionna en continu au Centre de recherche de la Société A.E.G.

À des fins de comparaison avec les appareils existants, il fut monté dans le châssis d'un réfrigérateur de 120 litres, modèle G40 d'A.E.G. Avec son alliage liquide sodium-potassium et du pentane comme fluide réfrigérant, il consommait 136 watts seulement : l'efficacité était conforme aux calculs, mais la Société A.E.G., affaiblie par la dépression mondiale, jugea ces performances insuffisantes. De surcroît, les améliorations des réfrigérateurs classiques et l'effondrement économique rétrécissaient le marché potentiel ; notamment, le fréon, qui venait d'être présenté aux États-Unis, éliminait le danger des fuites (c'est bien après que l'on a compris que le fréon et les autres chlorofluorocarbures détruisaient l'ozone de la haute atmosphère).

Le travail se poursuivit toutefois pendant un an au Centre de recherches A.E.G., les ingénieurs améliorant les prototypes de pompe, dont ils changèrent le métal liquide : comme



4. ALBERT KORODI (1898-1995) fut chargé par Szilard de mettre au point les prototypes de réfrigérateurs inventés avec Einstein. Il tient dans ses mains le prix Tivadar Puskás de la Société scientifique hongroise des télécommunications, qu'il reçut en 1993.

l'échauffement interne de la pompe était suffisant pour fondre du potassium pur (la température de fusion est de 63 degrés), ils augmentèrent l'efficacité électrique de 16 à 26 pour cent. Toutefois, la Société A.E.G., ravagée par la crise économique, ne voulut pas poursuivre les études. Szilard essaya d'intéresser des constructeurs britanniques et américains, mais sans succès. Puis, en 1932, le Centre de recherches d'A.E.G. fut réduit de moitié, et tous les projets qui n'étaient pas stratégiques furent éliminés. Korodi aida à rédiger le rapport final de 104 pages sur le développement du réfrigérateur Einstein-Szilard : ce document intitulé *A.E.G. Technischer Bericht 689*, fut achevé le 16 août 1932 (l'original fut détruit pendant la Seconde Guerre mondiale, mais Korodi en avait gardé une copie).

Quelques mois après, l'accession d'Adolf Hitler au poste de chancelier marqua la fin de l'âge d'or de la physique à Berlin. Szilard s'envola pour l'Angleterre, puis pour l'Amérique, tandis qu'Einstein trouvait refuge à l'Institut des études avancées de Princeton. Korodi retourna à Budapest, où il trouva du travail à la Division hongroise de la Société Philips, s'intéressant aux télécommunications ; il mourut à Budapest le 28 mars 1995.

Physique appliquée

Pendant leurs sept années de collaboration, Szilard et Einstein remplirent plus de 45 demandes de brevets dans six pays. Aucun de leurs réfrigérateurs ne fut finalement commercialisé, mais leurs systèmes étaient d'ingénieuses applications de principes physiques. La pompe Einstein-Szilard était si intéressante et sûre qu'elle fut employée au refroidissement des surrégénérateurs.

Toutes ces inventions permirent à Szilard de faire la carrière universitaire qu'il souhaitait, en Allemagne ; puis ses économies lui permirent de rester deux années de plus en Angleterre. Grâce à des collègues qui aidaient les scientifiques réfugiés à trouver des emplois à l'université, il en vint à étudier la physique nucléaire et conçut la réaction en chaîne à l'automne 1933. Ainsi les travaux de Szilard sur l'énergie atomique sont dus à l'argent des brevets déposés avec Einstein.

Alors que la couche d'ozone est menacée par les fluides réfrigérants, le problème traité par Szilard et Einstein est d'actualité. Pour ces deux physiciens, les inventions de réfrigérateurs de conception renouvelée furent plus qu'un bref interlude : depuis leur première collaboration en physique jusqu'à leurs efforts ultérieurs pour lutter contre la prolifération des armes nucléaires, les préoccupations scientifiques et l'engagement politique étaient étroitement mêlés.

Gene DANNEN étudie la vie de Leo Szilard depuis 15 ans ; il prépare un livre sur la naissance de l'âge nucléaire.

The Collected Works of Leo Szilard : Scientific Papers, sous la direction de Bernard T. Feld et Gertrud Weiss Szilard, MIT Press, 1972.

Leo Szilard : His Version of the Facts ; Selected Recollections and Correspondence, sous la direction de Spencer R. Weart et Gertrud Weiss Szilard, MIT Press, 1978.

Georg ALEFELD, *Einstein as Inventor*, in *Physics Today*, vol. 3, n° 5, pp. 9-13, mai 1980.

Richard S. BAKER et Manuel J. TESSIER, *Handbook of Electromagnetic Pump Technology*, Elsevier, 1987.

L'auteur propose une page Leo Szilard sur le réseau Internet à l'adresse : <http://www.peak.org/~danneng/szilard.html>

Le petit père Hadamard

LAURENT SCHWARTZ

Prototype du savant distrait, le mathématicien Jacques Hadamard fut au cœur de l'activité mathématique française pendant presque un siècle.

Le génie mathématique de Jacques Hadamard se doublait d'une grande douceur et d'une immense fermeté morale. Republicain, démocrate, il milita en faveur de Dreyfus lorsque celui-ci fut emprisonné (la femme de Dreyfus était née Hadamard), et, plus tard, il fit partie du Comité central de la Ligue des droits de l'homme : habitant dans la rue où la Ligue avait son siège, il assistait à toutes les réunions du lundi soir.

Je l'ai bien connu, car il était le mari d'une sœur de ma grand-mère maternelle. Je peux attester que sa distraction était extrême : un jour qu'Hadamard était parti pour une promenade en montagne, avec sa sœur, il lui proposa de s'asseoir un instant, pendant qu'il irait chercher des fougères, qu'il collectionnait avec passion. Après avoir ainsi herborisé un long moment, il rentra au chalet... ayant complètement oublié sa sœur, qui l'attendait toujours.

Nous verrons que cette distraction ne le quitta jamais, même dans les pires moments, pas plus que sa passion pour les fougères : il avait en permanence, dans sa poche, une loupe qui lui permettait d'identifier les spécimens, et son domicile était envahi par les herbiers.

Il était également passionné de champignons, et il les aimait sans doute autant pour leurs qualités gastronomiques que pour leur intérêt botanique : lors d'un voyage à l'étranger, il profita d'une escale de son avion

aux Açores pour aller chercher des spécimens, qu'il se fit servir au déjeuner ; à son voisin de table, qui lui en demandait, il les refusa, parce que, dit-il, leur identification n'était pas assurée. Sa passion pour la botanique lui faisait regretter que cette discipline ne fût pas enseignée dès l'école, parce qu'elle permettait aux enfants de faire de la science sans posséder les connaissances mathématiques qu'exige la physique, par exemple. Toutefois sa passion botanique ne lui faisait jamais oublier

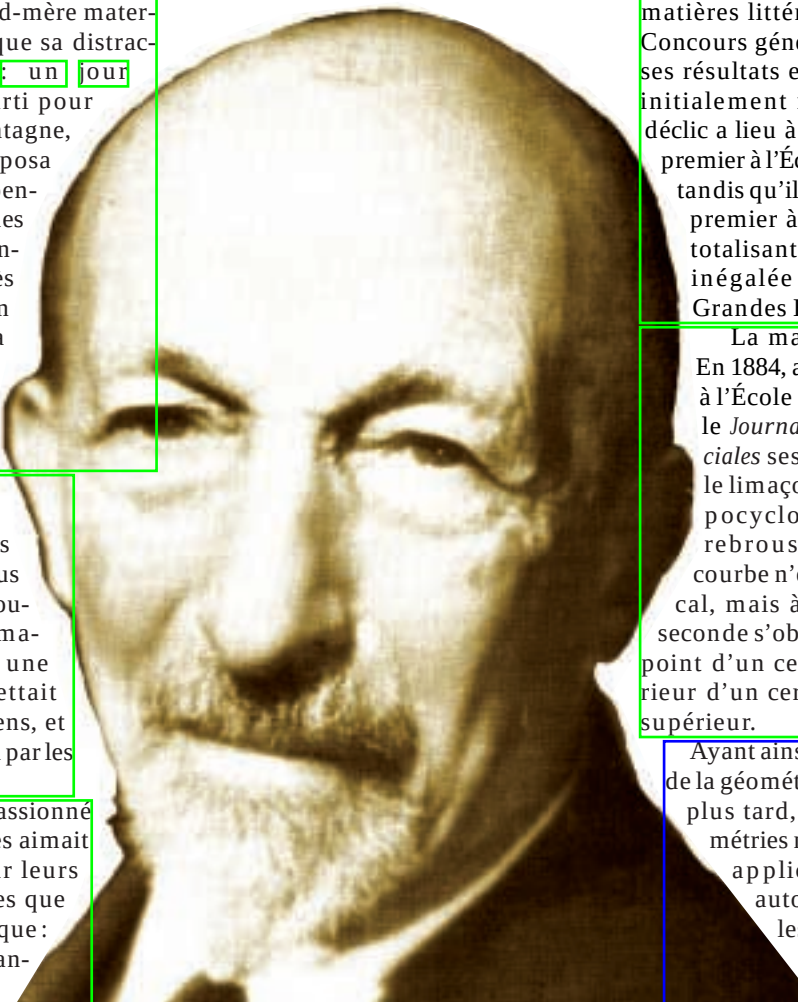
complètement les mathématiques... Car Hadamard était d'abord, et surtout, un très grand mathématicien.

Professeur médiocre, bon chercheur

Il n'avait pas de prédestination particulière pour les mathématiques. Né en 1865 d'un professeur de latin et d'une professeur de piano, Jacques Hadamard est d'abord un élève brillant, mais, alors qu'il excelle dans les matières littéraires (il a des prix du Concours général en grec et en latin), ses résultats en mathématiques sont initialement mauvais. Toutefois le déclic a lieu à temps pour qu'il entre premier à l'École normale supérieure, tandis qu'il est simultanément reçu premier à l'École polytechnique, totalisant une somme de points inégalée dans l'histoire des Grandes Écoles.

La machine est alors lancée. En 1884, alors qu'il n'est qu'élève à l'École normale, il publie dans le *Journal de mathématiques spéciales* ses premiers résultats sur le limaçon de Pascal et sur l'hypocycloïde à trois points de rebroussement : la première courbe n'est pas due à Blaise Pascal, mais à son père Étienne ; la seconde s'obtient en considérant un point d'un cercle qui roule à l'intérieur d'un cercle de rayon trois fois supérieur.

Ayant ainsi commencé par l'étude de la géométrie, il y reviendra 50 ans plus tard, pour évoquer les géométries non euclidiennes et leurs applications aux fonctions automorphes (par exemple, les fonctions définies sur le cercle et de période égale à $2\pi/3$ sont automorphes).



1. JACQUES HADAMARD (1865-1963)

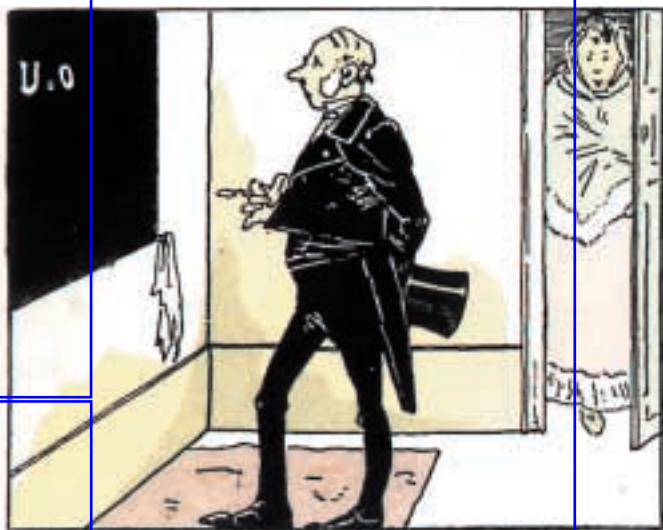
À sa sortie de l'École normale supérieure, Jacques Hadamard enseigne au lycée Buffon jusqu'en 1893, pendant qu'il prépare sa thèse, qu'il passe en 1892. Âgé de 27 ans, ses travaux d'analyse révèlent alors son génie.

Cette thèse porte sur les propriétés des séries de Taylor. Dans le cas de l'ensemble des nombres réels, ces séries sont des sommes de termes de la forme $a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots$. La question essentielle, pour ces séries, est de connaître l'intervalle maximal de centre x_0 (où x_0 est un nombre réel) pour lequel la série de Taylor converge vers la valeur $f(x)$ d'une fonction f ; l'intervalle maximal est nommé intervalle de convergence. Par exemple, à la fonction exponentielle $f(x) = e^x$ correspond la série de Taylor de centre 0 : $1 + x + x^2/(1 \times 2) + x^3/(1 \times 2 \times 3) + x^4/(1 \times 2 \times 3 \times 4) + \dots$ pour un intervalle de convergence qui est toute la droite des nombres réels.

Hadamard s'intéresse plutôt aux développements en série de Taylor de fonctions holomorphes, c'est-à-dire des fonctions définies sur un ensemble ouvert du plan des nombres complexes et dérivables en tous points de cet ouvert (les nombres complexes sont de la forme $x + iy$, où x et y sont des nombres réels, et où i est tel que $i^2 = -1$; ils peuvent se représenter par les points d'un plan). Il trouve la formule du rayon de convergence (le rayon du plus grand disque du plan où le développement en série de Taylor converge) comme l'inverse de la limite supérieure, pour n tendant vers l'infini, de la racine n -ième des modules des coefficients de la série.

Par exemple, pour la fonction exponentielle étendue aux nombres complexes, le développement en série de Taylor s'écrit, autour de l'origine : $1 + z + z^2/(1 \times 2) + z^3/(1 \times 2 \times 3) + \dots$. Les modules des coefficients sont 1, 1, $1/2$, $1/6$, $1/24$... À cette suite de nombres correspond la suite de leurs racines n -ièmes, qui sont, pour n supérieur ou égal à 1 : $1^{1/n}$, $2^{1/n}$, $3^{1/n}$, $4^{1/n}$... La limite supérieure de cette suite, quand n tend

vers l'infini, est aussi sa limite, égale à 0, de sorte que le rayon de convergence est infini. Il est incroyable qu'il ait fallu attendre Hadamard pour obtenir ce résultat, alors que Taylor lui-même avait étudié les séries qui portent aujourd'hui son nom. Toutefois Hadamard cherche surtout, à partir d'une série de Taylor, à trouver des renseignements sur son prolongement analytique dans le reste du plan complexe. Dans sa thèse, Hadamard s'intéresse aux fonctions que l'on peut prolonger, dans tout le plan complexe, en fonctions méromorphes. Les fonctions



Il fit mieux, un soir qu'il devait conduire deux parentes au bal. À dix heures, l'une de ces dames ayant paru : « Mon cousin, dit-elle, il est temps. » Mais Zéphyrin, dont les regards ont rencontré l'ébauche d'un intéressant problème, répond : « Partez devant ! Vous ne serez pas au pont Neuf que je vous aurai déjà rattrapées. »

2. LE SAVANT COSINUS, de Christophe, n'a rien à envier à Jacques Hadamard, qui oublia sa sœur en montagne parce qu'il s'était absorbé dans la récolte de fougères.

méromorphes sont des fonctions holomorphes dans un ensemble ouvert du plan complexe, sauf en un nombre discret de points qui sont des pôles ; les fonctions méromorphes tendent vers l'infini en chacun de ces pôles. Autour des pôles, on exprime parfois ces fonctions par une série, dite de Laurent, qui comporte à la fois des termes élevés à des puissances positives et négatives : autour d'un pôle z_0 , une fonction f d'une variable complexe z s'écrit en effet : $a_{-k}(z-z_0)^{-k} + \dots + a_{-2}(z-z_0)^{-2} + a_{-1}(z-z_0)^{-1} + a_0 + a_1(z-z_0) + a_2(z-z_0)^2 + a_3(z-z_0)^3 + \dots$. La série tend vers l'infini au point z_0 si le coefficient a_{-k} est non nul ; l'ordre du pôle est alors k . La publication intitulée *La série de*

Taylor et son prolongement analytique deviendra la bible de tous ceux qui s'intéressent au sujet.

