

L'ASTHME • L'INFORMATIQUE DE DEMAIN • LA MIGRATION DES PLANÈTES



■ POUR LA

Pour la Science

SCIENCE

Octobre 1999

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

*Comment voir
sous l'apparence*



**Les faux
en peinture**

Canada : \$ 8,75 / Belgique : 277FB / Suisse : 11FS



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

7

TRIBUNE DES LECTEURS



JEU-CONCOURS

Le jeu du serpent

par Pierre Tougne

9

POINT DE VUE

L'avenir est dans le «post»

par Catherine Vidal

10

La réforme des programmes

par Jacques Treiner

10

PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Premiers vaccins, premières réticences

par Anne Marie Moulin

12

SCIENCE ET GASTRONOMIE

Les œufs de 100 ans

par Hervé This

16

PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ Informatique vestimentaire ■ La baignoire d'Archimède ■ Les minoritaires font mouche

20

- L'espion et l'ADN ■ Anti-inflammatoires de demain?
- Lacs ou océans? ■ Le gène du stimulateur cardiaque
- Dissymétrie de la nature ■ Ça vous chatouille?

IDÉES DE PHYSIQUE

L'épopée du nickel

par Roland Lehoucq et Robert Mochkovitch

100

VISIONS MATHÉMATIQUES

Graphes et chorégraphes

par Ian Stewart

102

LOGIQUE ET CALCUL

Un nombre premier à 50 000 \$

par Jean-Paul Delahaye

104

ANALYSES DE LIVRES

■ Cours d'algèbre. Primalité. Divisibilité. Codes, de Michel Demazure ■ La Grande Guerre chimique,

110

1914-1918, d'Olivier Lepick ■ Les apprentis sorciers : Fritz Haber, Werner von Braun, Edward Teller, de Michel Rival ■ Atlas historique des dinosaures, de Mike Benton ■ Apprendre!, d'André Giordan



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

www.pourlascience.com

Dossier : L'informatique de demain

La révolution de l'informatique

32

par Michael Dertouzos

L'infrastructure informatique nommée *Oxygen*, en cours de mise au point, facilitera l'accès aux informations réparties dans le monde. Enfin, les hommes pourront en faire plus en en faisant moins.



Conversation avec votre ordinateur

38

par Victor Zue

Comment commander les ordinateurs sans lever le petit doigt.



Les caméléons de la communication

40

par John Guttag

Nos téléphones mobiles seront bientôt remplacés par des appareils qui seront à la fois des téléviseurs, des messagers de poche, des radios, des ordinateurs...



Une puce universelle

42

par Anant Agarwal

Constituée de circuits qui se réorganisent automatiquement selon les tâches à accomplir, la puce *Raw* est au cœur du projet *Oxygen*.

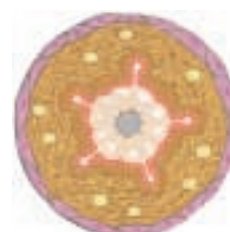


Les nouvelles armes contre l'asthme

46

par Marc Humbert

Des médicaments mieux ciblés bloquent les mécanismes allergiques responsables de cette maladie chronique et soulagent les difficultés respiratoires des malades, dont le nombre ne cesse d'augmenter.



La migration des planètes

54

par Renu Malhotra

Le Système solaire a-t-il toujours eu sa conformation actuelle? De nouvelles observations laissent penser que la position des planètes externes a changé en raison d'interactions avec des petits objets.



Le développement moral des enfants

64

par William Damon

Les enfants ont un sens aigu du bien et du mal. Ils ont également besoin de s'engager pour leurs idéaux. Les parents peuvent les y aider.



Les jardins et les zoos dans l'Antiquité

72

par Karen Polinger Foster

Il y a plus de 4 000 ans, les rois d'Égypte et de Mésopotamie commencèrent à collectionner des animaux exotiques et des plantes ornementales rares.



Le méthane dans les océans

80

par E. Suess, G. Bohrmann, J. Greinert et E. Lausch

Les hydrates de méthane présents dans les océans contiennent plus d'énergie que la totalité des réserves mondiales de combustibles fossiles.



Le vrai et le faux en peinture de chevalet

90

par Patrick Le Chanu

À l'aide de techniques d'examen et d'analyse, le scientifique peut discerner les indices d'une falsification artistique. Pour d'autres questions, telle l'attribution d'une œuvre, les progrès sont plus lents.



Éloge de la contrefaçon

Roland Dorgelès, excellent écrivain et critique d'art iconoclaste, avait introduit subrepticement un buste de plâtre fraîchement sculpté dans la galerie des antiquités romaines du Louvre. L'ajout était passé inaperçu pendant une semaine, quand Roland Dorgelès, revenant dans la galerie, le détruisit à grands coups de cannes en hurlant : «C'est un faux, c'est un faux.» Ce qui était vrai.

Dorgelès justifia son geste au commissariat de police, en affirmant qu'il avait voulu attirer l'attention des pouvoirs publics sur les nombreux faux qui ont une place indue dans les musées et les collections.

Aujourd'hui, la fraude est plus aisément décelée. Les analyses chimiques indiquent la composition des pigments et leurs possibles incompatibilités avec les ingrédients que les artistes utilisaient aux différentes époques. Les photographies en infrarouge et en ultraviolet établissent la chronologie des différentes couches, et la position superficielle d'une signature dénote une contrefaçon grossière (voir *Le vrai et le faux en peinture de chevalet*, page 90).

Hélas, quand il s'agit de l'attribution d'un tableau à un maître ou à un copiste, la science de la reconnaissance des formes est encore balbutiante, ce qui inquiète les spéculateurs, l'ignorance et la cupidité étant les mamelles de la contrefaçon artistique.

Les historiens de l'art ne sont pas aussi marris de l'existence de contrefaçons : les copies d'un tableau de maître, souvent réalisées par des contemporains, quelquefois dans le même atelier que l'œuvre originale, révèlent les caractéristiques d'une nouvelle facture. Les amplifications et les surinterprétations soulignent l'originalité et le talent d'un artiste ou d'une école, tout comme la pathologie du fonctionnement d'un organe éclaire sa fonction normale, tout comme la caricature exacerbe les traits singuliers d'un personnage.

Contrairement à la vérité, le mensonge ne gagne rien à être répété, aurait dit Einstein pour fustiger les politiciens. En reconnaissance artistique, cela n'est pas toujours vrai, car la reproduction éclaire une vérité de l'œuvre.

PHILIPPE BOULANGER

L'homme a trouvé sa voix

L'éléphant barrit, le chameau blatère, l'oie cacarde, la perdrix cacabe, le hibou hulule, le renard glapit, la cigale stridule, le crapaud coasse, le corbeau croasse, le jars jargonne, le geai jase, la colombe roucoule, le tigre feule, le lion rugit, la poule caquète, le chien aboie, le chat miaule, le cheval hennit, l'âne brait...