Toutefois Hadamard est alors enseignant de lycée, et il n'a aucune idée de la difficulté relative des divers sujets mathématiques ; il ne parvient pas à se mettre au niveau des élèves. Le proviseur du lycée Buffon envisage des sanctions, mais on sait qu'Hadamard est un grand mathématicien, si bien que, sa thèse passée, le rectorat lui confie un poste d'assistant à l'Université de Bordeaux ; il y reste de 1893 à 1897.

Nouvelles fonctions, nouveaux résultats mathématiques : à Bordeaux, Hadamard s'intéresse aux fonctions entières, c'est-à-dire aux fonctions dont le développement en série converge dans tout le plan complexe. Soucieux du comportement à l'infini de telles fonctions, il s'intéresse aux relations entre trois quantités : la décroissance à l'infini des coefficients du développement en série de Taylor de la fonction autour de l'origine ; la croissance du maximum du module de la fonction sur des cercles concentriques, centrés sur l'origine, de rayon tendant vers l'infini (les fonctions étudiées associent un nombre complexe $f(z)$ à chaque nombre complexe z ; si on écrit $f(z)$ sous la forme $x + iy$, leur module est égal à $\sqrt{x^2 + y^2}$); et la répartition des zéros de la fonction dans le plan complexe (les zéros sont les points où la fonction s'annule).

Les nombres premiers

Ce travail, qui lui vaut le Grand Prix des sciences mathématiques, le conduit vers la théorie des nombres, avec un théorème qui donne la répartition des nombres premiers. Le mathématicien allemand Bernhard Riemann (1826-1866) avait introduit une fonction nommée fonction *dzêta* qui, à un nombre complexe z , associe la somme $1/1^z + 1/2^z + 1/3^z + \dots$. Bien auparavant, le Suisse Leonhard Euler (1707-

1783) avait observé que cette somme est égale au produit de termes de la forme $1/(1-1/p^2)$, où les p sont les nombres premiers : Euler jetait ainsi un pont entre la géométrie analytique et la théorie des nombres. Reprenant le problème, Riemann observa que tous les zéros de la fonction autres que $-2, -4, -6, -8, \dots$ semblaient avoir une partie réelle égale à $1/2$ (voir la figure 5). Mieux encore, dans le cas où cette hypothèse (aujourd'hui nommée conjecture de Riemann) serait exacte, alors le nombre de nombres premiers inférieurs à un nombre n serait de l'ordre de $n/\log(n)$, pour les valeurs de n tendant vers l'infini.

Hadamard est gêné par la conjecture de Riemann, qui est indémontrée (elle a été vérifiée par ordinateur pour plusieurs millions de zéros, et le mathématicien britannique Godfrey Hardy a démontré qu'une infinité de zéros de $\zeta(s)$ a $1/2$ comme partie réelle, mais elle reste indémontrée) ; aussi cherche-t-il un moyen de démontrer le théorème de la répartition des nombres premiers qui s'en affranchisse. Il le trouve, en fondant son étude sur des résultats moins ambitieux, mais démontrés, à savoir que la fonction $\zeta(s)$ ne s'annule jamais pour les nombres complexes de la forme $1 + iy$, où y est un nombre réel quelconque. Puis, à l'aide de cette ingénieuse astuce, il démontre le théorème de répartition des nombres premiers (le même théorème est également démontré par Charles-Jean de la Vallée-Poussin, à Louvain).

Naturellement ce théorème ne donne qu'une place approchée du n -ième nombre premier, et la position exacte des nombres premiers ne pourrait être donnée que par une série infinie. Pouvaient-on trouver cette série ? Hadamard se convainc qu'il faudrait disposer d'une démonstration de l'hypothèse de Riemann. Il poursuit son étude et trouve un théorème de symétrie de la fonction $\zeta(s)$. Son

mémoire est, à nouveau, couronné par l'Académie des sciences.

Ses remarquables capacités ainsi reconnues, il est nommé maître de conférences à la Sorbonne, en 1897. À ce poste, qu'il occupe jusqu'en 1909, il poursuit l'étude des fonctions de la variable complexe et obtient très rapidement ce que l'on nomme aujourd'hui le théorème du minimum de Hadamard : pour toute fonction f d'une variable complexe z , il existe une suite de cercles centrés sur l'origine et de rayon tendant vers l'infini, sur lesquels le minimum du module de la fonction est du même ordre de grandeur que l'inverse du maximum du module de la fonction.

Par exemple, pour la fonction $f(z) = e^z$, le maximum du module sur le cercle de rayon r est e^r , tandis que le minimum du module est e^{-r} ; dans cet exemple, le minimum du module est exactement égal à l'inverse du maximum du module (e^{-r} est égal à $1/e^r$), et la relation est vraie pour tous les cercles, car la fonction e^z ne s'annule jamais. Cependant, pour d'autres fonc-

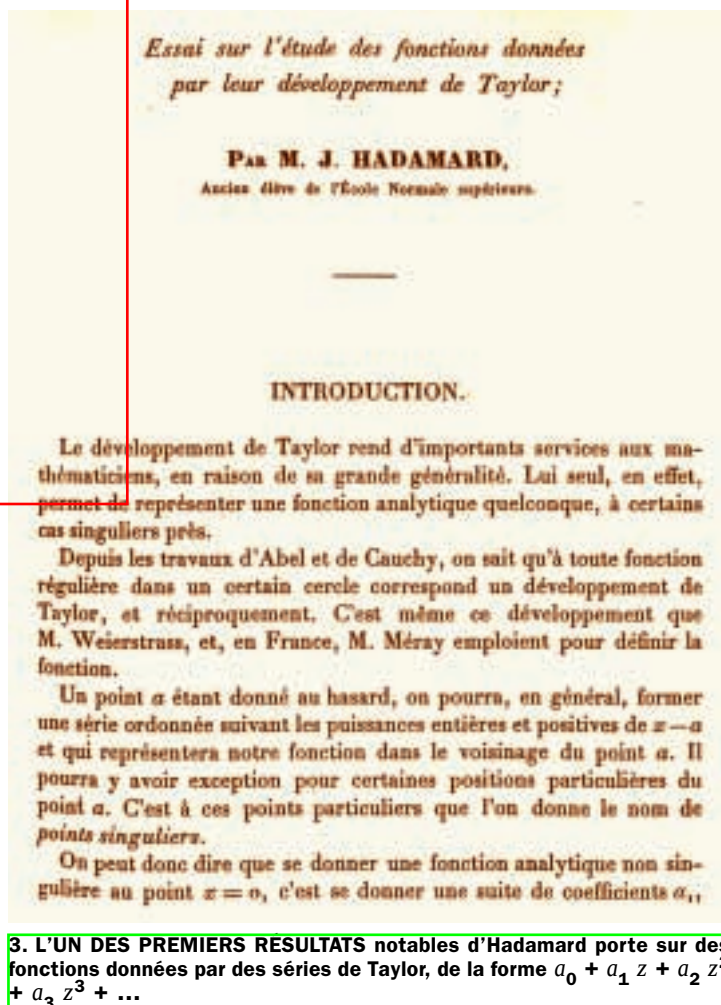
tions, seul le résultat donné par le théorème du minimum subsiste.

Puis, en 1898, un an seulement après sa nomination, il étudie les surfaces de courbure totale négative ayant un nombre fini de nappes s'étendant jusqu'à l'infini (un cylindre d'axe vertical, par exemple, est une surface à deux nappes : un point peut partir vers l'infini soit vers le haut, soit vers le bas ; sa courbure est nulle).

Pour cette étude, il considère les géodésiques, c'est-à-dire les courbes analogues aux grands cercles de la sphère. Sur ces surfaces à courbure totale négative (chacun de leurs points est analogue à une selle de cheval), les géodésiques sont de trois types : soit elles sont fermées ou asymptotiquement proches de courbes fermées ; soit elles s'étendent à l'infini en restant sur une des nappes ; soit des segments entiers de ces géodésiques s'approchent successivement d'une série de géodésiques fermées, la longueur de ces segments croissant jusqu'à l'infini. Hadamard analyse les propriétés de l'ensemble des tangentes aux géodésiques.

Hadamard passe ainsi à la topologie. En fait, il mène plusieurs études de front, puisque, en 1903, il publie ses *Leçons sur la propagation des ondes et les équations de l'hydrodynamique* : depuis ses contacts avec le physicien Pierre Duhem, à l'Université de Bordeaux, Hadamard s'intéresse à la physique.

À propos de la propagation des ondes et de l'équation des ondes, il met en évidence les comportements différents des ondes dans des espaces de dimensions différentes, montrant notamment une différence importante entre les dimensions paires et impaires : dans les espaces de dimension impaire, tel le nôtre, le son qui est émis à partir d'un point rayonne en restant sur une sphère dont le rayon croît à vitesse régulière (la vitesse du son) ; en revanche, dans les espaces de dimension paire (un plan, par



exemple), il remplit toute la boule, et non seulement la surface de la sphère qui la limite.

Ainsi la musique, que pratique Hadamard (il joue du violon) serait différente si notre Univers avait un nombre pair de dimensions ; en fait, les ondes décrites par une équation qui tient compte de phénomènes d'amortissement et de perturbations remplissent toujours la boule, comme dans le cas des dimensions paires. En outre, Hadamard donne un théorème de descente, qui permet de connaître les solutions aux dimensions inférieures, quand on connaît une solution dans une dimension donnée.

Restant dans cette problématique, de 1904 à 1921, il cherche les solutions complètes du problème de Cauchy pour les équations aux dérivées partielles du deuxième ordre : en termes physiques, ce problème consiste, par exemple, à chercher la forme d'une corde vibrante, à n'importe quel instant, quand on la lâche, à partir d'une forme imposée, chaque point de la corde étant lancé avec une vitesse imposée et les extrémités restant fixes.

À la Sorbonne, Hadamard expose les résultats de ses recherches, en se souciant toujours de faire part aux étudiants de son idée des problèmes bien posés : un problème est bien posé s'il a une solution et si, de plus, la solution dépend continûment des données ; une petite variation des données ne doit apporter qu'une petite variation des solutions.

Cette question de stabilité le passionne tant qu'elle le conduit à reprendre l'étude des géodésiques des surfaces, en montrant que, si l'on part d'un point avec une petite variation de la direction initiale, cela peut amener le trajet final à varier considérablement. Ainsi Hadamard pose le problème de la stabilité à long terme du Système solaire.

La fondation Silliman de l'Université Yale publie ce travail, dans un livre de 600 pages : *Le problème de Cauchy et les équations aux dérivées partielles linéaires hyperboliques*. Cette publication est un peu paradoxale, car l'argent donné par M. Silliman à l'Université Yale doit servir à « instituer annuellement une série de leçons destinées à démontrer la prévoyance, la sagesse et la bonté de Dieu, telles qu'elles se manifestent dans le monde tant naturel que moral. La conviction

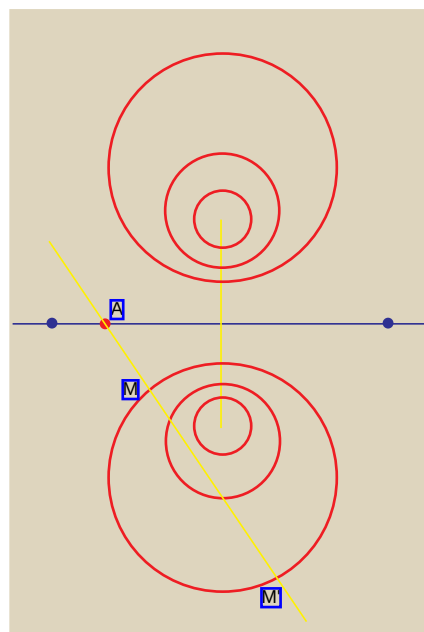
du testateur est que toute présentation bien ordonnée des faits de la nature ou de l'histoire contribue au but de cette fondation plus efficacement que n'importe quelle tentative de développement sur les principes de la doctrine ou de la foi ; et, en conséquence, il a entendu exclure du but de la fondation des leçons de théologie dogmatique ou polémique, et le réserver bien plutôt aux sujets empruntés aux domaines des sciences de la nature ou de l'histoire, tout particulièrement de l'astronomie, de la chimie, de la géologie et de l'anatomie.

Or Hadamard, bien qu'issu d'une famille juive d'Alsace, est absolument athée, et ses mathématiques ne sont ni des sciences de la nature, ni de l'histoire, ni de l'astronomie, ni enfin de la chimie, de la géologie ou de l'anatomie. Qu'importe ! Ce texte est utile à de nombreux mathématiciens, et ma propre théorie des distributions lui doit beaucoup : j'ai passé trois mois de vacances à l'étudier.

Le rayonnement international

Hadamard est au faite de sa gloire quand il est nommé professeur au Collège de France, en 1909. Il y enseigne jusqu'en 1937, en même temps qu'à l'École polytechnique et à l'École centrale. Au Collège de France, la devise de ses séminaires du mardi et du vendredi est : « Généraliser pour simplifier ou pour mieux comprendre ». Parfois Hadamard cite également Poincaré : « Il n'y a pas des problèmes résolus et d'autres qui ne le sont pas : il y a des problèmes plus ou moins résolus. » Les plus grands mathématiciens du monde s'honorent de venir présenter leurs travaux ou de commenter ceux d'autrui à ces séminaires. Paul Lévy a indiqué que, pour des étudiants avancés, Hadamard était un remarquable professeur, parce qu'il montrait toujours des mathématiques qu'il avait personnellement étudiées ; il insistait sur les idées générales et sur les erreurs qu'il importait d'éviter.

En contrepartie, il reste un piètre guide pour les jeunes. En 1931, quand il est élu à l'Académie des sciences, je suis en classe de Première et je veux le voir spécialement afin qu'il me conseille. Il me parle de la fonction ζ de Riemann, que je ne connais pas, et de la répartition des nombres

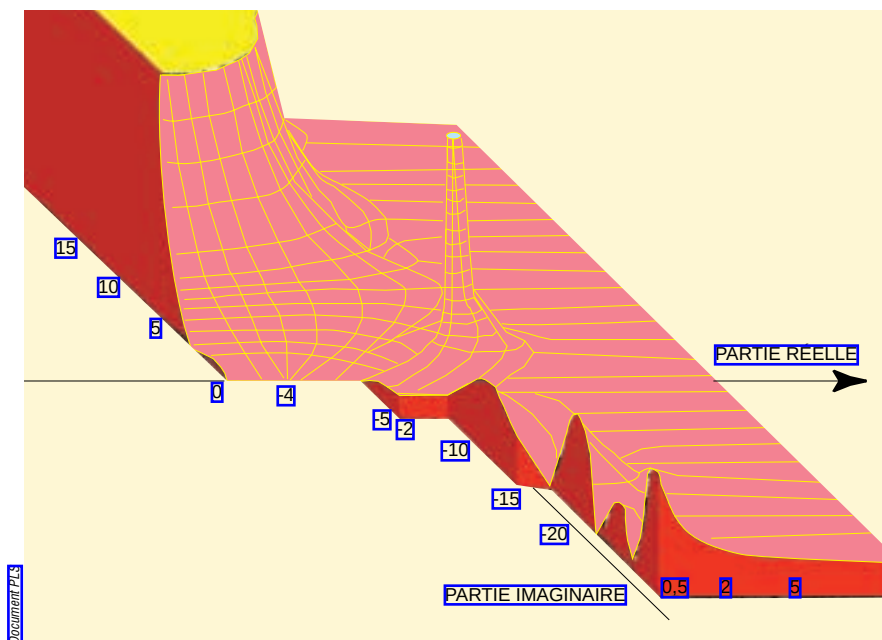


4. LES SIX CERCLES en rouge appartiennent à un même faisceau, dont l'axe radical est la droite bleue : pour chaque point A de la droite, le produit $AM \cdot AM'$ est identique, quel que soit le point A et quelle que soit la droite passant par A et coupant les cercles du faisceau en M et M'. Hadamard utilisait de tels faisceaux de cercles pour construire des points imaginaires (ici en bleu).

premiers. Je ne comprends rien : « Je trouve que tu n'es pas très compétent », me dit-il. L'entretien se poursuit néanmoins, et il aborde ensuite le trinôme du second degré, dont je lui dis la formule des racines par cœur : « Je vois que tu es très savant », remarque-t-il, ce qui me démontre, d'une part, que j'apprendrais difficilement avec lui, et, d'autre part, qu'il ne fait aucune différence entre le simple et le compliqué.

En 1932, il publie un livre monumental, commencé à Bordeaux : un traité de géométrie élémentaire en deux volumes, qui est mon livre de chevet quand je suis en classe de Terminale. Cet ouvrage contient un nombre incroyable de problèmes, mais il y a aussi des erreurs d'axiomatique : par exemple, sans s'en apercevoir, Hadamard démontre que la dimension de l'espace est égale à trois.

Il introduit des points imaginaires du plan, sans faire référence aux nombres imaginaires de l'ensemble des nombres complexes, puisqu'il veut une œuvre purement géométrique. Il considère les couples de cercles : si deux cercles ne se coupent pas (en deux points), définit-il, alors ils se coupent en deux points imaginaires conjugués.



5. LE MODULE de la fonction zêta de Riemann, définie dans le plan complexe, est indiqué ici par la cote des points de la surface en rose. Cette fonction ne s'annule, pense-t-on, que pour les nombres de partie réelle égale à $1/2$.

gués ; si quatre cercles appartiennent à un même faisceau, alors les couples de cercles définissent les mêmes couples de points imaginaires conjugués. Un faisceau de cercles engendré par deux cercles donnés est l'ensemble des cercles ayant avec l'un quelconque des deux cercles, pour axe radical, l'axe radical des deux cercles ; cet axe radical est la droite qui est l'ensemble des points ayant même puissance par rapport aux deux cercles, la puissance d'un point A par rapport à un cercle étant le produit $AM \cdot AM'$, où M et M' sont les intersections d'une droite passant par le point A et coupant le cercle en deux points.

Si Hadamard avait utilisé des nombres, sa tâche aurait été simplifiée : de même que l'on obtient le plan des nombres complexes en ajoutant aux nombres réels (ensemble R) des nombres imaginaires (le plan C des nombres complexes est ainsi l'ensemble des nombres de la forme $R + iR$), il aurait pu ajouter au plan $R \times R$, les nombres $iR \times R$ pour former l'ensemble $(R \times R) + i(R \times R)$.

Cependant il veut qu'aucune coordonnée, aucune relation analytique, aucune trigonométrie ne vienne «troubler» ce beau monument géométrique. Cédant à l'entêtement de l'époque, il fait ainsi quelque chose de monumental sous une forme acrobatique.

Enfin, en 1937, après avoir publié plus de 300 textes mathématiques, il part à la retraite, à l'âge de 72 ans : les pro-

fesseurs au Collège de France prennent normalement leur retraite à 70 ans, mais ses deux enfants morts pendant la Première Guerre mondiale lui valent ces deux années supplémentaires. La Seconde Guerre mondiale éclate alors, et il doit quitter la France. Prévoyant de partir pour les États-Unis, en transitant par l'Espagne, il séjourne d'abord à Toulouse, ainsi que mes parents.

Cosinus jusqu'au bout

Avec l'âge, sa distraction ne s'améliore pas : un jour, avec mon frère Bertrand, il va acheter des œufs chez un marchand qui ne consent qu'à vendre six œufs par foyer. Hadamard n'appartient pas au même foyer que celui de mes parents, mais il y a un risque que le marchand refuse de donner six œufs à Bertrand et six œufs à Hadamard, de sorte que mon grand-oncle et mon frère sont convenus qu'ils feront comme s'ils ne se connaissent pas. Toutefois, lors du trajet pour aller à la boutique, il tutoie mon frère sans cesse et, même chez le commerçant, il continue de lui parler. C'est seulement en quittant la boutique que, se souvenant soudain des précautions convenues, il dit à mon frère : «Au revoir, cher Monsieur, enchanté d'avoir fait votre connaissance». Il part, pendant que mon frère reste atterré dans la boutique, craignant de ne pas être servi. Pis encore, après quelques mètres, il

revient sur ses pas, ayant à nouveau oublié les conventions, et dit à Bertrand : «Au fait, tu diras à ta mère de...»

Peu après, ayant difficilement obtenu son visa américain, il finit par quitter la France, arrive en Espagne au terme d'un voyage compliqué et... s'aperçoit qu'il a oublié son visa. Il faut reprendre les formalités.

Aux États-Unis, il trouve difficilement un poste, car beaucoup de savants allemands y sont déjà réfugiés. Dans une université, il est reçu par le président, qui lui exprime la difficulté de lui donner une chaire. Hadamard lui montre alors des photographies accrochées au mur ; il y est représenté : n'est-ce pas un titre suffisant à pouvoir enseigner ? Le président lui demande quelques jours de réflexion, mais, quand Hadamard revient, on lui notifie qu'aucun poste n'est disponible... et il observe que sa photographie a disparu du mur. Tristes moments...

Finalement, Hadamard est accueilli à New York, où il attend la fin de la guerre avant de revenir en France. Sur la fin de sa vie, il continue de s'intéresser à l'histoire, à l'épistémologie, publiant de nombreux articles sur l'invention, sur l'histoire des mathématiques, sur l'enseignement. Il croit à l'intuition, compare les impressions de Poincaré à ce qu'il a ressenti. Son essai sur ce sujet est imprimé en 1945 aux États-Unis.

Le «petit père Hadamard», comme les mathématiciens le nomment avec respect et admiration (dans *Les Mots*, Sartre a fait une erreur en prétendant que l'on ne qualifie de «père» que des personnes vieilles et pauvres), reste alerte et actif, s'engageant politiquement pour de nombreuses causes. Comme il est presque communiste (ses enfants le sont ardemment), il fait partie d'une délégation de savants français invités en Union soviétique avec Élie Cartan et Pierre Joliot-Curie. Lors d'une visite du Musée de la Révolution, à Moscou, il s'étonne de ne voir aucune mention de Trotsky. Il lui est répondu que Trotsky était un traître, qui ne doit donc pas figurer dans le musée. «Oui, mais il a joué un rôle dans la révolution. Est-ce un musée des récompenses, ou un musée de la révolution ?» Joliot-Curie lui dit qu'il est naïf de croire qu'il pourrait réformer le régime soviétique, mais Hadamard lui répond que Trotsky serait

dans le musée si tout le monde avait réagi. Jusqu'à la fin de sa vie, il assiste également à de nombreux séminaires Bourbaki, ce groupe de jeunes mathématiciens qui, au sortir de la guerre, veulent fonder les mathématiques sur des bases axiomatiques assurées. Hadamard pose invariablement des questions en fin d'exposé, afin de vérifier ses interprétations de la terminologie utilisée par les orateurs : les mathématiques ont tant changé, depuis la fin du XIX^e siècle !

Il est également souvent invité à l'étranger, et, au cours d'un épique voyage en Chine, il promet à ses hôtes d'écrire pour ce pays un livre sur les équations aux dérivées partielles. Il le commence à l'âge de 80 ans, mais, dix ans après, il n'en est qu'au huitième des 22 chapitres prévus, et il est si préoccupé qu'il n'en dort plus et que sa vie est un enfer. Sa femme demande d'intervenir ; la discussion dure plusieurs heures, après lesquelles il consent à envoyer son manuscrit en l'état. Les huit chapitres réalisés partent alors pour la Chine dans un paquet non recommandé et mal ficelé, sans photocopie ; le paquet mettra plusieurs mois à arriver, et le livre paraîtra après sa mort.

Soulagé, il peut ainsi continuer à se réjouir du succès de ses élèves : Lagrange avait dit : « Il est doux de voir pousser dans le jardin d'autrui les plantes dont on a semé les graines. » Hadamard ajoutait : « Rien ne peut être plus précieux pour le savant que de se sentir dépassé dans les chemins mêmes qu'il a commencé à tracer. »

En 1962, toutefois, il perd sa femme et son petit-fils, tandis que sa fille Cécile est déjà décédée. Alors que je suis à New York, il m'écrit qu'il est triste et qu'il a perdu l'envie de vivre. Il décède peu après, en 1963, à l'âge de 98 ans et demi, laissant une œuvre immense, portant sur des sujets remarquablement variés.

Laurent SCHWARTZ est mathématicien ; il a reçu la médaille Fields en 1950.

Inventeurs et scientifiques, dictionnaire de biographies, éditions Larousse, 1994.
Dictionary of Scientific Biographies, éditions Scribners.

Dictionnaire des mathématiques, Alain Bouvier et Michel George, sous la direction de François Le Lionnais. Presses Universitaires de France, 1979.

Le centenaire du théorème des nombres premiers

MICHEL BALAZARD

En 1896, Jacques Hadamard, à Bordeaux, et Charles-Jean de la Vallée-Poussin, à Louvain, démontrent indépendamment le théorème des nombres premiers. C'est l'événement principal d'une aventure scientifique commencée il y a plus de deux millénaires.

Les nombres premiers sont les nombres entiers naturels supérieurs à 1 et divisibles seulement par eux-mêmes et par 1. Leur importance se manifeste par le théorème fondamental de l'arithmétique : tout nombre entier s'écrit de manière unique, à l'ordre près des facteurs, comme produit de nombres premiers ; ainsi 126 est égal au produit $2 \times 3 \times 3 \times 7$. Euclide démontre au livre IX des *Éléments* que les nombres premiers sont en nombre infini : si $a, b, c, \dots$ sont des nombres premiers, alors $a \times b \times c \dots + 1$ est premier ou admet un diviseur premier différent de $a, b, c, \dots$. On présente ainsi, dans ce théorème antique, la théorie analytique des nombres : l'étude de l'interaction des deux opérations fondamentales, addition et multiplication, ainsi que le conflit entre les structures qu'elles définissent.

Comment identifier les nombres premiers ? Ératosthène, bibliothécaire à Alexandrie, découvrit le crible qui porte son nom et qui permet de faire la liste des nombres premiers inférieurs à une borne définie. On commence par écrire à la suite tous les nombres entiers inférieurs à la borne fixée, et on balaie la liste de la façon suivante : on garde 2 et on barre tous ses multiples ; on garde 3 et on barre tous ses multiples ; etc. Les nombres qui ne sont pas barrés sont les nombres premiers, dont la contemplation n'a cessé de provoquer perplexité et inspiration. Comment distinguer une structure, une loi sous-jacente à l'apparent désordre des nombres premiers ?

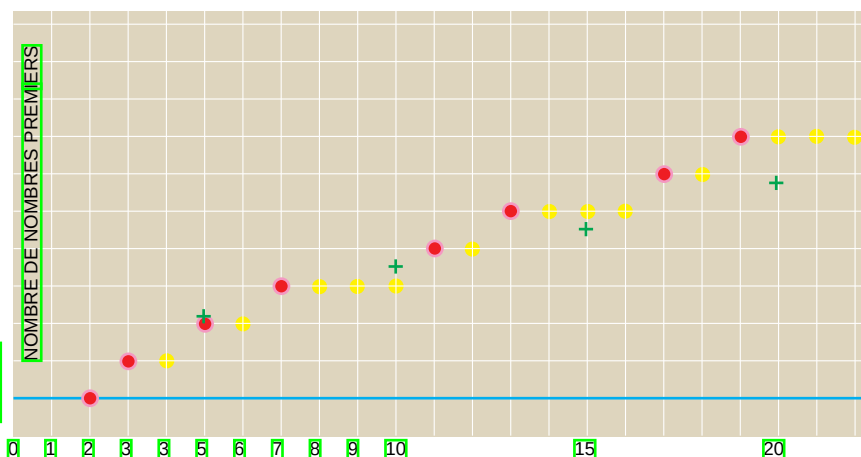
Après Euclide, la première avancée fut celle de Leonhard Euler, le « Prince des mathématiciens », qui démontra en 1737 que la somme des inverses des nombres entiers n est égale au produit de termes de la forme $1/(1 - 1/p)$, où les nombres p sont les nombres pre-

miers ; comme on sait, par ailleurs, que la somme des inverses des nombres entiers est infinie, le produit des termes $1/(1 - 1/p)$ l'est aussi, ce qui revient à dire que la somme des inverses des nombres premiers est infinie.

Le théorème fondamental de l'arithmétique est condensé dans l'égalité d'Euler. Comme l'a écrit André Weil, cette formule marque la naissance de la théorie analytique des nombres. On nomme aujourd'hui produit eulérien toute égalité de ce type entre une somme où interviennent les nombres entiers et un produit où figurent les nombres premiers.

Le résultat d'Euler ouvre la voie pour les généralisations suivantes. La première publication où figure une conjecture précise concernant la répartition des nombres premiers semble être l'*Essai sur la théorie des nombres*, d'Adrien-Marie Legendre : en 1798, ce dernier annonce que le nombre de nombres premiers inférieurs ou égaux à n , quantité qu'il note $\pi(n)$, doit être de la forme $An/(B \log(n) + C)$. Il affirmera cette conjecture en 1808 en écrivant $\pi(n) = n/(\log(n) - 1,08366)$.

Auparavant, vers 1792, Carl Friedrich Gauss avait été conduit à une conjecture similaire en comptant les nombres premiers dans les tranches successives de 1 000 nombres entiers, ainsi qu'il l'écrivit dans une lettre à l'astronome allemand Johann Encke, en 1848 : Gauss conjecturait que la densité de nombres premiers proches de n est approximativement $1/\log(n)$, de sorte qu'une bonne approximation de $\pi(n)$ doit être donnée par l'intégrale de $1/\log(x)$, quand x est compris entre 0 et n (c'est ce que l'on nomme le logarithme intégral). Qu'on suive Gauss ou Legendre, on arrive à la conclusion que



Le nombre de nombres premiers entre 1 et un nombre quelconque n est approximativement égal à $n/\log(n)$ (croix vertes) ; le quotient de ces deux nombres tend vers un (droite bleue). Cette loi constitue le théorème des nombres premiers. Il fut démontré par Jacques Hadamard et Charles-Jean de la Vallée-Poussin, en 1896.

le rapport de $\pi(n)$ et de $n/\log(n)$ doit tendre vers 1, quand n tend vers l'infini. C'est cet énoncé que l'on nomme le théorème des nombres premiers.

Un siècle après Euler, en 1837, Peter-Gustav Lejeune-Dirichlet réussit à généraliser en profondeur le raisonnement du mathématicien suisse pour démontrer l'existence d'une infinité de nombres premiers dans toute progression arithmétique $a.n + b$, où a et b n'ont pas de facteur commun : par exemple, il existe une infinité de nombres premiers dans la suite 7, 12, 17, 22, 27, 32, 37... parce qu'elle s'écrit $5n + 7$, 5 et 7 étant premiers entre eux.

Si ce résultat n'apporte rien en ce qui concerne le théorème des nombres premiers, le mémoire de Dirichlet représente un progrès méthodologique considérable, notamment parce qu'il inaugure l'utilisation en arithmétique des séries dont le terme général est la somme, pour n compris entre 1 et l'infini, de termes a_n / n^z (z est un nombre complexe) et qui sont aujourd'hui nommées séries de Dirichlet.

Le pas suivant est fait par Pafnouti Lvovitch Tchébychev, dans deux mémoires parus en 1852. Il montre que la formule de Legendre ne peut pas être asymptotiquement vérifiée quand n tend vers l'infini : la constante 1,08366 doit être remplacée par 1 et, en un certain sens, seul le logarithme intégral permet d'approcher correctement $\pi(n)$. Pour compter le nombre de nombres premiers, il définit la fonction $\theta(n)$ égale à la somme des logarithmes des nombres premiers inférieurs à n . Puis il donne des encadrements numériquement explicites de $\theta(n)$, dont une conséquence frappante est le postulat de Bertrand :

pour n supérieur à 3, il existe toujours un nombre premier supérieur à n et inférieur à $2n - 2$ (par exemple, entre 6 et 10, on trouve le nombre premier 7).