L'homme pense.

d'ossements et de revenants, les fantômes et les spectres, les têtes de mort et les tibias en croix. Si les mathématiciens avaient eu assez de jugeote pour conserver les termes évocateurs avancés par Jacques Tits, on aurait assisté à ce spectacle merveilleux : des foules de parents d'élèves inquiets de voir leurs enfants se consumer nuits après nuits dans leur passion fiévreuse pour les mathématiques.

sait à la vérité morale – et qu'il avait, en exprimant sa pensée, un petit sourire amusé et ironique.

Les scientifiques ne devraient-ils pas prendre avec infiniment de sérieux ce philosophe s'ils croient que cette phrase est vraie ? Les scientifiques n'abuseraient-ils pas de la vérité ?

Même si la moitié de leurs articles sont faux, il en reste des milliers qui sont vrais. Tragiquement vrais, désespérément vrais, sans aucune chance d'être un jour réfutés ! C'est l'overdose. Personne ne peut ingurgiter tout cela, ni se faire une opinion éclairée sur la valeur et la portée de ces divers résultats. Résultat, la chance, le hasard, la mode, le bluff, l'habileté médiatique des auteurs jouent un rôle prépondérant dans l'écho que reçoivent ou non leurs publications. À force de vérités, la vérité est devenue un critère secondaire.

L'abus de vérité est dangereux pour la pensée.

Morbidité et mathématiques

L'histoire de l'humanité est une suite d'occasions manquées. Vers les années 1950-1960, des notions nouvelles s'étant imposées en mathématiques, il a fallu trouver des noms, eux aussi nouveaux en mathématiques, pour les désigner. Le géomètre Jacques Tits proposa les termes «squelette», «cimetière» et «ossuaire». Ces notions sont, paraît-il, devenues aujourd'hui centrales dans d'importants chapitres de géométrie. Hé bien, que croyez-vous qu'ont fait ces nigauds de mathématiciens ? Ils ont peu à peu renoncé aux mots proposés par Jacques Tits, les remplaçant par «mur», «appartement» et «immeuble».

Erreur fatale ! Cette substitution de termes a ruiné la meilleure chance qu'avaient les mathématiques d'attirer le public, en particulier celui d'âge scolaire. Les jeunes apprécient par-dessus tout les jeux morbides et les messes noires, les histoires

Au quatrième top...

Pour améliorer la précision avec laquelle on évalue une grandeur, une méthode éprouvée consiste à effectuer plusieurs mesures, puis à faire leur moyenne.

Exemple. Dans votre demi-insomnie, vous percevez vaguement la série de coups sonnés par un clocher lointain : cinq. Quelques instants après, comme il est d'usage, le clocher sonne une seconde volée ; vous recomptez les coups : quatre. Conclusion : il est très exactement quatre heures et demie.

Tâchez de vous rendormir.

Abus de vérité

«La vérité étant le plus précieux des biens, il faut en user avec modération et retenue.» J'ignore dans quel contexte le rabbin Schlomo Rosenbach a fait cette déclaration. Je suppose qu'il pen-

Rien n'est dans tout

Certains auteurs expriment un regret. Selon eux, le fait que nous enregistrons tout empêchera un double travail essentiel de se faire. D'abord, le choix, par nous, de la façon dont nous voulons nous présenter face à la postérité. Ensuite, le choix, par la postérité, de la façon dont elle veut se représenter notre époque. L'exhaustivité est le contraire du travail de culture.

Cette analyse pêche sur un point. Même si nos enregistrements résistent au temps, une chose est sûre : nous aurons enregistré tout... sauf ce qui intéressera la postérité ! Comme toutes les sociétés, la nôtre repose sur des valeurs implicites, transparentes pour elle.

Certaines idées, conceptions, croyances vont tellement de soi, à nos yeux, que nous ne les percevons jamais, que nous sommes incapables de les exprimer. Sans que nous y songions, elles nous imprègnent, nous façonnent et forment l'air du temps, notre fonds commun à tous, ici et maintenant, grâce auquel des êtres en apparence opposés ont en réalité assez de connivence pour vivre ensemble et concourir au fonctionnement de la même société. Ce qui fera mourir de curiosité nos successeurs à notre égard, aucun doute, ce sera cela.

Et il faudra bien qu'ils le découvrent tout seuls.

Nazis dans le rétro

«Ce qui n'est pas éthique n'est pas scientifique», disait un médecin célèbre, dans son désir de croire à tout prix qu'une recherche coupable sur le plan moral est nécessairement erronée sur le plan scientifique. Déclaration choquante : il suffirait donc d'être bon scientifique pour être exonéré de toute responsabilité morale ou éthique. Passer de la morale à la science comme si elles relevaient du même ordre est incohérent.

Voici un exemple, encore plus choquant que la phrase ci-dessus. Il est tiré de la présentation d'un livre d'Ernst Klee, *La médecine nazie et ses victimes* (Solin – Actes Sud, 1999) : «Ernst Klee nous fait découvrir une légion de bourreaux en blouse blanche qui commettaient des crimes abominables en se retranchant derrière les exigences la plupart du temps absurdes d'une "recherche sans entraves". L'auteur montre que la force scientifique médicale et pharmaceutique allemande d'aujourd'hui repose en partie sur cet "avantage" d'avoir, en toute impunité, disposé pendant de nombreuses années de cobayes humains.»

Je ne critique pas le livre d'Ernst Klee, description terrifiante de ce qu'ont fait les nazis. Je dis que, quand on suppose que les impératifs scientifiques et les impératifs moraux sont de même nature, on en vient à des inepties, comme d'écrire d'un même trait de plume que les exigences des médecins nazis étaient absurdes et qu'elles les ont aidés à asseoir leur prééminence scientifique.

Polyox

Dans son livre *Les objets fragiles*, Pierre-Gilles de Gennes cite un produit, le polyoxyéthylène, ou Polyox, qui, en faible quantité, augmente considérablement la fluidité de certains liquides (par exemple, le système d'égouts à bout de souffle de la ville de Bristol). Serait-il possible, si ce produit est peu ou pas toxique, de l'utiliser en médecine pour faciliter l'écoulement sanguin, soit pour des soins d'urgences, telle une embolie, soit pour des traitements plus longs contre la mauvaise circulation du sang ?

Daniel TOULOTTE, Puyméras

Réponse de P.-G. de Gennes

Le Polyox est assez bio-compatible et permet de modifier des écoulements turbulents. Cependant, il s'agit de polymères de masse moléculaire très élevée (10^6). Or, le rein n'élimine que les molécules de masse inférieure à environ 10^4 . Il me paraît donc exclu de l'utiliser.

Sous la douche

J'adore les chroniques de Didier Nordon, cependant, aujourd'hui, je ris un peu jaune puisque me voilà épinglé (voir *Bloc-notes*, *Pour la Science*, septembre 1999), mais je ne lui en veux pas. Je trouve ses critiques à l'égard du livre de Guitta Pessis-Pasternak tout à fait fondées et sa réaction fort saine. La chute de sa note souligne à mes yeux le caractère macho et pontifiant de ce recueil d'articles de «grands hommes» : tout à fait ce que mon féminisme viscéral trouve intolérable.

Sachez, pour la petite histoire, que je n'ai jamais été interrogé par la rédactrice de l'ouvrage. Son travail s'est borné à m'extorquer une page de présentation de mes livres dans *Libération*. Elle a ensuite repris ce texte et s'est contentée, dans une interview imaginaire, de glaner quelques phrases de mes livres, pas les plus modérées, vous vous en doutez...

Je ne peux pas nier le caractère passionné de mes interventions et l'outrance occasionnelle (!) de l'expression qui vous ont choqués. Que voulez-vous, il semble que je pose des questions tout à fait inconvenantes comme : «L'Univers est-il soumis à des lois ?» ou que je lance des affirmations tout à fait loufoques comme : «L'infini : ça n'existe pas.» Alors, à force de rebuffades, on s'énerve ! Il est certain que le texte d'Hubert Reeves fera moins de vagues, car son auteur est diablement plus tolérant.

Christian MAGNAN, Montpellier

Confiance

Par honnêteté scientifique, je pense que Philippe Hartemann, dans *La précaution, jusqu'où ?* (voir *Pour la Science*, septembre 1999), ne voit qu'une partie du problème en considérant que l'hyper-réaction du public au risque est juste une réaction scientifique à l'égard de microgrammes de dioxines, alors qu'elle est tout autant affaire de sociologie et de politique. La crise de confiance actuelle est parfaitement rationnelle : elle s'exerce à l'encontre d'une science qui trahit de plus en plus sa mission première – le progrès au service de l'humanité – pour se divertir en une technoscience à la seule dévotion du marché et des puissances de l'argent.

Le public, de plus en plus lucide et de mieux en mieux informé (du moins en Europe), perçoit clairement que les risques des dioxines ou des OGM sont, certes, ceux vis-à-vis de la santé et de l'environnement, mais aussi et surtout ceux que les multinationales de l'agrochimie et de l'alimentaire font courir aux sociétés humaines et, peut-être, à la planète entière, par leur recherche incontrôlée du profit à court terme. Ce n'est pas du tout la même chose, et les meilleures explications scientifiques sont inopérantes, car en grande partie à côté du problème.

Pierre-François LAGET, Saint-Avertin

Réponse de Philippe Hartemann

Je partage tout à fait l'avis de P.-F. Laget sur le fait que la réaction du public au risque comporte autant une part sociologique ou politique qu'une part purement rationnelle scientifiquement fondée. Il est exact que je n'ai pas abordé cet aspect de la question, par incompréhension de ma part dans le domaine du sociologique et parce que l'attitude de certains dans cette réaction dérive vers la métaphysique, voire le domaine du sacré, qui sont trop loin des aspects purement scientifiques.

J'ai cependant introduit la notion de risque socialement acceptable par rapport à celle du risque envisagé dans sa seule dimension probabiliste. Il est effectivement clair que le public a une anxiété croissante devant l'utilisation du progrès scientifique par des multinationales de l'agrochimie et de l'alimentaire, dont la puissance financière, voire politique, et les moyens de laboratoire sont très largement supérieurs à ceux de la plupart des États. Cette anxiété se traduit par une forme de rejet de tout ce qui peut apparaître comme menaçant pour l'avenir, et il est exact que, dans ce contexte, les meilleures explications scientifiques sont inopérantes.

Cependant, il me semble du devoir du scientifique et du médecin spécialisé en santé publique de tenir le cap de la rationalité, tant vis-à-vis du public que des autorités et de ces sociétés, en cherchant à garantir un niveau de risque acceptable, tant pour la santé de la population que pour l'avenir des hôtes de cette planète. C'est donc cette seule ligne qu'il me semble possible d'avancer, afin de maintenir ma crédibilité vis-à-vis de ces trois interlocuteurs, souvent difficilement conciliables, tout en sachant que, de toute façon, il y a plus de coups à prendre que de reconnaissance et que l'on sera toujours suspect de compromission pour l'un ou l'autre camp.

Neutrinos

Dans l'article *La détection des neutrinos massifs* (voir *Pour la Science*, septembre 1999), les auteurs n'ont pas estimé utile de préciser qu'en réalité, en 1956, c'est l'antineutrino qui a été détecté, et non pas le neutrino.

Pourtant, Frederick Reines et Clyde Lorrain Cowan ont probablement publié le résultat de leur ingénieuse expérience en parlant d'antineutrino. Il est vrai que, dès lors que l'existence de l'antineutrino était établie, on pouvait en inférer celle du neutrino.

Ensuite, il restait à déterminer si le neutrino était ou non identique à son antiparticule. Cela justifiait amplement une nouvelle expérience destinée, cette fois, à la détection des «vrais neutrinos».

Raymond Davis vérifia que son piège à neutrinos ne détectait pas les antineutrinos, ce qui établit que l'antineutrino n'était pas identique au neutrino. Ensuite, il exposa son dispositif (une cuve contenant un solvant organique nommé tétrachloroéthylène) au flux des neutrinos solaires, et il put annoncer, en 1968 (et non en 1969, si ma source est bonne), qu'il avait détecté des neutrinos.

Mais comme il n'en a détecté que le tiers de ce qu'il attendait, il est apparu que les choses étaient plus compliquées qu'on ne l'avait cru d'abord. Les oscillations des neutrinos furent suggérées en 1963 par un groupe de physiciens japonais.

Francis PENIN, Vineuil

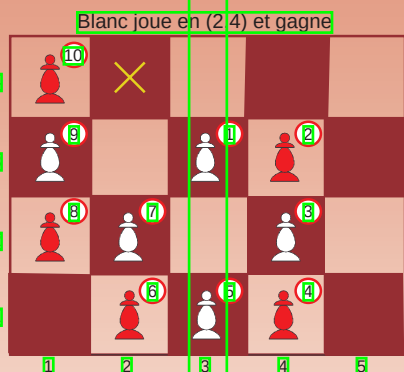
Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pouirlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pouirlascience.com.

JEU-CONCOURS N° 64

PIERRE TOUGNE

Le jeu du serpent

Certains possesseurs de PC ont dû jouer au petit jeu sous windows dénommé *Amazon Skulls*. Le principe est le suivant : sur un damier de $n \times m$ cases, chaque joueur pose à son tour un pion qui doit être adjacent horizontalement ou verticalement au pion déposé précédemment par son adversaire (sauf bien sûr pour le premier coup) et ne pas être au contact verticalement ou horizontalement avec aucun autre pion précédemment joué. Le perdant est le joueur ne pouvant plus jouer selon la règle. Sur la figure, nous avons représenté une situation sur un damier 4×5 où les pions sont de couleurs différentes afin de suivre l'évolution du jeu. Les chiffres indiquent l'ordre des coups. Blanc peut encore jouer un coup, et Rouge perd.



en premier (le premier coup semblant choisi au hasard), le jeu est assez intéressant. En revanche, si vous pouvez jouer en premier comme vous le propose l'ordinateur, le jeu perd de son intérêt, car il y a une stratégie gagnante à tout coup sur chacun des damiers 5×6 et plus généralement sur les damiers $n \times n$? Ce jeu étant un jeu impartial fini (pas de partie nulle possible), il doit y avoir une stratégie gagnante pour le premier ou le deuxième joueur selon le terrain. Quel est le joueur gagnant sur les damiers $1 \times n$ et $2 \times n$?