En 1859 paraît l'article de Bernhard Riemann *Ueber die Anzahl der Primzahlen unter einer gegebenen Grösse* («Sur le nombre des nombres premiers inférieurs à un nombre donné») : en quelques pages, Riemann établit un programme de travail pour les décennies à venir ; il montre l'importance fondamentale de la série de Dirichlet dont les coefficients sont tous égaux à 1 : $1 + 1/2^z + 1/3^z + 1/4^z \dots$ L'idée nouvelle est d'étudier cette fonction (aujourd'hui nommée fonction *dzêta*, ζ) dans le plan des nombres complexes : Riemann montre qu'elle a alors de remarquables propriétés de symétrie, et il étudie les nombres complexes z qui vérifient $\zeta(z) = 0$ (ce sont les «zéros» de la fonction *dzêta*), en écrivant une formule qui relie la fonction π et ces zéros.

Les démonstrations sont seulement esquissées, mais Riemann établit une nette différence entre les assertions pour lesquelles il a réuni un faisceau d'arguments qui lui semblent suffisants, et qui seront effectivement démontrés avant la fin du XIX^e siècle, et une conjecture selon laquelle les zéros de partie réelle positive ont tous une partie réelle égale à $1/2$: «Il serait à désirer, sans doute, que l'on eût une démonstration rigoureuse de cette proposition ; néanmoins j'ai laissé cette recherche de côté après quelques rapides essais infructueux, car elle paraît superflue pour le but immédiat de mon étude». C'est l'hypothèse de Riemann, qui est aujourd'hui le problème ouvert le plus célèbre des mathématiques.

L'article de Riemann a eu une profonde influence sur le développement des mathématiques. Pour démontrer les affirmations qu'il contient, il a fallu mettre au point des pans entiers d'analyse mathématique. Ainsi, la théorie des fonctions entières, c'est-à-dire des séries qui convergent dans tout le plan complexe, s'édifie à partir de 1876 avec les travaux de Carl Weierstrass (1815-1897), d'Edmond Laguerre (1834-1886), de Henri Poincaré (1854-1912), et de Jacques Hadamard, qui obtient le Grand Prix des sciences mathématiques avec son mémoire *Étude sur les propriétés des fonctions entières, et en particulier d'une fonction considérée par Riemann*, paru en 1893.

Dans son mémoire de 1893, Hadamard démontre la décomposition de la fonction *dzêta* en produit de facteurs qui dépendent de ses zéros, ce qui, au vu de l'écriture de *dzêta* comme produit eulérien, établit une correspondance remarquable entre les nombres premiers et les zéros de la fonction *dzêta*.

En 1895, H. von Mangoldt en déduit une formule explicite pour la fonction de Tchébychev $\theta(n)$. Malheureusement, sans information suffisante sur la répartition des zéros de la fonction *dzêta*, on ne peut en déduire la relation asymptotique qui constituerait le théorème des nombres premiers.

Il appartient à Hadamard et à la Vallée-Poussin de conclure. Chez l'un comme chez l'autre, la démonstration comporte deux parties : d'abord prouver que la fonction *dzêta* n'a pas de zéro dont la partie réelle serait égale à 1 ; puis en déduire le théorème des nombres premiers. En revanche, les deux mathématiciens parviennent à ces fins par des raisonnements très différents. L'assertion concernant les zéros de la fonction *dzêta* est l'objet d'une démonstration courte et élégante, par Hadamard.

Un siècle après, où en est la théorie des nombres premiers ? Tout d'abord, il a fallu exposer les résultats de 100 années de recherche et les ordonner en une théorie cohérente. En 1909, Edmund Landau développe en un millier de pages les conquêtes du XIX^e siècle, en y incorporant de nombreux résultats et simplifications. En 1932, A. Ingham fait preuve de plus de concision et insiste sur les avancées importantes du premier tiers du XX^e siècle.

Ensuite a lieu une importante réflexion critique sur les démonstrations originales de 1896 : les seuls élé-

ments nécessaires à l'énoncé du théorème des nombres premiers sont l'arithmétique élémentaire et la notion de limite de l'analyse réelle. Il était donc naturel de chercher une démonstration élémentaire de ce théorème ; après une contribution importante de Norbert Wiener en 1932, comme corollaire de sa théorie générale, c'est en 1949 qu'on eut la réponse, positive, par Paul Erdős et Atle Selberg.

Une deuxième question fondamentale est de discerner parmi les propriétés des nombres entiers celles qui sont essentielles pour obtenir la loi de répartition des nombres premiers. Arne Beurling a ainsi fondé en 1938 la théorie des nombres premiers généralisés et des nombres entiers généralisés : les nombres premiers généralisés sont les suites de nombres réels tendant vers l'infini, et les nombres entiers généralisés sont les nombres réels que l'on forme en multipliant entre eux les nombres premiers généralisés. A. Beurling a établi que les nombres premiers généralisés vérifient le théorème des nombres premiers quand les nombres entiers généralisés ont une répartition suffisamment régulière.

Après Hadamard et la Vallée-Poussin, de nombreux mathématiciens ont tenté de dessiner les limites de la régularité de la répartition des nombres premiers. Le premier théorème d'oscillation fut l'œuvre de John Littlewood qui, en 1914, infirma une conjecture de Gauss en démontrant que $\pi(n) - \text{li}(n)$ change de signe une infinité de fois quand n tend vers l'infini. Plus récemment, dans les années 1980, Helmut Maier a montré que la densité des nombres premiers entre n et $n + \log(n)^s$ n'est pas équivalente à $1/\log(n)$ quand n tend vers l'infini, cela pour tout nombre s fixé.

Notre siècle a surtout revisité le crible d'Ératosthène et précisé considérablement le théorème de Dirichlet sur la progression arithmétique. Toutefois, 138 ans après sa formulation, l'hypothèse de Riemann, indémontrée, reste un obstacle au développement de la théorie des nombres premiers.

Michel BALAZARD est mathématicien à l'Université de Bordeaux.

Gérald TENENBAUM et Michel MENDÈS-FRANCE, *Les nombres premiers*. Que sais-je?, P.U.F. (à paraître)

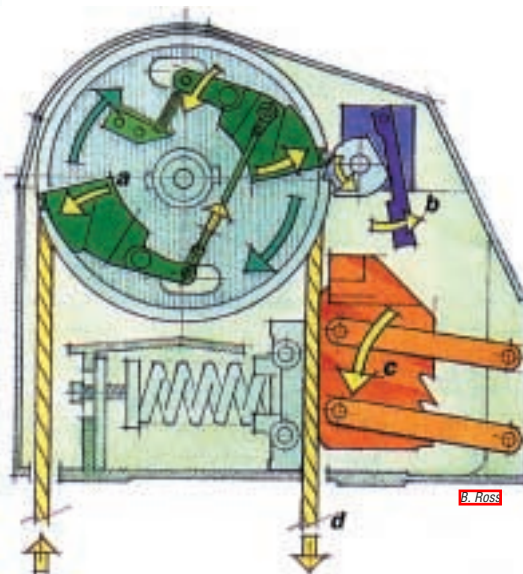
La sûreté des ascenseurs

En 1854, à l'exposition du Crystal Palace de New York, Elisha Graves Otis descendait au-dessus de la foule sur une plate-forme lorsqu'un assistant coupa le câble auquel celle-ci était accrochée. Le «parachute» inventé par Otis empêcha la plate-forme de tomber. Trois ans plus tard, le premier ascenseur, mû par la vapeur, transportait des passagers dans le magasin E.V. Haughwout & Company de New York.



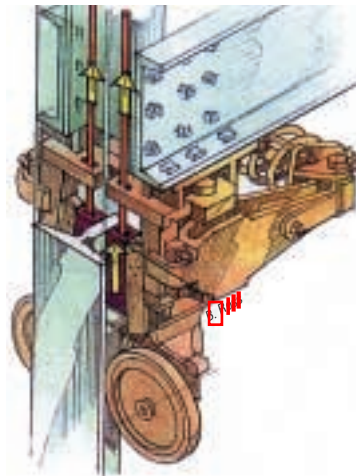
LE LIMITEUR DE VITESSE

Lorsque la vitesse de descente d'un ascenseur dépasse une limite prédéfinie, des masses articulées sur un disque en rotation s'écartent de l'axe (a) sous l'effet de la force centrifuge et actionnent un loquet (b) qui libère à son tour une mâchoire mobile (c). En tombant, la mâchoire bloque le câble du limiteur (d).



LA SÛRETÉ

Si l'action du limiteur de vitesse ne ralentit pas assez la chute de la cabine, une sûreté est enclenchée. La tension du câble du limiteur actionne une tringlerie fixée sur la cabine. Une paire de coins est alors libérée : leur blocage sur le rail de guidage arrête la cabine.



L'usage du treuil est ancien. Cet appareil a facilité la tâche des constructeurs des pyramides égyptiennes et celle des bâtisseurs de cathédrales du Moyen Âge. Toutefois, faute d'un mécanisme de freinage de sécurité efficace, ces premiers ascenseurs

étaient peu sûrs et aucun passager ne s'y aventurait. Tout changea en mai 1854 : Elisha Graves Otis présenta le premier système mécanique, nommé parachute, qui, à l'aide de ressorts et de pièces de serrage, prévient la chute libre de la cabine.

Les mécanismes de sûreté des ascenseurs ont été beaucoup améliorés depuis. Néanmoins, les principes mis au point par Otis sont toujours en usage, même dans les plus hauts immeubles du monde. Dans les ascenseurs modernes, si la cabine descend trop vite, un limiteur de vitesse coupe le courant électrique et enclenche un frein. Si la cabine ne s'arrête pas, une sûreté située sous la cabine est activée : des coins viennent serrer les rails de guidage. La cabine s'arrête alors en moins de deux secondes.

Ce parachute fait de l'ascenseur l'un des moyens de transport les plus sûrs. Les 440 000 ascenseurs installés en France transportent sans dommages 100 millions de passagers par jour.

William SHEERAN, Société Otis

Du courant dans les roches

PASCAL BERNARD

On détecte les courants électriques dans les roches afin de prévoir les séismes.

Des courants électriques dans le sous-sol permettraient-ils de prévoir les éruptions volcaniques et les séismes ? Dès 1794, l'Italien Filomarino, duc de La Torre, a recherché de tels signaux à l'aide d'un électromètre qu'il promenait sur les pentes du Vésuve en éruption. Il a fallu près de deux siècles pour que des expériences effectuées en laboratoire relancent les recherches des géophysiciens sur le terrain ; dans les régions sismiques, ils tentent d'extraire les signes électriques avant-coureurs des séismes.

Cette recherche a été ravivée par l'observation d'un potentiel électrique entre les deux faces d'une roche où circule un courant d'eau. Les sels dissous dans l'eau des pores ou des fissures libèrent des ions positifs et négatifs ; dans certaines roches, les ions porteurs d'une charge particulière se fixent à la surface des grains solides, laissant dans le liquide un excédent d'ions de charge électrique opposée. L'eau qui circule dans la matrice perméable déplace ces ions en solution, mais pas les ions associés aux grains, et le déplacement de ces particules chargées engendre un courant électrique. Expérimentalement on mesure ainsi

qu'une eau modérément chargée de sels, poussée à travers une roche perméable par une différence de pression de une atmosphère, produit une tension électrique de quelques dizaines de millivolts. L'intensité du courant électrique est proportionnelle à la vitesse d'écoulement et, donc, à la différence de pression entre les faces d'entrée et de sortie de l'eau.

Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses expériences de laboratoire sur des roches de différents types – granites, calcaires, grès, basaltes, etc. – et de différentes perméabilités – pores, fissures – ont affiné et quantifié cette théorie. Cet effet d'électrofiltration n'est pas une création artificielle de laboratoire : il a été révélé depuis plusieurs décennies dans la nature par des prospections qui employaient des couples d'électrodes enterrées, distantes de plusieurs dizaines, voire plusieurs milliers de mètres ; en outre, il semble lié aux fortes circulations d'eau sur les pentes des massifs montagneux ou dans les sites hydrothermaux. Toutefois cette corrélation reste qualitative, en raison de notre ignorance des écoulements souterrains. De plus, ces effets sont parfois fortement perturbés, voire masqués par le bruit électro-

tellurique naturel, qui atteint quelques millivolts à quelques centaines de millivolts par kilomètre. Les sources de ce bruit sont variées : pour l'essentiel, ce sont les courants électriques dans l'ionosphère, à 70 kilomètres d'altitude au-dessus du site, eux-mêmes engendrés par les particules chargées provenant du Soleil et par les orages atmosphériques de la planète ; des orages locaux peuvent avoir aussi une influence directe.

Malgré ces bruits naturels, et malgré les parasites artificiels – trains, lignes électriques, industries, etc. –, des géophysiciens curieux ont installé des lignes électrotelluriques dans nombre d'endroits sismiques de la planète et enregistré des perturbations de potentiel avant des séismes, notamment au Japon et en Grèce. Bien que les corrélations observées soient faibles, ces perturbations ont souvent été pressenties comme des signaux précurseurs des séismes. Des mécanismes variés ont été proposés pour les expliquer, tels des effets piézo-électriques liés aux variations de contrainte tectonique, mais l'électrofiltration reste le mécanisme privilégié, car c'est celui qui transformerait le plus efficacement de l'énergie mécanique en énergie électrique, au sein de l'écorce terrestre, baignée d'eau.

Les corrélations avec les séismes, si elles ne sont pas fortuites, résulteraient donc de fortes perturbations des circulations d'eau souterraine avant les séismes. Comme la nucléation de la rupture sismique sur une faille se produit à une dizaine de kilomètres sous la surface, les circulations de fluides précurseurs, qui seraient déclenchées par des déformations aisément rapides ou par la fracturation hydraulique entre aquifères à des pressions différentes, s'effectueraient à ces profondeurs. Comment le champ électrique associé est-il alors détectable en surface, alors qu'il décroît avec le cube de la distance ? Des instabilités de fluides, plus proches de la surface, seraient-elles alors déclenchées par ces mêmes déformations profondes ? Ce seraient sans doute des sources électriques moins puissantes...

DU LABORATOIRE AU TERRAIN

D'autre part, nous n'avons qu'une vague idée de l'importance de ces phénomènes à l'échelle de la croûte terrestre. Les seules expériences bien contrôlées concernent des échantillons de roches de quelque dix centimètres de long, avec une mesure de l'effet électrocinétique entre les faces de l'échantillon, directement là où se produit le courant (voir la figure 2) ; or les géophysiciens s'intéressent à des sources bien plus grandes, qui atteignent des centaines, voire des milliers de mètres.



1. Le mécanisme de l'électrofiltration : les ions négatifs restent fixés aux grains des roches, tandis que les ions positifs sont entraînés avec l'eau.

Pour mieux cerner ces phénomènes électrocinétiques en vraie grandeur, et passer du qualitatif au quantitatif, une équipe associant l'Institut de physique du Globe de Paris, l'École normale supérieure, le Commissariat à l'énergie atomique et le Centre de géophysique de Garchy a organisé une première expérience sur le terrain. Le site choisi fut celui du Mayet-de-Montagne, près de Vichy, où plusieurs forages dans le granite recoupent, à 200 mètres de profondeur, une zone altérée subhorizontale de quelques mètres d'épaisseur et de forte perméabilité. Lors de l'expérience, on pompait l'eau d'un des forages afin de provoquer une circulation d'eau importante, dont les effets électrocinétiques étaient enregistrés par deux magnétomètres et par un réseau de 15 électrodes installées, tant en profondeur, à proximité de la zone altérée, qu'en surface.