Les damiers proposés sont 5×6 , 8×8 et 12×12 et si c'est l'ordinateur qui joue

Envoyez vos réponses aux questions à
Pour la Science, 8, rue Férou, 75006
 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'octobre 1999, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 62

Le nombre 196 ne conduisant jamais à un palindrome, tout nombre engendré par celui-ci aura la même propriété. Prenons le premier, $196 + 691 = 887$ et cherchons des antécédents de ce dernier, soit (abc) l'un d'eux. On doit avoir $(abc) + (cba) = 887$. Trois cas se présentent : soit $c + a = 7$, $2b = 8$, $a + c = 8$, ce qui est impossible ou encore $c + a = 17$, $2b + 1 = 8$ ou 18, là aussi impossible, enfin $c + a = 7$, $2b = 18$, $a + c + 1 = 8$ qui donne à $b = 9$ et $a + c = 7$ d'où les sept solutions 790 (et non 97!), 196, 691, 295, 592, 394, 493 cherchées.

En base 2, on vérifie vite que les nombres depuis 1 à 21 (en décimal) conduisent à un palindrome (la plus longue attente étant pour 20 qui nécessite cinq additions). Pour $22 = (10110)_2$, les premières itérations donnent $n_1 = 100011$, $n_2 = 1010100$, $n_3 = 1101001$, $n_4 = 10110100$, ..., et enfin $n_8 = 1011101000$ ou, en regardant les chiffres soulignés, on voit apparaître une récurrence possible après quatre additions de $101^n 010^n$ vers $101^{n+1} 010^{n+1}$ (où x^n

désigne n fois le chiffre x). La démonstration est résumée dans les quatre additions suivantes :

$$\begin{array}{r} 10 \ 1^{n-2} \ 1101 \ 0^{n-2} \ 00 \\ + \ 00 \ 0^{n-2} \ 1011 \ 1^{n-2} \ 01 \\ 11 \ 0^{n-2} \ 1000 \ 1^{n-2} \ 01 \\ + \ 10 \ 1^{n-2} \ 0001 \ 0^{n-2} \ 11 \\ \hline 101 \ 1^{n-2} \ 1010 \ 0^{n-2} \ 00 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 10 \ 1^{n-1} \ 101 \ 0^{n-1} \ 00 \\ + \ 00 \ 0^{n-1} \ 101 \ 1^{n-1} \ 01 \\ 11 \ 0^{n-1} \ 010 \ 1^{n-1} \ 01 \\ + \ 10 \ 1^{n-1} \ 010 \ 0^{n-1} \ 11 \\ \hline 101 \ 1^{n-1} \ 101 \ 0^{n-1} \ 00 \end{array}$$

Chaque nombre intermédiaire n'étant pas un palindrome, 22 n'engendra jamais un palindrome. En base 4, $(3333)_4 = 255$ conduit à un cycle d'itérations d'ordre 6 qui montre que 255 n'engendre pas de palindrome et c'est le seul autre cas démontré bien que dans chaque base il semble qu'il existe de tels nombres.



L'avenir est dans le «post»

CATHERINE VIDAL

Les biologistes se sont entichés des gènes. Il est urgent de revenir à la physiologie.

Les experts en sciences – dures et molles – l'affirment : le futur est dans le «post», le post-génomique et la post-humanité. Serions-nous tous des post-modernes?

Les progrès de la génomique, mariage de la biotechnologie et de la génétique, laissent prévoir que la composition de notre patrimoine héréditaire sera décryptée aux alentours de 2003. D'énormes intérêts sont en jeu : rien de moins que déterminer les gènes impliqués dans les maladies, les étudier et déposer des brevets pour que l'industrie pharmaceutique les exploite. Dans la course au séquençage du génome humain, les chercheurs français, malgré un bon départ (en 1992, Daniel Cohen et Jean Weissenbach publiaient la première cartographie), affichent un sérieux retard par rapport aux pays anglo-saxons.

Pour tenter de redresser la barre, la France réagit en lançant une action de grande envergure, dite «post-génomique», dans le domaine de la santé humaine. Cette action incitatrice mise sur l'après-génome, à savoir, selon François Gros, «l'exploration fonctionnelle des gènes axée sur la physiologie et l'embryologie». Heureuse surprise ! S'agirait-il enfin d'une redécouverte des disciplines fondatrices de la biologie expérimentale ? Depuis 20 ans et plus, la physiologie est une discipline de connotation «ringarde» face à l'explosion de la biologie moléculaire, des biotechnologies et autres génomique et protéomique, sans oublier la petite dernière, la cognitive !

Un objectif majeur du séquençage est la découverte de gènes médicalement intéressants dans le cancer, les maladies cardio-vasculaires, les troubles du métabolisme, les maladies psychiatriques et le vieillissement. En conséquence, les biologistes seront bien obligés de se pencher sérieusement sur la physiologie des animaux génétiquement modifiés (essentiellement des souris), fabriqués pour servir de modèles aux pathologies humaines. La réalisation de cet ambitieux programme nécessite des compétences... qui disparaissent : qui, dans nos laboratoires,

sait encore faire une trachéotomie, mesurer la pression artérielle, enregistrer des neurones *in vivo*, analyser le comportement ? Acquérir une formation solide dans les domaines de la physiologie et du comportement prend des années.

Faudra-t-il, en attendant la relève, passer par des sociétés de service – il en existe déjà – qui proposent de réaliser le screening morphologique, physiologique et comportemental des animaux transgéniques qui leur sont confiés ? Passe encore pour les analyses classiques comme la biochimie du sang ou le diagnostic des tumeurs. Mais comment leur confier les tests comportementaux quand on sait l'importance de l'environnement dans l'évaluation des tests ? Un exemple flagrant vient d'être publié : la même étude comportementale réalisée en parallèle dans trois laboratoires américains sur une même lignée de souris génétiquement modifiées a donné des résultats qui se contredisent complètement. Pourtant les tests étaient réalisés avec les mêmes critères et les souris étaient génétiquement identiques. Seuls les chercheurs et les lieux différaient. Dans cette étude, ce n'est pas la pertinence des tests qui est en cause, mais bien la nécessité de prendre en compte l'environnement, de reproduire les expériences, d'y consacrer du temps et de la réflexion, tâches difficilement compatibles avec les critères de rentabilité d'une société privée...

Un des développements très attendus de la génomique est celui de la pharmacogénétique. La question est de comprendre pourquoi un médicament donné est actif sur seulement une partie des malades. La réponse passe «bien sûr» par l'identification des gènes responsables. Ainsi, à terme, nous serons en mesure de personnaliser un traitement en fonction de la carte génétique de chacun. La cause semble entendue : les recherches menées sur le patrimoine héréditaire serviront au bien-être de l'humanité.

Aux États-Unis, le déterminisme génétique imprègne les esprits depuis des lustres. Rien d'étonnant dans ce contexte que le politologue américain Francis Fukuyama, qui, en 1989, nous prédisait la «fin de l'histoire», ait révisé sa théorie pour l'inscrire dans ce qu'il appelle la «post-humanité». Pour F. Fukuyama, le fait que la démocratie libérale capitaliste (à savoir le système des États-Unis) n'ait plus de concurrent idéologique marque la fin de l'évolution des institutions humaines, politiques et économiques. Cependant «l'histoire ne peut s'achever aussi longtemps que les sciences de la nature contemporaines ne sont pas à leur terme. [...] La biotechnologie nous donnera les outils qui nous permettront d'accomplir ce que les spécialistes d'ingénierie sociale (en l'occurrence le système marxiste) n'ont pas réussi à faire. À ce stade, nous en aurons définitivement terminé avec les êtres humains en tant que tels.»

La post-humanité nous attend, grâce au clonage ! Que F. Fukuyama soit un penseur génial ou un mystificateur, sa nouvelle thèse a suscité les réactions d'éminents sociologues et historiens. Pour André Pichot, épistémologue, «Fukuyama répète bêtement ce que les généticiens d'aujourd'hui prétendent. S'il avait la moindre compétence en ce domaine, il saurait que, loin d'être une manifestation de la puissance d'une science parfaitement maîtrisée, ces biotechnologies sont d'assez misérables bricolages empiriques. Loin d'ouvrir une nouvelle "histoire au-delà de l'humain", elles traduisent la dérive d'une discipline» (*Le Monde*, juin 1999).

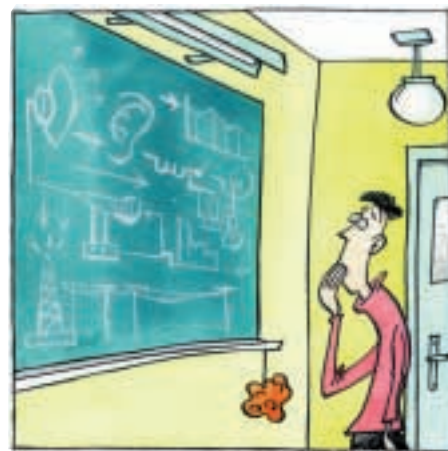
La polémique est de taille. Or les généticiens sont restés curieusement absents des débats sur la post-humanité... Attitude délibérée ou non ? Mais alors qui va se charger d'expliquer que le clonage est un outil limité, que l'être humain n'est pas réductible à ses gènes et que la pensée n'est pas programmable ? Pourquoi pas les physiologistes ?

Catherine VIDAL est chercheur en neurobiologie.

La réforme des programmes

JACQUES TREINER

Pourquoi réformer le programme de physique, en Seconde, alors que les précédents changements ne dataient que de 1992?



Le nouveau programme de physique de Seconde, applicable à la rentrée 2000, modifie profondément le programme actuel. Fallait-il tout changer une fois de plus?

Au cours des 50 dernières années, l'enseignement de la physique au lycée a été réformé en profondeur deux fois. La première réforme a cherché à moderniser l'enseignement de la discipline en intégrant les grandes idées du xx^e siècle. La seconde a voulu répercuter le développement technique qui structure notre environnement quotidien.

Dans les années 1970, un travail de fond identifia notamment l'importance des symétries et des lois de conservation. Malgré la qualité de la réflexion sous-jacente, les programmes ont finalement imposé un enseignement trop abstrait et relativement formel... jusqu'à des travaux pratiques ! Ainsi, la célèbre table à coussin d'air permet de se placer dans une situation qui n'existe jamais dans le monde réel, à savoir un monde sans frottement. Un élève de Seconde relie mal les expériences réalisées avec ce dispositif aux phénomènes de la vie courante. Utiles en Terminale, ces tables étaient inadéquates pour une initiation à la physique.

Vers la fin des années 1980, une réaction plaça alors l'objet technique au centre des préoccupations : pour séduire et rendre la discipline attrayante, pourquoi ne pas partir des objets familiers ? Et quoi de plus familier que la production et la réception du son ? La mise en pratique de cette idée se heurta vite à divers obstacles, dont le plus important est le suivant : une chaîne hi-fi, comme tout objet moderne, est un concentré de trois siècles de science. Toute la physique y est à l'œuvre : électricité, magnétisme, mécanique, ondes... Les objets techniques modernes sont d'une telle complexité que l'objectif pédagogique ne peut être tenu. Il suffit d'ouvrir un livre de Seconde actuel pour mesurer l'ampleur de la difficulté. Au hasard, dans l'un des ouvrages disponibles : le chapitre «réception sonore» commence par une

description de l'oreille interne, définit ensuite l'intensité acoustique et le décibel (avec un encadré sur la fonction logarithme !), présente l'audiogramme, puis, sans transition, introduit le phénomène d'induction magnétique pour expliquer le fonctionnement d'un microphone, en signalant au passage que les alternateurs de l'EDF utilisent aussi ce phénomène... Comment un élève moyen peut-il se repérer dans un tel parcours ?

Il nous a semblé urgent de revenir à un contenu plus fondamental et plus maîtrisable par des élèves qui, en majorité, n'optent pas pour la filière scientifique : le programme doit faire sens par lui-même. Avec l'exploration de l'Univers pour fil conducteur, le programme est structuré autour des grandeurs physiques de base : espace, temps, mouvements et forces, température et pression.

Les thèmes «Espace et temps» mettent en place des ordres de grandeur. Déterminer la distance d'un objet par paralaxe, mesurer le rayon de la Terre (méthode d'Ératosthène) et la taille d'une molécule (expérience de Benjamin Franklin) sont des activités qui couvrent 15 des 40 ordres de grandeur observables (de la taille du noyau à la distance parcourue par la lumière depuis l'époque estimée du Big-Bang).

Le thème «Mouvements et forces» a un but précis et limité, mais ambitieux : montrer la genèse du principe d'inertie à partir d'exemples courants et utiliser ce principe pour mettre en évidence des forces. Le support de cette partie est la gravitation (du projectile au satellite). La conception aristotélicienne du mouvement (où la vitesse était le signe d'une force appliquée) est mise en regard de la conception galiléenne-newtonienne (c'est le changement de la vitesse qui révèle une force appliquée). Enfin on propose, par l'interprétation des concepts de température et de pression en termes de mouvements de particules, de discuter le passage du monde microscopique au

monde macroscopique. L'objet d'étude support de cette partie est l'atmosphère.