Après avoir résolu les multiples problèmes que pose une telle expérimentation (signaux parasites des clôtures électriques, dévidage de kilomètres de câbles à travers bois et champs, creusement de longues tranchées pour que ces mêmes câbles échappent à la curiosité masticatoire des vaches, etc.), nous avons enregistré un signal électrique qui a d'abord semblé décevant : le bruit électrique continu était de forte amplitude – 200 millivolts sur des lignes de 50 mètres de long ! – et d'une période caractéristique comprise entre 5 et 10 secondes. À ce niveau de bruit, ni le pompage ni le rééquilibrage ultérieur de l'aquifère n'enregistraient de signal perceptible.

En revanche, l'élimination des bruits parasites par un filtrage fait apparaître un signal électrique systématique dans les dix minutes qui suivent l'arrêt de la pompe, décroissant en proportion de la hauteur d'eau dans le puits, enregistrée en parallèle. Il s'agit donc bien d'un signal d'électrofiltration, avec des différences de potentiel maximales de l'ordre de 10 millivolts pour 100 mètres de distance, pour une perturbation de hauteur d'eau d'environ une atmosphère. En outre, un signal magnétique se distingue légèrement du bruit de fond au moment où l'on enregistre le signal électrique ; il faudra cependant attendre l'analyse détaillée de l'ensemble de ces données, incluant celles du magnétomètre de référence, pour conclure à un effet magnétique clairement identifié.

Ce signal n'est pas d'interprétation facile, car les différences de potentiel entre les électrodes ne décroissent pas nettement avec la distance, ce qui témoignerait d'une forte hétérogénéité des propriétés électriques du massif granitique. Dans les zones sismiques, pour les mêmes raisons d'hétérogénéité électrique de la croûte, l'éventuelle détection



2. Echantillon de roche (cylindre) où l'on fait circuler de l'eau ; une différence de potentiel électrique apparaît entre les faces d'entrée et de sortie de l'eau.



3. Descente d'une électrode dans un des puits de Mayet-de-Montagne.

d'une source électrique profonde par des réseaux d'électrodes ou de magnétomètres installés en surface ne permettra sans doute pas de localiser ni de caractériser cette source de manière précise : d'autres mesures géophysiques complémentaires seront indispensables pour comprendre les processus physiques de déformation profonde. C'est

dans cet esprit que nous établissons aujourd'hui un réseau de surveillance continue du golfe de Corinthe, dans le cadre du projet européen GAIA. L'expérience du Mayet-de-Montagne devrait faciliter les interprétations des mesures magnétotelluriques, appuyées par les observations sismologiques, géodésiques et hydrogéologiques.

Pascal BERNARD est sismologue à l'Institut de physique du Globe.

L'expérience du Mayet-de-Montagne a été réalisée par P. PINETTES, P. BERNARD, et F. CORNET de l'I.P.G.P., L. JOUNIAUX et J.-P.

POZZI de l'E.N.S., V. BARTHES du C.E.A., G. OGANESSIAN et G. NOZIERES de Garchy.

Archimède(s), l'émission franco-allemande de vulgarisation scientifique d'ARTE, présente ce sujet les mardi 4 et 11 mars à 20 heures.

Les mélanges de cartes

JEAN-PAUL DELAHAYE

Le difficile passage de l'ordre au désordre, ou les illusions du mélange.

Avec des cartes, on peut jouer à plusieurs (belote, bridge, poker, etc.), faire des patiences, réaliser des tours de magie ou faire semblant d'y déchiffrer l'avenir. On peut aussi manipuler les cartes pour le simple plaisir de découvrir des structures mathématiques. On expérimente ainsi très concrètement les notions d'ordre et de désordre : l'ordre, c'est un paquet classé, le désordre, c'est un paquet battu. Le passage du premier état au second s'appelle le mélange, moins simple à pratiquer qu'on ne le pense.

RETOUR AU DÉPART

Pour bien mélanger – croit-on – il suffit de faire n'importe quoi avec application et assez longtemps ! Erreur : un théorème de théorie des groupes indique qu'il ne faut pas trop s'appliquer. Ce théorème énonce que « tout élément d'un groupe fini possède une puissance qui est l'identité ». Appliqué aux opérations de mélange d'un jeu de cartes, qui forment un groupe fini, le théorème indique que si vous effectuez de manière répétée le même mélange, vous reviendrez toujours à votre

point de départ, c'est-à-dire à l'ordre initial du paquet. Le nombre de fois qu'il faut appliquer l'opération de mélange pour revenir au paquet initial est la *période* de l'opération.

L'opération d'inversion d'un paquet (la première carte devient la dernière, la seconde l'avant-dernière, etc.) a une période 2 : si vous inversez deux fois un paquet, vous revenez bien sûr à votre point de départ. Ce retour, le théorème l'affirme, n'est pas exceptionnel mais général.

Examinons un second exemple de mélange un peu plus intéressant et que nous appellerons le *mélange binaire*. Il comprend trois étapes :

(1) On prend le paquet dans la main, faces en dessous.

(2) On retourne la première carte et on la place à gauche sur la table, on retourne la deuxième carte et on la place à droite sur la table, et ainsi de suite alternativement à gauche et à droite, ce qui constitue deux nouveaux paquets.

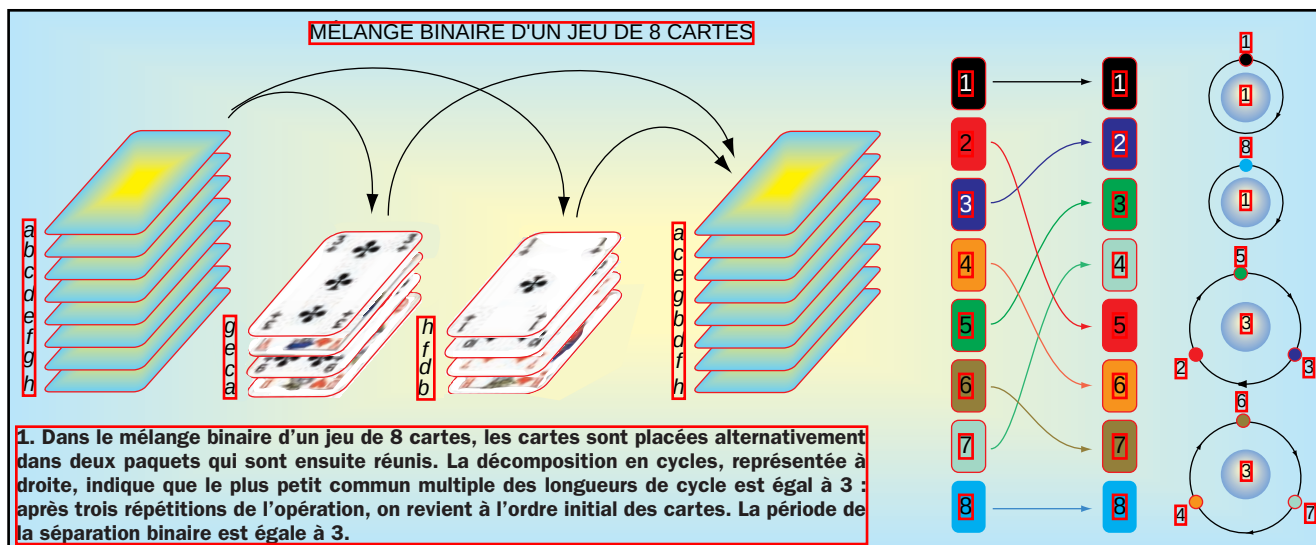
(3) Toutes les cartes ainsi disposées, on place le paquet de droite sur celui de gauche (remarquez que la carte initialement sous le paquet y subsiste, de même que la carte du dessus).

Avec un jeu de 32 cartes, cette opération, répétée cinq fois, redonne l'ordre de départ : sa période est 5. Si vous partez d'un jeu complètement classé – 7, 8, 9, 10, valet, dame, roi, as – dans l'ordre trèfles, carreaux, cœurs, piques –, après trois opérations de mélange binaire, le jeu est classé par niveaux : les quatre « 7 », puis les quatre « 8 », etc. Vous aviez cru mélanger consciencieusement le paquet, alors que vous êtes passé d'un ordre à un autre avant de revenir à l'ordre initial. Pour 52 cartes, la période du mélange binaire est 8, et le jeu est classé par niveaux après six étapes.

L'arithmétique permet d'en savoir plus sur le mélange binaire : pour 2^n cartes, la période est n . Le résultat général est que, pour un jeu de $2m$ cartes, la période est le plus petit entier p tel que $2^p - 1$ soit divisible par $2m - 1$. Le petit théorème de Fermat indique que si q est un nombre premier qui ne divise pas k , alors $k^{q-1} - 1$ est divisible par q . Ici (en prenant k égal à 2 et q égal à $2m - 1$), on obtient que, si $2m - 1$ est un nombre premier, alors $2^{2m-2} - 1$ est divisible par $2m - 1$: ainsi, lorsque $2m - 1$ est un nombre premier, $2m - 2$ opérations de mélange binaire suffisent toujours pour replacer un jeu de $2m$ cartes dans son ordre initial.

Si, dans la dernière étape du déroulement du mélange binaire, on place le paquet de gauche sur celui de droite (au lieu de droite sur gauche), on obtient une opération de mélange très différente, que nous désignerons par la *variante du mélange binaire*, dont la période est 10 avec 32 cartes. Il apparaît alors deux étapes intermédiaires où les cartes sont classées par niveaux (une fois par niveaux croissants, une fois par niveaux décroissants), et, de plus, à la fin de l'étape 5, le jeu est dans l'ordre inversé.

La période de la variante du mélange binaire avec 52 cartes est 52, et chaque



carte passe par les 52 positions possibles dans le jeu quand on effectue 52 fois l'opération. Dans le cas général pour n cartes, la période de la variante du mélange binaire pour n cartes est la période du mélange binaire.

LE MÉLANGE DESSUS-DESSOUS

Il est difficile de connaître *a priori* la période d'une opération de mélange, comme le montre l'exemple suivant, apparemment proche du précédent. Cette opération de mélange est très naturelle, car elle est rapide et ne nécessite pas de table pour poser les cartes ; nous l'appellerons le *mélange dessus-dessous* (on l'appelle parfois mélange de Monge, car Gaspard Monge s'y est intéressé en 1773).

Vous prenez le jeu dans votre main gauche, vous faites passer la première carte (celle au-dessus) dans la main droite, puis la seconde sur la première, puis la troisième sous le paquet de deux cartes que vous avez en main droite, puis la quatrième sur le paquet de trois cartes, etc. Cette fois, avec un jeu de 32 cartes, il faudra réaliser six fois l'opération avant de retrouver le classement initial du paquet. Pour un jeu de 52 cartes, la période est 12. On peut démontrer qu'avec 2^n cartes la période du mélange dessus-dessous est $n + 1$ (à comparer avec le mélange binaire).

Les opérations de mélange que nous avons considérées ont toutes une période relativement petite : on revient rapidement au point de départ. Est-ce toujours le cas ?

Pour connaître la réponse, regardons comment les cartes changent de place dans une opération de mélange. On s'aperçoit (voir les figures 1 et 2) que toute carte suit un cycle : par exemple, la carte en position 2 passe à la place numéro 5, puis à la place numéro 3, puis revient à la place numéro 2. Toute opération de mélange se décompose ainsi en cycles. Si une opération de mélange est composée d'un cycle de longueur 3 pour une carte et d'un autre de longueur 5, alors la période de cette opération est le produit de 3 et 5, c'est-à-dire 15.

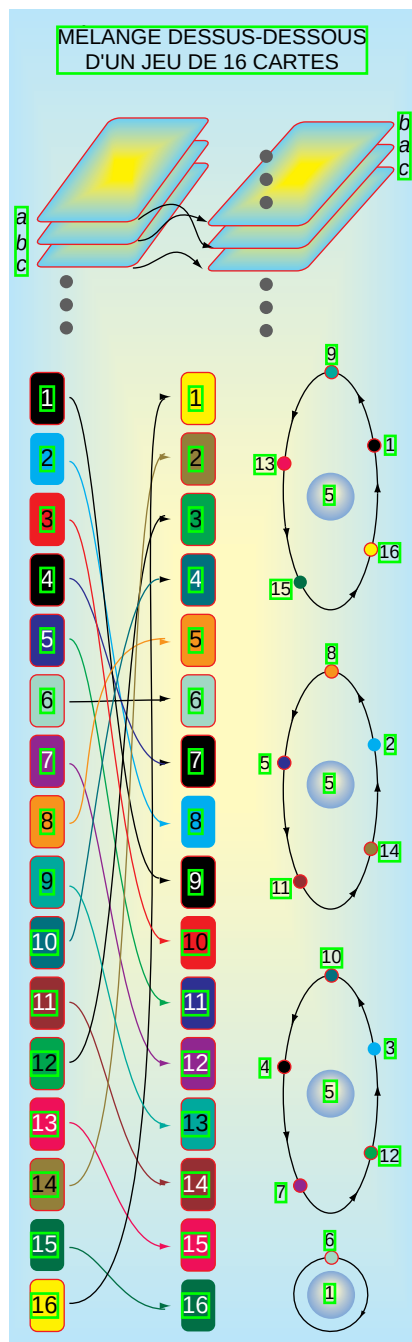
Si une opération de mélange est composée de cycles de longueur $n, m, \dots, p$, la période de cette opération est le plus petit commun multiple des entiers $n, m, \dots, p$. S'il y a des cycles de longueur 4, 5 et 6, la période sera 60 (60 est un multiple de 4, de 5 et de 6 ; de tous les multiples communs à 4, 5 et 6, 60 est le plus petit).

Comme chaque carte apparaît dans un cycle et un seul, la somme des longueurs des cycles d'un mélange d'un jeu de 32 cartes est égale à 32 (une carte

qui reste à sa place compte comme un cycle de longueur 1).

Les périodes possibles des opérations de mélange sont donc tous les nombres qui sont plus petit commun multiple d'entiers dont la somme est égale à 32. Puisque $15 + 5 + 5 + 5 + 2 = 32$, et que le plus petit commun multiple de 15, 5, 5, 5, 2 est 30, 30 est une période possible pour une opération de mélange.

Une recherche systématique dans tous les mélanges possibles montre alors que la période la plus grande possible pour un jeu de 32 cartes est



2. Dans le mélange «dessus-dessous» d'un jeu de 16 cartes, on revient à l'ordre initial après cinq répétitions de l'opération.

5 460, obtenu comme le produit des nombres 3, 4, 5, 7, 13, dont la somme est 32. Dans toute opération de mélange, on est certain de repasser par l'ordre initial avant le 5 460^e essai.

Existe-t-il des opérations de mélange simples de période 5 460 ? Oui, en voici un exemple : extraire les cartes de rang 1, 8, 13, 17 et 22 du jeu en les plaçant à la fin du jeu à mesure qu'on les enlève (la carte de rang 22 se retrouve donc dernière dans le nouveau paquet). En l'appliquant consciencieusement, vous reviendrez au classement initial au bout de 5 460 étapes, mais pas avant. Sur la figure 6, nous avons indiqué la décomposition en cycles de cette opération de mélange.

Pour le jeu de 52 cartes, la période maximale d'une opération de mélange est 180 180 qui est le produit des nombres 4, 5, 7, 9, 11, 13. Leur somme fait 49, car pour 49, 50, 51 et 52 la période maximale est la même (voir la figure 3). Une opération simple ayant cette période consiste à extraire du jeu les cartes de rang 4, 7, 12, 19, 28, 34 en les plaçant à la fin du jeu au fur et à mesure qu'on les enlève. Dans cette opération, il y a trois cycles de longueur 1 qui, avec les autres cycles, donnent le total de 52 attendu. Avec cette opération de mélange à raison d'une opération par minute et en mélangeant huit heures par jour, il vous faudra plus d'un an pour revenir à l'ordre initial.

LA REMISE EN ORDRE CERTAINE

Attention ! Nous n'affirmons pas qu'après avoir appliqué 5 460 fois un mélange dans un jeu de 32 cartes (ou 180 180 fois dans le cas d'un jeu de 52 cartes), nous obtiendrons alors la position de départ : le plus souvent, nous y serons revenus avant et nous n'y serons donc plus nécessairement au coup 5 460 (ou 180 180). Se pose donc la question de savoir s'il existe un nombre n tel que, quelle que soit l'opération de mélange choisie pour un jeu de 32 cartes (ou 52), on soit certain, en l'appliquant n fois exactement, de revenir au point de départ.