Pour encourager la compréhension qualitative, l'accent est mis sur l'expérimentation. Toutefois, de même que la formalisation ne s'identifie pas avec la manipulation mathématique, l'expérimentation ne s'identifie pas avec la manipulation du matériel. L'utilisation des mathématiques et du «langage de la matière» ne doivent pas se substituer à l'utilisation de la langue naturelle, qui demeure celle de la question que l'on se pose et de la formulation des résultats. Toute mise en équations doit être précédée par une phase de modélisation du système étudié. Faute de quoi la physique devient prétexte à «faire des mathématiques». De même, une phase de questionnement doit précéder toute expérience : quel dispositif dois-je mettre en place pour tester telle hypothèse ? que va-t-il se passer si j'effectue telle perturbation du système ? L'oubli trop fréquent de cette phase de questionnement conduit à des travaux pratiques «presse-bouton» où l'on peut avoir tout fait et rien appris.

Le succès de la nouvelle réforme dépendra essentiellement de la bonne mise en œuvre pédagogique de ces questionnements. L'enseignement scientifique doit montrer comment les connaissances sont élaborées, quels sont les protocoles théoriques et expérimentaux mis en place par la science au cours de son développement historique, et en quoi ces protocoles sont spécifiques de la science. Peut-être sera-t-il ainsi possible de faire sentir la nature de la vérité à laquelle prétend la science.

Jacques TREINER est président de la commission des programmes de Physique / Chimie au ministère de l'Éducation nationale.

Envoyez-nous vos commentaires sur ce nouveau programme, nous ouvrons un forum sur le site de Pour la Science <http://www.pourlascience.com/>.



Premiers vaccins, premières réticences

ANNE MARIE MOULIN

Dès les premières campagnes vaccinales, les bénéfices liés aux tentatives d'immunisation de masse et à l'éradication de certaines maladies ont parfois été remis en question par des drames qui jetaient le doute sur la méthode.

Le terme de vaccinologie a été proposé par Jonas Salk, le père du vaccin contre la poliomyélite. Ce terme souligne l'interdisciplinarité : dès qu'il s'agit de vaccins, sciences biomédicales et sciences sociales s'impliquent mutuellement. La vaccination est un fait de société, et l'étude des résistances à cette méthode de prévention, qui se sont manifestées très tôt, nous éclaire sur l'acceptabilité des vaccins par la société.

Les vaccins ont incontestablement participé à l'essor démographique du ^{xx}e siècle, mais, pour juger objectivement de leur portée, il nous faudrait confronter les données de l'histoire des vaccins et celles de l'évolution des germes : la diminution du nombre des malades atteints par une affection ne reflète pas uniquement la couverture vaccinale, mais aussi les variations imprévisibles, mais réelles, de la virulence des agents pathogènes (beaucoup de maladies déclinent d'elles-mêmes, puis renaissent des dizaines, voire des centaines d'années plus tard).

Toute vaccination reste un choix de société fondé sur une double raison, scientifique et politique. Il ne s'agit pas d'une décision globale. Chaque vaccin a son histoire propre, des indications et des risques différents. Pourtant, les interrogations récentes sur le vaccin contre l'hépatite B ont déclenché une remise en cause générale de la vaccination de masse. Il en est ainsi chaque fois qu'un vaccin est incriminé. Un accident singulier suffirait-il à remettre en question l'engagement de la société dans l'immunisation collective ? Un peu d'histoire illustre ces revirements.

Au sens strict, la vaccination désigne l'inoculation de la vaccine, une maladie due à un virus proche de celui de la variole, qui infecte la vache. La première utilisation systématique de la vaccine est

due à Edward Jenner, en 1796 : ce médecin britannique avait remarqué que les vachères ayant contracté une maladie bénigne de la vache, qui se traduisait par quelques boutons, acquéraient une protection contre la variole. Il eut alors l'idée d'inoculer la vaccine pour rendre l'homme résistant à la variole. Il préleva le liquide vaccinal des pustules pour l'injecter à un sujet indemne de maladie, qui eut à son tour des pustules, dont le contenu fut ensuite injecté à d'autres personnes. La vaccine était transmise de bras à bras, cultivée sur le vivant. Ainsi, une maladie anodine, la vaccine, protégeait contre une maladie grave, la variole.

C'est Louis Pasteur qui choisit, en 1881, d'élargir le sens courant du terme «vaccine», en l'utilisant pour désigner tout procédé fondé sur des germes pathogènes atténués à des fins préventives. Après avoir montré que l'administration de micro-organismes pathogènes pour les animaux et pour l'homme peut protéger ces derniers, il formule un vaste projet d'atténuation des germes.

Aujourd'hui, la vaccination incarne les espoirs en la médecine moderne : l'objectif d'éradication des maladies infectieuses, formulé par Pasteur, de façon visionnaire, a été adopté par l'Organisation mondiale de la santé. Toutefois, les transformations permanentes du calendrier de vaccination et sa variabilité d'un pays à l'autre attestent du caractère évolutif de ce programme. L'histoire du «système vaccinal», surtout en France, illustre l'adhésion globale aux vaccins de la population générale et des médecins. Réfléchir sur l'histoire des sociétés et de leurs vaccins, c'est replacer l'adhésion quasi mystique à un système par un débat scientifique et politique. Dans chaque pays, la politique vaccinale s'efforce de concilier la volonté de l'État d'assurer l'ordre sanitaire, le progrès des

recherches scientifiques et la liberté de chacun : elle se situe aux confins de la raison d'état, de la raison scientifique et de la raison individuelle.

LA LUTTE CONTRE LA VARIOLE

Si Jenner et Pasteur sont les pères européens de la vaccination, des pratiques d'immunisation plus anciennes sont attestées dans plusieurs parties du monde. En Afrique, des voyageurs de la fin du ^{xix}e siècle ont rapporté des pratiques anciennes de prévention des maladies. En Ouganda, au ^{xix}e siècle, de jeunes enfants étaient exposés à la syphilis endémique, une forme de syphilis à transmission orale, pour les protéger, quand ils parvenaient à l'âge adulte, contre la syphilis vénérienne, plus dangereuse. Ce procédé rappelle la syphilisation expérimentée en France sous Napoléon III : le médecin français Auzias-Turenne avait proposé la syphilisation générale de la population par inoculation de chancres syphilitiques, en particulier aux enfants, pour les protéger à l'adolescence. L'idée fut abandonnée devant la preuve que la maladie ne conférait pas de véritable immunité (on peut avoir plusieurs fois la syphilis). Toutefois, de cet échec, Pasteur a retenu le concept d'une exposition programmée dès l'enfance à une maladie inévitable.

La variolisation demeure le prototype de la tradition préventive. Deux variantes sont attestées en Chine. Selon la plus ancienne, on introduit du broyat de pustules dans le nez des personnes «variolisées» : le patient «prise» de la poudre de variole. Dans le meilleur des cas, au prix de quelques boutons, il est effectivement protégé contre la maladie. Cette méthode convenait aux lettrés confucéens qui, en revanche, se défiaient d'une autre méthode signalée, plus tard, dans les

textes, l'inoculation ou introduction de pus de varioleux par une aiguille sous la peau.

C'est peut-être la première intervention officielle des femmes dans l'histoire de la médecine chinoise : exclues des filières d'enseignement, elles ont probablement exercé la médecine et surtout l'obstétrique sous les Ming (du XII^e au XVII^e siècle). Les vieilles femmes se mêlant de médecine sont des stéréotypes comiques de la littérature confucéenne : elles se déplacent seules et pénètrent hardiment dans les maisons ; elles brandissent volontiers une aiguille et, imitant les acupuncteurs, piquent au hasard des points du corps. Elles perçaient même les pustules des varioleux pour évacuer le pus et hâter la guérison. Ce faisant, elles ont pu charger leurs aiguilles de pus contaminant et, en piquant ultérieurement des sujets sains, provoquer une floraison de pustules, dont elles ont découvert empiriquement la vertu préventive. Ainsi serait née l'inoculation.

Tandis que la méthode par voie nasale est restée limitée à la Chine et aux pays sous influence chinoise, tels la Corée et le Japon, la deuxième méthode a fait le tour du monde. Elle s'est répandue dans l'empire ottoman, peut-être par la route de la soie et, en Europe, grâce à une aristocrate anglaise, Lady Mary Montagu, qui avait séjourné à Constantinople et qui, de retour à Londres, a milité en faveur de cette mesure originale de protection.

DU VIET-NÂM À L'ÉGYPTE

L'inoculation de la variole et celle de la vaccine ont parfois été pratiquées simultanément. Au royaume d'Annam, par exemple, l'empereur Minh-Mang, de la dynastie des Nguyen, entend parler de la vaccine ; il envoie son médecin personnel, le Français Despiau, à Macao, pour apprendre la technique. Despiau revient en bateau avec deux enfants orphelins à qui il a inoculé la vaccine, pour qu'ils servent de réservoir vivant. Dès son arrivée, en 1824, il vaccine les enfants de l'empereur. Or, peu de temps auparavant, sous l'effet des modes chinoises imposées par Gia-Long, le prédécesseur de Minh-Mang, l'inoculation de la variole avait été introduite au Viet-Nâm. Au début de la colonisation par la France, les deux pratiques s'y trouvent en compétition.

En Égypte, quand, au début du XIX^e siècle, le pacha Mohammed Ali s'émancipe de la tutelle ottomane et veut créer un état moderne, il envisage, dès 1806, d'introduire la vaccine. Après un premier échec, il embauche, en 1824, Antoine Clot, chirurgien de Marseille, pour créer une école de médecine et lancer un programme vaccinal. Il décrète même

la vaccination contre la variole obligatoire en 1837, longtemps avant la France, qui ne la votera qu'en 1902.

Il fallait être un pacha despotique pour espérer imposer du jour au lendemain une telle mesure à toute une population. Mohammed Ali s'appuie, à défaut de médecins, sur le réseau des barbiers-chirurgiens des campagnes et rend ses administrateurs personnellement responsables de la bonne marche des opérations. La population de son côté la perçoit comme une des multiples corvées qui s'abattent sur elle. La cicatrice vaccinale lui semble être un marquage policier, analogue au tatouage de l'ancre qui permet l'identification des déserteurs chez les marins. Le contexte est donc peu favorable pour un développement socialement harmonieux de la vaccine. Malgré les nombreuses punitions, la campagne vaccinale en Égypte ne pouvait avoir l'efficacité souhaitée.

Dans le reste du monde, se joue une partie tout aussi difficile. En Angleterre,

au pays de Jenner, la loi instaurant l'obligation de la vaccination contre la variole et un système d'amendes et d'emprisonnement en cas de désobéissance ont déclenché des manifestations si violentes et si durement réprimées que la loi finit par être abrogée au milieu du XIX^e siècle.

LES RÉSISTANCES

La résistance à la vaccination est, en fait, résistance à l'administration et à l'État. Elle s'exacerbe encore quand l'autorité est étrangère. Dans les colonies françaises, certains hygiénistes pensaient que, dans ces terrains « vierges », ils auraient la tâche facile. En fait, en Algérie par exemple, où la vaccine est introduite de façon énergique et précoce, les populations manifestent une opposition immédiate. Les médecins coloniaux hésitent entre persuasion et contrainte. Certains préconisent de laisser le choix aux villageois de se faire vacciner ou non : quand une épidémie surviendra, elle décimera les non-vaccinés, ce qui



En Chine, pour lutter contre la variole, on introduisait dans le nez des personnes à protéger du broyat de pustules de varioleux. La méthode avait une efficacité aléatoire.

devrait convaincre les survivants de l'intérêt de la vaccination...

En Algérie, on pratiquait, de longue date, une variolisation populaire, entre le pouce et l'index, et non au bras comme à Constantinople. Les médecins utilisaient plusieurs arguments. Religieux : on a le droit de lutter contre la maladie, car le Prophète a dit qu'à toute maladie, il y a un remède. Politique : la vaccine, transmise de bras à bras, d'une personne à l'autre, est l'image du mélange des sangs, symbole d'un métissage des corps et des cultures. Mais, dès 1853, la répugnance des Arabes à recevoir un liquide dont ils ne comprennent pas la nature, «la goutte de

sang du roumi ou de l'infidèle» est reconnue officiellement.

Plus qu'une résistance au progrès, la résistance populaire est une résistance à la contrainte, voire à la brutalité avec laquelle sont parfois menées les campagnes. Les indigènes opposent la «variole de Dieu», qui désigne une variole légère envoyée par le Ciel pour protéger les enfants, et la «vaccine du gouvernement», assimilable aux impôts, à la conscription, ou à toute autre tracasserie administrative. En Algérie, la résistance prend naissance dans une culture de tribus jalouses de leur liberté. Les villageois, quant à eux, expriment leurs doutes sur l'origine du zèle administratif. Ils comprennent mal

que l'administration soit si soucieuse de leur santé, alors qu'en hiver, elle prélève de lourds impôts et fait régner la famine.

DE LA RESISTANCE À LA RÉVOLTE

Autre épisode de résistance populaire, celui que les Brésiliens appellent la Guerre du vaccin, *Revolta da vacina*. En 1904, la loi décrétant l'obligation de la vaccine suscite une révolte à Rio de Janeiro. De jeunes élèves de l'École polytechnique font le coup de poing sur les barricades, au nom de la liberté et des Droits de l'homme, au côté des miséreux qui, pour se battre, utilisent la *capoeira*, le sport de combat des anciens esclaves. On dénombre une vingtaine de morts, plusieurs centaines de blessés, et plus d'un millier de prisonniers. Expédiés dans l'île du Cobra, les prisonniers meurent rapidement des fièvres locales.

A l'évidence, la résistance populaire est alors résistance aux transformations urbaines menées rondement, et qui menacent les petits métiers des anciens quartiers. Cette résistance révèle aussi la préférence donnée par le peuple brésilien à certains rituels contre la variole, incluant des danses en l'honneur de fétiches, proches de ceux du Dahomey, d'où vient la majorité des esclaves de la région. La résistance à la vaccination est aussi parfois tout simplement réaction devant l'inefficacité ou le danger du produit. Loin d'être un refus de la modernité, il s'agit alors de la réaction à une expérience négative.