La réponse est oui. Ce nombre n est le plus petit commun multiple (encore !) des périodes de toutes les opérations de mélange possibles. Le calcul indique que ce nombre est :

$$2^5 \times 3^3 \times 5^2 \times 7 \times 11 \times 13 \times 17 \times 19 \times 23 \times 29 \times 31 = 144\,403\,552\,893\,600.$$

Pour le jeu de 52 cartes, le nombre correspondant est :

$$2^5 \times 3^3 \times 5^2 \times 7^2 \times 11 \times 13 \times 17 \times 19 \times 23 \times 29 \times 31 \times 37 \times 41 \times 43 \times 47 = 3\,099\,044\,504\,245\,996\,706\,400.$$

TAILLE DU PAQUET	PLUS LONGUE PÉRIODE POSSIBLE	TAILLE DES CYCLES
2	2	2
3	3	3
4	4	4
5-6	6	2 3
7	12	3 4
8	15	3 5
9	20	4 5
10-11	30	2 3 5
12-13	60	3 4 5
14	84	3 4 7
15	105	3 5 7
16	140	4 5 7
17-18	210	2 3 5 7
19-22	420	3 4 5 7
23-24	840	3 5 7 8
25-26	1260	4 5 7 9
27	1540	4 5 7 11
28	2310	2 3 5 7 11
29	2520	5 7 8 9
30-31	4620	3 4 5 7 11
32-33	5460	3 4 5 7 13
34-35	9240	3 5 7 8 11
36-37	13860	4 5 7 9 11
38-39	16380	4 5 7 9 13
40	27720	5 7 8 9 11
41	30030	2 3 5 7 11 13
42	32760	5 7 8 9 13
43-46	60060	3 4 5 7 11 13
47-48	120120	3 5 7 8 11 13
49-52	180180	4 5 7 9 11 13

3. Périodes maximales possibles en fonction du nombre de cartes. En utilisant un jeu de 52 cartes, par exemple, on sait construire avec les cycles de 3, 5, 7, 9, 11, 13, une opération de mélange du jeu qui ne revient pas à l'ordre initial avant 180 180 coups.

La conclusion de tout cela est que, pour vraiment mélanger un jeu, ce qui est notre but ultime, il faut utiliser plusieurs méthodes différentes. Une seule ne permet jamais d'atteindre plus de 5 460 classements différents, ce qui est très peu en regard des 32! (= 263 130 836 933 693 530 167 218 012 160 000 000) classements possibles différents d'un jeu de 32 cartes (pour 52 cartes, la situation est pire).

Mettre vraiment en désordre un jeu n'est pas possible avec une seule opération de mélange répétée : avec une activité trop organisée, nous ne pourrions jamais atteindre le désordre.

Se pose donc maintenant la question : existe-t-il des ensembles d'opérations de mélange qui donnent n'importe quel classement ? La théorie des groupes propose de répondre oui.

UN ENSEMBLE DE 31 MÉLANGES SUFFISENT

La théorie des mélanges indique une famille de 31 mélanges élémentaires qui permet de tout faire : c'est la famille des 31 échanges de deux cartes voisines («échange des cartes 1 et 2», «échange des cartes 2 et 3», etc.). Avec ces 31 opérations de mélanges utilisées soigneusement, on peut tout faire.

Pouvoir tout faire veut dire qu'en appliquant uniquement ce type de mélange

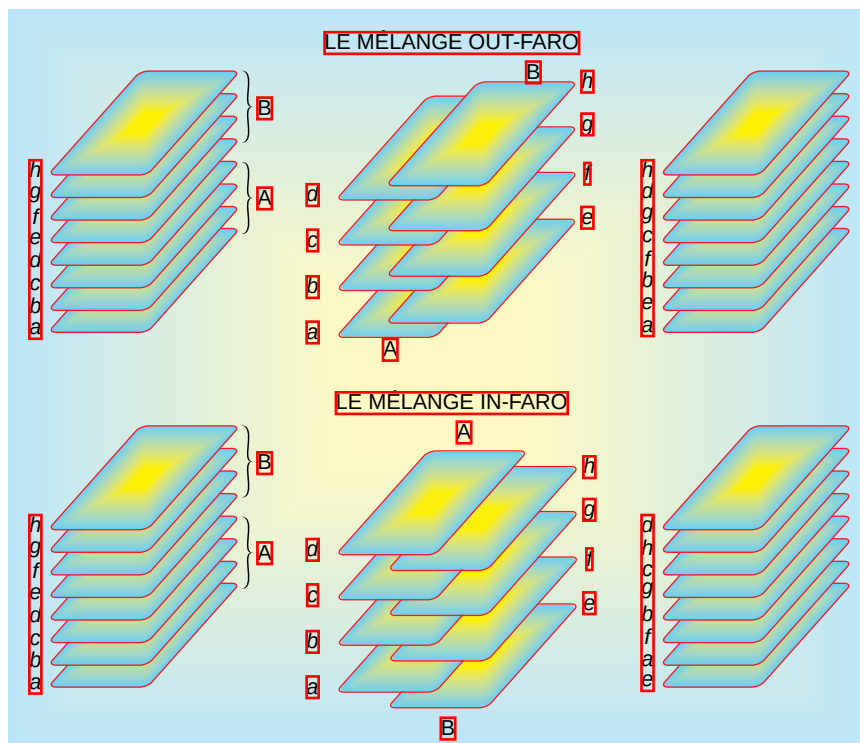
(une opération mélangeant très peu, puisque deux cartes uniquement sont déplacées à chaque fois), on peut passer de n'importe quel classement à n'importe quel autre : ces 31 mélanges constituent un système de générateurs du groupe de tous les mélanges. Bien sûr, ce résultat se généralise aux autres valeurs que 32.

La démonstration de ce résultat tient en quelques lignes. Vous partez d'un certain classement et vous voulez arriver à un autre. Imaginons que la carte qui doit être placée en position 1 soit, au départ, en position 15. Vous la rapprochez petit à petit en l'échangeant avec la carte en position 14 (ce qui consiste à utiliser l'opération de mélange «échange des cartes 14 et 15»), puis avec la carte de position 13, etc. Une fois la première carte en place, vous vous occupez de la seconde, puis de la troisième, etc. Vous obtenez le classement voulu en ayant utilisé au plus $31 + 30 + 29 + \dots + 1 = 496$ opérations de mélanges du type échange de deux cartes voisines.

Ce nombre de $31 + 30 + \dots + 1 = 496$ est celui qui vous sera nécessaire par cette méthode pour effectuer l'opération d'inversion du paquet, car, pour amener la dernière carte en position 1, vous devez utiliser 31 échanges ; la dernière carte sera alors celle qu'il faudra mener en position 2, et donc il faudra faire 30 échanges pour la placer, etc.

Une mise en garde doit être formulée. Puisqu'il n'y a que 31 échanges de cartes voisines, si vous en effectuez par exemple 496, vous utilisez plusieurs fois les mêmes échanges ; aussi, en regroupant ces échanges deux à deux, ce qui revient à ne rien faire, vous pourriez diminuer le nombre total d'échanges opérés et passer de 496 à 31 au plus. Votre raisonnement serait juste si le groupe des opérations de mélange était commutatif, ce qui n'est pas le cas : faire A, puis B ne revient pas toujours à faire B, puis A. Cette non-commutativité interdit donc les regroupements envisagés, et l'on démontre qu'ici 496 ne peut être réduit.

Il faut noter que, même si ce résultat indique comment mélanger vraiment des cartes, il ne change rien à la remarque formulée précédemment indiquant que, si on fait quelque chose de trop organisé, on n'obtient jamais de désordre à partir de l'ordre : pour obtenir un mélange d'un paquet de cartes, vous pouvez utiliser des échanges de cartes voisines, mais il faut en prendre un assez grand nombre et les prendre désordonnées pour obtenir un vrai désordre. Pour obtenir du désordre, il faut quelque part l'introduire explicitement : des choses ordonnées combinées



4. Mélange out-faro (en haut) de période 5 et mélange in-faro (en bas) de période 10 (pour un jeu de 32 cartes). Ces types de mélanges, parfois appelés en mitraille, sont utilisés par les joueurs professionnels à des fins que la morale réprouve.

entre elles de façon ordonnée ne peuvent pas produire rapidement un vrai désordre. Ce principe général constaté ici ne doit pas surprendre, car il admet des versions mathématisées. On les démontre en utilisant la théorie de la complexité algorithmique (qui est la théorie fondée sur l'idée que les objets aléatoires sont ceux dont on ne peut pas donner de description courte).

LE MÉLANGE PHARAON

Les tricheurs professionnels et les prestidigitateurs utilisent une opération de mélange qui ne peut être réussie qu'après un long entraînement et avec un jeu en bon état : le *mélange pharaon* ou *mélange parfait*. Il consiste à insérer l'une dans l'autre les deux moitiés d'un jeu coupé en deux. Ce mélange ressemble au *mélange en mitraille* qui, entre des mains non expertes, constitue effectivement une bonne méthode de mélange, car on n'effectue pas la même opération à chaque fois : on ne coupe pas au même endroit et on insère les deux moitiés irrégulièrement (par exemple deux cartes du tas de droite, puis trois du tas de gauche, puis une du tas de droite etc.). Des études mathématiques établissent que, pour bien mélanger un jeu de 52 cartes par le *mélange en mitraille*, il faut l'effectuer six ou sept fois au moins.

Le cartomane bien entraîné, lui, réussit d'abord à séparer le paquet exactement en son milieu, puis à insérer l'une dans l'autre de manière parfaite les deux moitiés du jeu : les cartes des demi-paquets de droite et de gauche alternent donc régulièrement. Comme on ne soupçonne pas que cette perfection soit possible, le procédé est très efficace pour tricher.

Il existe deux versions du *mélange pharaon*, celle où l'alternance obtenue préserve la carte du dessus – appelée *out-faro* – et celle où la carte de dessus est passée seconde (c'est donc la première carte de la moitié du dessous qui se retrouve en première position après l'opération de mélange), appelée cette fois *in-faro* (voir la figure 4).

Le *out-faro* est l'opération inverse de l'opération considérée tout à l'heure (appelée mélange binaire) : si vous effectuez l'une, puis l'autre, vous revenez au paquet initial. Il en résulte que le *out-faro*, pour un jeu de 32 cartes, a une période de 5, et une période de 8 pour un jeu de 52 cartes (une opération a toujours la même période que son opération inverse). On en déduit aussi qu'avec un jeu de 32 cartes, quatre *out-faro* équivalent à un mélange binaire, et quatre mélanges binaires donnent un *out-faro*.

ALGÈBRE DU JEU DE 32 CARTES

MÉLANGE BINAIRE : MB ;
OUT-FARO : OF ; IN FARO : IF

(MB puis MB puis MB puis MB puis MB) = RIEN

(OF puis OF puis OF puis OF puis OF) = RIEN

(IF puis IF puis IF puis IF puis IF) = INVERSION

(INVERSION puis INVERSION) = RIEN

(OF puis MB) = (MB puis OF) = RIEN

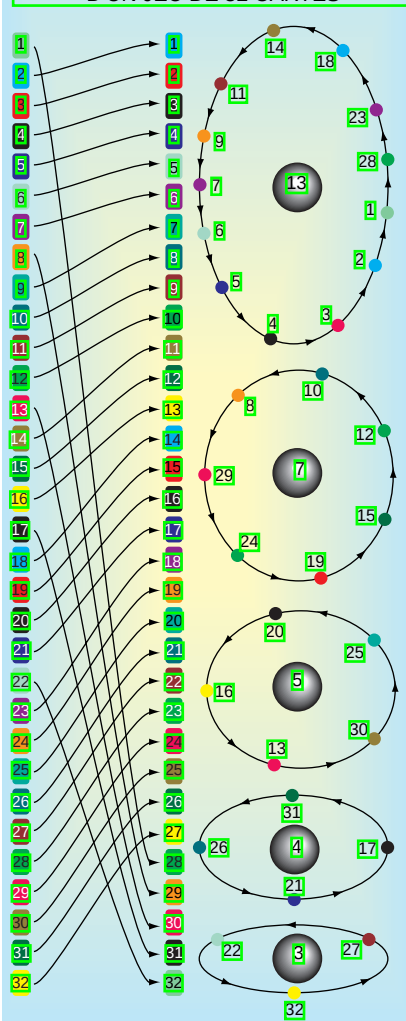
(MB puis MB) = (OF puis OF puis OF)

Pour amener la carte du dessus en position numéro 13 (on numérote à partir de zéro : on décompose 13 en base 2 : $13 = 1101$, on fait successivement :

IF puis IF puis OF puis IF
1 1 0 1

5. Les opérations de mélange se combinent selon une algèbre dont nous avons écrit quelques règles. RIEN est l'élément neutre, l'inversion est une racine carrée de RIEN, OF une racine cinquième, IF une racine dixième.

MÉLANGE DE PLUS GRANDE PÉRIODE D'UN JEU DE 32 CARTES



6. Avec un jeu de 32 cartes, le mélange de plus longue période consiste à extraire successivement les cartes de rang 1, 8, 13, 17, 22 et à les placer en dessous. Ce mélange est de période $13 \times 7 \times 5 \times 4 \times 3 = 5\,460$.

Vous le soupçonniez sans doute, l'opération inverse du *in-faro* est la variante du mélange binaire. La période du *in-faro* est donc de 10 pour 32 cartes et de 52 pour 52 cartes, ce que l'on peut constater directement en effectuant les manipulations.

Voici une façon de tricher en utilisant le *out-faro*. Imaginons que vous jouiez à quatre à un jeu où, en utilisant les 52 cartes, on commence par les distribuer toutes par la méthode habituelle (une par une en tournant), ce qui donne 13 cartes pour le joueur à ma gauche A, puis son voisin B, puis son voisin C et enfin moi. En ramassant les cartes, vous préparez discrètement le jeu en mettant, à partir du haut du paquet, les 13 cartes que vous voulez donner au joueur A, suivies des 13 que vous voulez pour B, suivies des 13 pour C et enfin de celles que vous voulez pour vous. Vous pouvez aussi vous contenter de regarder les cartes et d'en retenir certaines, ce qui vous donnera un avantage sérieux. Vous battez deux fois les cartes en utilisant le *out-faro*, et vous distribuez les cartes. Elles seront exactement comme vous le vouliez, car la distribution en quatre, carte par carte, équivaut à deux mélanges binaires que les deux *out-faro* ont par avance annulés. Souvent on doit faire couper le jeu par son voisin avant de distribuer, mais on peut oublier ou utiliser une méthode de *fausses coupes* ou encore *forcer la coupe* là où cela arrange.

Les deux opérations de *out-faro* et de *in-faro* ne constituent pas un système de générateurs, comme les 31 opérations de mélange vues tout à l'heure. En revanche, à elles seules, elles permettent de déplacer la carte du dessus à l'emplacement qu'on veut dans le jeu selon la méthode suivante due à Alex Emsley : pour amener la carte du dessus en position k dans un jeu de $2m$ cartes dont on numérote toutes les positions de 0 jusqu'à $2m - 1$, on décompose k en base 2 (par exemple, $6 = 110$), on interprète les «1» comme «in» et les «0» comme «out», et l'on effectue, de la gauche vers la droite, les opérations de *in-faro* et de *out-faro* correspondantes (pour notre exemple donc : *in-faro*, *in-faro*, *out-faro*). On imagine le parti qu'on peut tirer de ce résultat pour tricher ou faire des tours de prestidigitation.

UN MÉLANGE AVEC DÉCOUPE

Alors que les mélanges que nous avons évoqués traitent tous de cartes qu'on garde entières, voici maintenant un tour amusant qu'on réalise en mélangeant des

cartes que l'on découpe. Ce tour peut être réalisé avec toutes sortes d'objets identiques (même tridimensionnels), à condition d'avoir un outil pour les découper en tranches : des statuettes identiques avec une bonne scie conviendraient.

Prenez entre 5 et 10 cartes identiques (ou des photos, etc.). Pour un tour en public, il faut utiliser de grandes cartes de 20 centimètres de haut, par exemple.

Formez une file avec les cartes en prenant soin de mettre toutes les cartes dans le même sens (si elles possèdent un haut et un bas).

Demandez à un spectateur de découper chacune des cartes en tranches (de

deux à cinq pour chaque carte) à l'aide de coups de ciseaux horizontaux. À chaque fois qu'il découpe une carte, il en remet les tranches dans l'ordre dans la file. Vous lui demandez ensuite de mélanger les tranches en opérant de la manière suivante : il prend alternativement une tranche en haut de la file et une tranche en bas et recompose ainsi, à côté de la première, une nouvelle file de tranches de cartes. Cette file est doublement mélangée, puis qu'il a choisi lui-même les découpes et qu'il a fait alterner des bouts provenant du haut avec d'autres provenant du bas.

Vous annoncez alors que, grâce à la puissance persuasive de votre pensée,

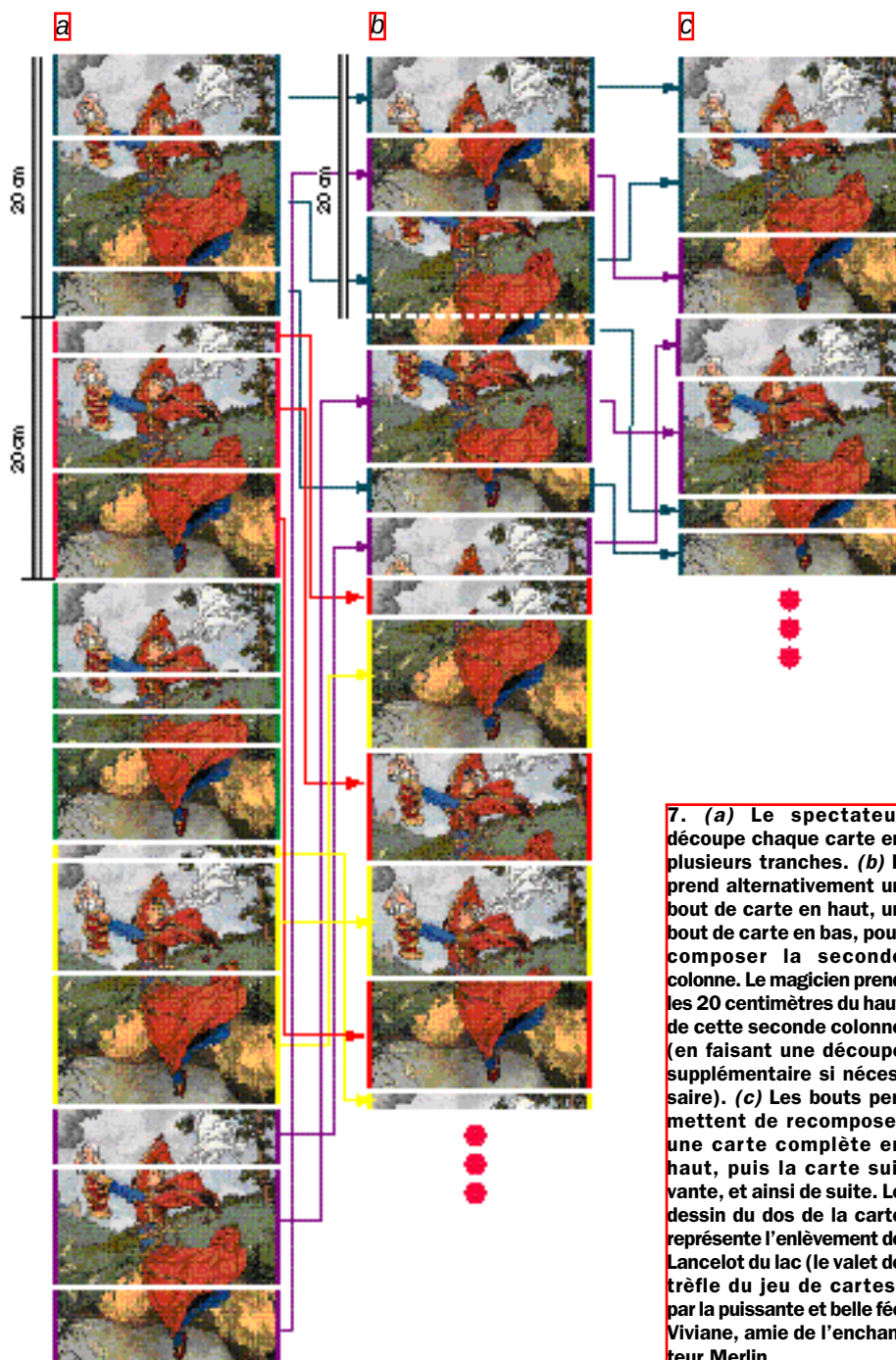
vous avez forcé le spectateur à découper soigneusement les cartes en des endroits précis et à les mélanger d'une telle façon que les morceaux se recomposent en cartes complètes.

Vous prenez une règle (ou un objet pouvant vous indiquer la hauteur d'une carte), vous mesurez 20 centimètres de la file en haut et, en effectuant une découpe de plus si nécessaire, vous prenez cette longueur de 20 centimètres de la file de tranches de cartes (qui sera constituée de deux à six tranches de cartes venant de cartes différentes).

Miracle ! Quand vous les disposez sur la table, elles se complètent exactement pour former une carte entière. L'effet est maximal si un dessin figure sur la carte, comme un personnage debout ou un paysage. Vous pouvez poursuivre plusieurs fois en prenant 20 centimètres de tranches en haut de la file restante ; à chaque fois, les bouts se recomposent exactement pour former une carte entière (voir la figure 7).

Ce tour ne demande aucun trucage ni aucune manipulation (physique ou mentale !), car il est basé sur un principe mathématique qui assure qu'il marchera à chaque fois. Ce principe est la version généralisée aux variables continues du principe de Gilbraith, principe que nous avons déjà traité (voir *Pour la Science*, mai 1996) et dont la démonstration alors indiquée s'adapte facilement.

Là encore, bien que l'insertion entre les tranches venant du haut de la file et celles venant du bas de la file apparaisse aléatoire (le spectateur ayant lui-même choisi la taille et le nombre des tranches) elle ne l'était qu'en apparence : l'opération de mélange ne mélange pas.



7. (a) Le spectateur découpe chaque carte en plusieurs tranches. (b) Il prend alternativement un bout de carte en haut, un bout de carte en bas, pour composer la seconde colonne. Le magicien prend les 20 centimètres du haut de cette seconde colonne (en faisant une découpe supplémentaire si nécessaire). (c) Les bouts permettent de recomposer une carte complète en haut, puis la carte suivante, et ainsi de suite. Le dessin du dos de la carte représente l'enlèvement de Lancelot du lac (le valet de trèfle du jeu de cartes) par la puissante et belle fée Viviane, amie de l'enchanteur Merlin.

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.
e-mail : delahaye@lil.fr

J. BEASLEY, *The Mathematics of Games*, Oxford University Press, Oxford, 1989.

J.-P. DELAHAYE, *Jeu avec des cartes bifaces*, in *Pour la Science*, mai 1996.

J. HUGARD et F. BRAUE, *Expert Card Technique : Close-Up Table Magic*, Dover Publication, New York, 1974.

R. VOLMER, *Les trésors du pharaon*, éditions du spectacle, 6 rue de la Klebsau, 67100 Strasbourg, 1988.

R. VOLMER, *Le principe de Gilbreath*, éditions du spectacle, 1991.

P. DIACONIS, R.L. GRAHAM et W.M. KANTOR, *The Mathematics of Perfects Shuffles*, in *Advances in Applied Mathematics*, 4, 1983, pp. 175-196.

J. CONWAY et R. GUY, *The Book of Numbers*, Springer-Verlag, New York, 1996.

Les insectes orfèvres

Hubert Duprat a la curiosité des amateurs des cabinets de curiosités : la plus étonnante de ses œuvres est celle qu'il fait réaliser par des larves de trichoptères, insectes des ruisseaux et des mares. À mi-chemin entre un artefact animal, un bijou et une sculpture, les créations d'Hubert Duprat sont les produits d'expériences scientifiques.

Les trichoptères, plus communément nommés phryganes, sont des insectes dont les larves aquatiques sont enfermées dans des fourreaux. L'animal se métamorphose lors de la nymphose, dans l'étui fermé à cet effet. L'adulte ressemble à un papillon de nuit. Les larves sont récoltées entre le mois de janvier et le mois d'avril dans les ruisseaux de basse et de moyenne montagne ; elles sont conservées dans un aquarium où l'eau est oxygénée, brassée et maintenue à -4 °C. Cet hiver artificiel prolonge la période de construction du fourreau et diffère la métamorphose.

L'étui a plusieurs fonctions : minéral, il lesté l'animal dans les eaux courantes. Dans les eaux stagnantes, l'air contenu fait que l'animal flotte. Dans la nature, l'étui est confectionné avec du sable, des petits graviers, des brindilles, des débris de coquilles. L'art d'Hubert Duprat consiste à remplacer les matériaux naturels par des matériaux précieux, contraignant l'animal à construire des étuis avec des paillettes d'or, des turquoises, des opales, des perles ou de petites tiges d'or (les étuis mesurent environ deux centimètres de longueur).

L'animal relie les matériaux à l'aide d'un fil de soie qu'il sécrète selon un mouvement hélicoïdal, et dont il tapisse l'intérieur du tube. Chaque matériau étant dans un bac séparé,

l'artiste contrôle, en fonction de la durée du séjour dans tel ou tel bac, la composition des anneaux de croissance de l'étui. L'animal n'utilise pas tous les matériaux avec la même affinité, et il préfère les perles. Son savoir-faire constructeur est canalisé à des fins esthétiques.

De telles expériences ont déjà été tentées. François-Jules Pictet rapporte dans ses *Recherches pour servir à l'histoire et à l'anatomie des phryganides* (1834) «quelques essais pour voir à quel point on peut faire travailler des espèces avec des matériaux qui ne sont pas les leurs». Jean-Henri Fabre, dans ses *Souvenirs entomologiques* décrit des expériences réalisées sur l'espèce *Limnephilus flavicornis*, à qui il donne des grains de riz : il s'extasie devant «l'ouvrage régulier» qui en résulte.

L'entomologiste américain Charles Brues a observé des phryganes dans une rivière du Nord du Nevada : les animaux y sélectionnent des opales d'un bleu brillant. Ainsi les matériaux ne seraient pas seulement choisis en fonction de leur poids ou de leur texture. Enfin, l'entomologiste français Christian Denis a étudié les conséquences de la modification expérimentale du milieu naturel, par exemple de la modification de la taille des grains de sable ou encore de l'intensité de la lumière.

Architecte divin, insecte constructeur, ingénieux bâtisseur de sa demeure, l'insecte artisan nourrit la littérature entomologique. En plongeant les phryganes dans des conditions inhabituelles, H. Duprat détermine un comportement nouveau et espère des réactions inattendues, mais l'étui précieux de la phrygane est-il œuvre de l'insecte ou œuvre de l'artiste ?

Christian BESSON, Université de Bourgogne



Les étuis précieux des phryganes sont exposés au Centre Georges Pompidou, à Paris, à partir du 19 février 1997, dans le cadre de l'exposition *L'Empreinte*.



Henri DEL OLMO



Agronomie

Le génie génétique. De l'animal à l'homme?

Louis-Marie Houdebine.
Éditions Flammarion, 1996.

Cet ouvrage sera à l'évidence d'une grande utilité pour qui désire intégrer dans sa culture scientifique d'honnête homme des éléments de compréhension à la fois simples et justes des principes du génie génétique et de leur application aux animaux. Sa lecture fait d'abord mesurer combien, après James Watson et Francis Crick, l'humanité s'est enrichie, en quelques courtes décennies, d'un vocabulaire totalement nouveau, celui de la biologie moléculaire.

Dans son ouvrage *La statue intérieure*, François Jacob évoque les séances du «comité de terminologie», créé alors par André Lwoff, pour désigner d'un nom les phénomènes et les objets que l'équipe était en train de découvrir : «Ainsi nommées, les choses prenaient aussitôt une réalité nouvelle. Elles existaient!» À l'évidence, les biologistes moléculaires sont devenus des experts en mécanique, sachant désigner avec précision les fonctionnements, rouages et interactions qui sous-tendent les phénomènes de reproduction et de multiplication cellulaires, avec leurs systèmes d'autocorrection, de protection et de rétroaction...

La progression du texte de Louis-Marie Houdebine aide le non-spécialiste à intégrer une batterie impressionnante de néologismes – introns, exons, transposons, triplets, plasmides, ligases, enzymes de restriction –, à identifier les phénomènes couverts par les termes apparemment proches que sont réplication et transcription, ou encore à repérer l'opération que constitue l'épissage. Les enseignants puiseront dans ce texte des idées de schémas particulièrement pédagogiques, qui illustrent un texte volontairement décanté. Et ce n'est pas là un moindre mérite de l'auteur.

Muni des connaissances acquises dans la première moitié de l'ouvrage, le lecteur est introduit aux enjeux du génie génétique appliqué aux animaux. Le contraste est remarquable entre l'unicité des mécanismes moléculaires intracellulaires, du virus et de la bactérie à l'être humain, d'une part, et la diversité des modalités de mise en œuvre du génie génétique, d'autre part. Ces pages insistent fort justement sur cette diversité et esquissent,



Trois de ces lapins sont transgéniques : on leur a donné le gène de l'antitrypsine alpha 1 humaine.

sur la base de quelques exemples, les éléments d'une balance raisonnée entre les avantages et les risques. Le débat public qui s'engage, à propos des organismes génétiquement modifiés, ne peut que gagner en clarté en faisant son profit de ce souci d'approche méthodique.

Par exemple, L.-M. Houdebine souligne que le génie génétique permet de faire produire des «protéines recombinantes» d'intérêt médical par des micro-organismes ou même par des animaux transgéniques (dans leur lait), avec beaucoup plus de sécurité que par les procédés classiques (le cas de l'hormone de croissance est cruellement éloquent!). Il décrit les espoirs concernant la préparation d'organes animaux en vue de leur greffe chez l'homme, mais sous réserve que l'on vérifie l'absence de transmissions virales entre l'animal et l'homme. Il montre aussi que la sélection des races animales assistée par marqueurs moléculaires et micro-satellites pourra opérer de manière moins aveugle et plus précise que la sélection quantitative classique, par exemple sur des caractères de résistance aux maladies ou de qualité des produits, lait et viande.

Ces nouveaux moyens doivent être mis en perspective dans le temps long de la domestication des espèces animales par l'homme à son service. Toutefois l'auteur n'élude pas que les interrogations sont peut-être, là encore plus cruciales, que sur les végétaux : les travaux réussis sur l'animal inquiètent dans la mesure où ils sont transposables à l'homme, cet autre animal... Et il insiste particulièrement sur la prudence à adopter vis-à-vis de la transgénèse réalisée sur les cellules germinales, dans la mesure où il s'agit d'une opération irréversible.

L'ouvrage se termine par un appel à un débat raisonné pour trier entre les interdits éthiques et les fantasmes, pour évaluer les risques à prendre, tout bien pesé... Sans frilosité ni témérité. Ce sont les derniers mots de l'auteur!

Jean-Claude FLAMANT

Physique

La quête de l'unité (l'aventure de la physique)

Étienne Klein et Marc Lachièze-Rey.
Éditions Albin Michel, 1996.

Dans ce livre clair, accessible à un large public, remarquablement documenté et témoignant d'une vaste culture scientifique, littéraire et philosophique, les deux auteurs abordent les questions les plus incisives de la science contemporaine. Le cosmologiste Marc Lachièze-Rey et le physicien, spécialiste des accélérateurs, Étienne Klein ont gagné le pari «qu'il y a à se mettre à deux pour écrire sur l'Un». Ils ont si bien entremêlé leurs proses respectives que même quelqu'un qui, comme moi, les connaît bien tous les deux se trouve incapable de dire avec certitude qui a écrit quoi.

Les deux auteurs n'essaient pas de promouvoir une thèse épistémologique ; ils ne proclament pas la mort de Newton, de Darwin, de Marx ou de Freud. Ils témoignent simplement des interrogations qu'ils partagent avec la communauté scientifique à laquelle ils appartiennent. Au cours d'un pertinent détour historique émaillé de belles citations (il y en a pour tous les goûts. Bachelard : «La science n'est pas le pléonasme de l'expérience», p. 58 ; Balzac, pour qui l'harmonie est «la poésie de l'ordre», p. 38 ; Victor Hugo : «Tous les oiseaux qui volent ont à la patte le fil de l'infini», p. 147, et



La théorie électrofaible est orpheline depuis la disparition récente d'Abdus Salam.

même l'Ecclésiaste, qui considère comme une présomption de vouloir «faire tenir l'infini dans un cadre de trois doigts», p. 165), ils montrent que ces interrogations sont un écho des questions fondamentales qu'ont posées les grands penseurs du passé.

La quête de l'unité est le fil conducteur de toutes les interrogations de la physique moderne : émergence du concept d'Univers, statut de la réalité quantique, rapprochement de la physique des particules et de la cosmologie, unification des interactions fondamentales, spéculations au sujet d'un «principe anthropique», recherche d'une éventuelle «théorie de tout», validité du réductionnisme, signification de la théorie de la renormalisation et de l'invariance de jauge en théorie quantique des champs. Il est remarquable que les auteurs soient arrivés à aborder toutes ces questions, avec honnêteté, sans en gommer les difficultés, mais en s'efforçant d'en faire percevoir la portée à un public de non-spécialistes. Ils ont, me semble-t-il, bien situé le cœur du problème dans la distinction qu'il convient d'établir entre le réductionnisme *constitutif* de la physique et le «constructionnisme», qui aurait l'ambition de reconstruire les niveaux supérieurs entièrement à partir des lois du niveau inférieur. Que le constructionnisme soit partout en échec, c'est une évidence, mais cet échec ne porte aucunement atteinte au réductionnisme. J'ai, à ce propos, une opinion légèrement différente de celle des auteurs : pour eux, le réductionnisme est en échec là où s'arrête la physique ; je pense, au contraire, que le réductionnisme est constitutif de l'ensemble de l'entreprise scientifique, biologie comprise. Je suis d'accord avec François Jacob lorsqu'il dit, dans *La logique du vivant* : «Devant le développement de la science expérimentale, de la génétique, de la biochimie, on ne peut plus, sinon par mystique, invoquer sérieusement quelque principe d'origine inconnue, un X échappant par essence aux lois de la physique, pour rendre compte des êtres vivants et de leurs propriétés.» Pas plus qu'en physique, le réductionnisme constitutif n'est en échec en biologie ; ce qui y est en échec, de façon beaucoup plus flagrante qu'en physique, c'est bien sûr le constructionnisme. Pour que la quête de l'unité soit un principe directeur fécond, pour que ses «étapes provisoires [soient] la pâte même de la science, et son combustible principal», pour que «l'unité de la physique soit en actes», il faut bien que la science s'accommode de la validité du réductionnisme et de l'échec du constructionnisme. Les auteurs ont bien montré que l'impossibilité du constructionnisme peut

être prise, au positif, comme la possibilité d'un certain «isolationnisme», c'est-à-dire d'une certaine autonomie des lois des niveaux supérieurs par rapport aux lois des niveaux inférieurs. Quelle belle leçon de dialectique !

Bref, un livre à mettre entre toutes les mains.

Gilles COHEN-TANNOUDJI

Médecine

La médecine du XX^{e} siècle

Axel Kahn et Dominique Rousset.
Éditions Bayard, 1996.

Axel Kahn est médecin, c'est un chercheur connu et respecté en génétique humaine, membre du Comité national d'éthique. À ce double titre, les positions qu'il prend ont un juste retentissement, et les avis qu'il donne méritent une attentive considération, surtout quand ils portent sur sa spécialité.

C'est pourquoi le livre qu'il vient de publier, avec le journaliste Dominique Rousset, attirera l'attention de tous ceux qui s'intéressent aux applications médicales de la génétique et à l'évolution de l'éthique médicale.

Son livre a pour sous-titre : «Des gènes et des hommes» ; peut-être eût-il été plus explicite de dire : «Des bons et des mauvais usages de la génétique en médecine.» Le livre, en effet, à côté d'un grand nombre d'autres sujets, aborde trois thèmes principaux en insistant sur les risques potentiels : l'eugénisme, la procréation médicale assistée, la médecine prédictive. Ces thèmes sont au cœur des préoccupations médicales, et l'Académie de médecine, en 1995-1996, a consacré de volumineux rapports aux deux derniers.

A. Kahn explique tout d'abord pourquoi, en l'état actuel de nos connaissances, l'eugénisme ne pourrait pas être mis en œuvre même si on le souhaitait, mais il souligne surtout que de telles manipulations génétiques, si jamais elles devenaient possibles, seraient plus nuisibles qu'utiles. En effet, la seule amélioration qui aurait un intérêt serait l'accroissement des capacités mentales ; celles-ci dépendant d'un très grand nombre de gènes et de l'interaction de ceux-ci avec l'environnement, il est inconcevable d'y parvenir. De plus, toute tentative dans ce sens réduirait ce qui fait la richesse du génome humain : sa diversité, qui rend possible l'adaptation

ARCH!MEDE

Le magazine scientifique d'ARTE



AU MOIS DE MARS :

Mardi 4 mars à 20 h :

Microcinéma.

La sismologie en laboratoire.

Comment nouer des lacets.

Les carrés gréco-latins.

La succession des empereurs.

Mardi 11 mars à 20 h :

La dérive des continents.

La prévision des séismes.

Les pulsars.

Les nœuds.

Mardi 18 mars à 20 h :

La mouche tueuse.

Résistances.

Quand le cerveau fait des calculs.

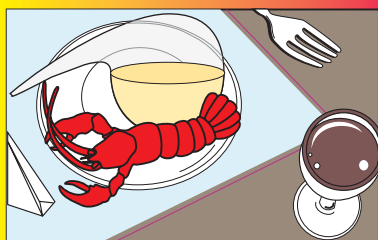
arte

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 24 mars 1997.



à des conditions diverses et changeantes. Toute sélection génétique appauvrirait cette diversité en privilégiant un caractère. La seule situation où une manipulation génétique est concevable est celle des maladies monogéniques, c'est-à-dire celles qui sont dues à la mutation d'un seul gène. Il y en a peu (une centaine). On pourrait concevoir de remplacer le mauvais gène par un bon gène, dans l'œuf, mais il existe, heureusement, une méthode beaucoup plus simple et qui évite toute manipulation génétique : la fécondation *in vitro* assortie d'un diagnostic pré-implantatoire permettant de reconnaître parmi les embryons, quand ils ne sont composés que de quelques cellules, ceux qui sont porteurs du bon gène et de n'implanter qu'eux. Ainsi l'eugénisme par manipulation génétique est, soit irréalisable, soit inutile. Peut-on concevoir des troubles paucigéniques où il serait réalisable et utile ? A. Kahn n'évoque pas ce problème qui, à vrai dire, n'est pas d'actualité.

Alors que les discussions sur le faux problème de l'eugénisme préoccupent l'opinion, on parle peu de la procréation médicale assistée qui, elle, pose cependant de vrais problèmes. La fécondation *in vitro* est un événement important sur le plan culturel, puisqu'elle rend possible la procréation sans rapport sexuel ; en revanche, elle n'introduit que peu d'innovation biologique, puisque des millions de spermatozoïdes se pressent autour de l'ovocyte et qu'un seul parvient à y pénétrer. La situation est très différente dans les cas où cette technique est inefficace (parce que les spermatozoïdes ne parviennent pas à pénétrer l'ovocyte) et où l'on utilise une autre technique (l'ISCI), afin d'injecter un spermatozoïde dans l'œuf. En agissant ainsi, l'homme transgresse une règle biologique : la sélection opérée par l'ovocyte, qui ne laisse pénétrer qu'un spermatozoïde parmi des millions. Or, sous la pression des couples désireux d'avoir un enfant et qui n'y parviennent pas, cette méthode est utilisée depuis quelques années, et plusieurs centaines d'enfants sont nés ainsi ; pour l'instant, ils paraissent se développer normalement. Comme cette technique paraît bien tolérée, certains sont devenus encore plus hardis et, chez les hommes dont les spermatozoïdes mûrent mal, ils sont allés prélever dans le testicule des spermatides, voire des spermatogonies, c'est-à-dire les précurseurs des spermatozoïdes n'ayant pas encore atteint le stade de maturation les rendant aptes à une fécondation naturelle. C'est une seconde transgression plus grave que la première, car on peut penser qu'il existe une raison pour laquelle les cellules ne parviennent pas à maturité.

A. Kahn a le courage de souligner les risques de ce type de procréation assis-

tée et de la trop grande hardiesse de certains gynécologues. Le rapport de l'Académie de médecine le faisait aussi, mais franchissait une étape supplémentaire en demandant que les enfants nés dans ces conditions soient suivis (dans des conditions assurant le respect absolu de la confidentialité, de l'atmosphère familiale et du développement physique et mental de ces enfants), de sorte que l'on finisse par savoir si ces pratiques comportent un risque pour ces enfants et pour leur descendance éventuelle.

La médecine prédictive consiste, grâce à l'étude du patrimoine génétique d'un enfant, voire d'un nouveau-né, à reconnaître les prédispositions éventuelles à un certain type de pathologie, par exemple les risques que cet enfant ait certains cancers, tel un cancer du sein. La médecine prédictive est l'un des domaines de la médecine où se fait le plus grand nombre de recherches ; elle a obtenu certains succès indiscutables, mais elle comporte aussi des risques que A. Kahn analyse avec lucidité et qu'il a été l'un des premiers à signaler, même si nombreux sont aujourd'hui les médecins qui partagent ce point de vue.

En effet, la médecine prédictive ne peut, moralement, se justifier que si, en même temps qu'on révèle à une personne (ou à sa famille) les risques de maladie, on lui indique les moyens soit de prévenir, soit de traiter cette maladie plus précocement et dans les meilleures conditions. Dans le cas où l'on se borne à constater le risque sans rien offrir de positif pour la prévention ou le traitement, on condamne le malheureux à vivre avec cette épée de Damoclès au-dessus de sa tête. On dira qu'en échange on peut rassurer d'autres individus ; ce n'est vrai qu'en partie, car, pour beaucoup d'affections, tel le cancer du sein, les prédispositions génétiques augmentent la probabilité de cancer du sein, mais celle-ci est loin d'être nulle même chez les femmes n'ayant pas de prédisposition. On ne pourra jamais dire à une femme : « Vous n'aurez pas de cancer du sein », même si l'on peut dire à certaines d'entre elles : « Vous avez un risque supérieur à la normale d'en avoir un. » De plus, la banalisation de ces tests génétiques aurait de graves inconvénients : ainsi les assureurs sur la vie, les employeurs à l'embauche pourraient en demander les résultats, ce qui aboutirait à d'acceptables discriminations. De surcroît, on voit bien que les compagnies d'assurances sur la vie seraient condamnées à la faillite si tout le monde se faisait tester et si seuls s'assuraient ceux qui présentent des risques élevés, tandis que les assureurs ignoreraient le risque.

La médecine prédictive se trouve donc placée devant de difficiles défis éthiques qu'elle doit résoudre, sans doute en introduisant des procédés d'expertise tels que, comme pour les médicaments, chaque test prédictif soit étudié isolément et que seuls soient autorisés ceux qui présentent plus d'avantages que d'inconvénients.

Ces trois exemples montrent les difficultés des sujets abordés. Ce choix délibéré de ne considérer que les problèmes les plus difficiles donne une vision un peu angoissée de l'avenir de la médecine. Heureusement l'auteur en aborde d'autres et, surtout, il fait appel au sens des responsabilités pour prémunir la médecine contre des dérives dangereuses, mais évitables.

Maurice TUBIANA

Entomologie

Microcosmos, le peuple de l'herbe

Claude Nuridsany et Marie Pérennou. Éditions de la Martinière, 1996.

Sous le même titre, un long métrage, Grand Prix de la Commission supérieure technique du Festival de Cannes 1996, fait découvrir au public la vie quotidienne d'un monde étrange et insolite.



Dressé sur ses pattes, abdomen redressé, un diabolon (*Empusa pennata*) surgit, telle une chimérique silhouette, sur le disque lunaire (affiche du film *Microcosmos*).

Le film est singulier. Son cadre est la campagne aveyronnaise, avec ses prairies, ses points d'eau, ses broussailles, ses bois. Ses acteurs sont les insectes et une petite faune à l'échelle du centimètre : en tout, une cinquantaine de vedettes ou de seconds rôles animent la pellicule. Le scénario est la vie quotidienne de ce petit peuple de l'herbe, avec ses joies et ses gênes. Grâce à leur parfaite connaissance de ce milieu, les auteurs ont filmé quelques séquences qui nous donnent le sentiment d'être parmi ces Lilliputiens et de participer à leur existence.

Ainsi nous suivons la ponte des libellules : le mâle dressé enserrant le cou de la femelle qui, inlassablement, insère ses œufs dans les plantes aquatiques ; le parcours du scarabée, roulant sa boule de fiente et parvenant, avec quelles difficultés ! à la dégager quand elle est immobilisée ; la lutte « titanique » de deux lucanes pour, peut-être, atteindre une source d'aliments dont ils sont friands ; l'éclosion périlleuse d'une femelle de moustique ; la coccinelle déséquilibrée par une goutte de pluie...

Au service de cette entreprise, toutes les ressources des techniques cinématographiques : travellings, accélérés, effets spéciaux. Et, pour ne pas nous distraire de la contemplation de ce monde, aucun commentaire qui aurait transformé cette épopée en un documentaire. Merci aux réalisateurs, qui ont su nous faire mettre un genou en terre pour regarder à nos pieds.

Si le film est enthousiasmant, le livre qui reprend le même titre est décevant. Il donne une impression (et c'est là un euphémisme) de déjà-vu et de déjà-lu : en 1983, Cl. Nuridsany et M. Pérennou publiaient aux éditions Arthaud un beau livre, *Planète des insectes*, illustré de remarquables macrophotographies. C'était, en avant première, une galerie de portraits des divers acteurs du film. Puis, en 1990, *Masques et simulacres* (éditions Dumay) élargissait cette galerie.

Les éditions de la Martinière nous présentent un texte quasi identique à celui de *Planète des insectes* (y compris le titre de la plupart des chapitres) et bon nombre des photographies des ouvrages précédents. Seule nouveauté : le chapitre « Naissance d'un film » (sept pages).

Nous espérons une « geste » reprenant l'épopée du peuple de l'herbe, avec un commentaire précis des principales séquences, mais nous ne disposons que de la resucée d'un ouvrage intéressant, certes, mais déjà publié sous un autre titre.

Sans plus insister.

Jacques d'AGUILAR

SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Murat Boratav, Dominique Burger, Paloma Cabeza-Orcel, Yvan Castin, Michel Champion, Baptiste Fauchoux, Philippe Goret, Evelyn Host-Platret, Louis-Marie Houdebine, Christian Jeanmougin, Nicholas Kurti, Marie-Thérèse Landousy, Marc Mézard, Claude Olivier, Guy Paulus, Alain Roty.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : John Moeling, Robert Biewen, Anthony Degutus.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06 Tél. (1) 46 34 21 42.

Télex : LIBELIN 202978F.

Télécopieur : 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay

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 adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront, en pages, centrales, un encart publicitaire *Integral* et, en pages 18A, 18B, 98A et 98B, des bulletins d'abonnement.