Le recours à la vache comme source de vaccin a permis d'abandonner la méthode de bras à bras, qui présentait l'inconvénient de transmettre d'autres infections, telle la syphilis. De surcroît, les familles étaient hostiles à l'exploitation de leurs enfants comme réservoir de vaccin : la «traite» de leurs pustules ne risquait-elle pas de les affaiblir ? Les enfants des «croisières de la vaccine», qui partirent d'Espagne vers le Nouveau Monde, étaient, le plus souvent, des orphelins.

Plus tard, l'utilisation de la vache comme réservoir de vaccine suscita une nouvelle crainte : celle de l'animalisation. Des caricaturistes représentaient les vaccinés avec des cornes sur la tête, exprimant les fantasmes liés à la transgression de la barrière d'espèce.

La vaccination contre la variole exploite un virus naturellement bénin. Ce n'est pas le cas dans la plupart des autres maladies infectieuses, où l'agent pathogène doit être atténué avant d'être administré. Le choix entre vaccin vivant et vaccin tué divisa la communauté médicale. Lorsqu'entre 1908 et 1921, le



La résistance face aux campagnes vaccinales s'est manifestée très tôt et parfois de façon violente. Dans les pays colonisés, par exemple au Maroc, on considérait la vaccination comme une contrainte administrative, au même titre que le prélèvement des impôts.



Dans certains pays, notamment en Angleterre, on craignait que l'injection de la vaccine ne transforme l'homme en animal.

pastorien Albert Calmette prépare le BCG à partir d'une souche de bacille bovin tuberculeux, atténuée par plus de 200 «repiquages» en milieu artificiel, il parie sur l'immunisation au moyen de bacilles vivants atténués, mais ses adversaires redoutent que les vaccinés ne deviennent, à leur tour, des réservoirs de germes, les micro-organismes atténués risquant de retrouver leur virulence dans l'organisme humain.

En 1928, plus de 70 enfants meurent, à Lübeck, après avoir été vaccinés par le BCG. Au procès qui suit ces décès, les juges concluent à une «erreur» : les enfants auraient reçu des bacilles tuberculeux au lieu de souches atténuées. Ce verdict semblait éliminer l'hypothèse d'un retour spontané des souches de BCG à la virulence.

Via Cecilia de Romo - Musée de médecine de Mexico



Le berger Isidoro Delgadillo est le premier enfant mexicain vacciné contre la rage. Il devient un héros national. Eduardo Liceaga, le médecin qui l'a vacciné, avait appris la méthode à Paris, auprès de Pasteur.

Quand l'Etat de Lübeck avait promulgué la vaccination contre la tuberculose, la bourgeoisie ne s'était guère pressée d'obtempérer. Pour amorcer le mouvement, et sans dire qu'il s'agissait d'un vaccin, les médecins avaient proposé un petit pécule pour motiver les parents : les enfants morts de Lübeck étaient des pauvres. Depuis, les pays anglo-saxons et surtout les États-Unis sont restés méfiants à l'égard du BCG, pour des raisons où se mêlent le désir de chaque nation de faire ses propres choix scientifiques, la défiance face aux statistiques et aux réactions de l'organisme soumis au BCG, et le rêve d'une utopie sociale qui, à elle seule, viendrait à bout de la tuberculose.

L'histoire sociale de la vaccination a comporté une vaste expérimentation humaine. Elle a eu ses héros comme Joseph Meister, vacciné par Pasteur contre la rage en 1885, un enfant venu d'Alsace sous domination allemande, et adopté comme héros national. Le mythe national français a été transposé dans d'autres pays, par exemple au Mexique. En 1887, le président Porfirio Diaz, positiviste convaincu, envoie son médecin personnel, Eduardo Liceaga, au laboratoire de Pasteur. Liceaga rapporte à Mexico des lapins inoculés par la rage. Après quelques expériences, a lieu la grande première, la vaccination contre la rage de l'homologue de Joseph Meister, le jeune berger Isidoro Delgadillo. Un grand tableau immortalise la scène, illustrant la naissance du Mexique moderne.

Mais, à côté de ces héros nationaux, combien d'anonymes ! En 1903, l'Institut Pasteur envoie une mission à Rio de Janeiro pour en finir avec la fièvre jaune. À l'arrivée, Émile Roux qui guide l'expédition déplore que le gouvernement brésilien ne permette pas les expérimentations humaines. Après

négociation, le gouvernement donne l'autorisation attendue. Ces «hommes de bonne volonté», que souhaitait Roux, sont des immigrants fraîchement débarqués, très vulnérables à la fièvre jaune et... rémunérés. Parmi les Européens venus chercher fortune, se trouvent un Portugais, un Allemand et un Italien. Ils débarquent à Rio ; une semaine plus tard, ils sont au laboratoire ; huit jours après, ils sont morts. Le «vaccin» administré, un sérum de jaunes atténué par chauffage, leur a peut-être transmis le microbe invisible de la fièvre jaune.

SCIENCE ET CROYANCE

La vaccinologie puise aux connaissances et aux méthodes les plus fraîchement conçues. En même temps, elle fait appel à des formes sociales ancestrales, à la solidarité devant le danger, à la fusion des destins individuels face à une menace commune. Pourtant, malgré le progrès des connaissances, il subsiste bien des inconnues dans les mécanismes de constitution de l'immunité de l'individu et du groupe. Après des siècles de variolisation, après avoir célébré le deuxième centenaire de la vaccination jennérienne, force nous est de reconnaître les inconnues scientifiques sous-jacentes à une mesure qui a, de façon récurrente, emprunté la rigueur de la loi.

Il existe enfin, au-delà des raisons scientifiques qui entrent dans l'acceptation d'un vaccin, un supplément de croyance. Cette participation émotionnelle explique les réactions du public qui oscille parfois entre un attachement fanatique et un rejet radical, et les réactions des médecins eux-mêmes. Quand le

pouvoir politique prononce un moratoire, comme dans le cas du vaccin contre l'hépatite, la croyance bascule. Si un vaccin se révèle dangereux ou inefficace, tout l'édifice de la vaccination est remis en question. Une enquête sociologique, faite il y a 20 ans, a montré les conséquences inattendues de l'abandon du vaccin antivariolique : au lieu de mesurer le succès que représentait l'éradication de cette maladie mortelle, une proportion notable de la population a commencé à douter de la nécessité de continuer à pratiquer les autres vaccinations.

La vaccinologie doit s'inquiéter des «lois de l'acceptabilité», c'est-à-dire des conditions du dialogue entre sociétés et gouvernements, d'une part, entre sociétés et scientifiques, d'autre part. Dans la notion d'acceptabilité vaccinale entrent toutes sortes de composantes, au nom desquelles une société décide qu'une vaccination est impérative, vivement recommandée, souhaitable ou superflue. La vaccination, qui tire son efficacité de l'implication de la collectivité et de la constitution d'une immunité de groupe, illustre le conflit toujours latent entre les intérêts de l'individu et ceux de la société. Elle prend l'individu en tenaille entre sa revendication d'autonomie et le respect d'autrui. Elle illustre la tension persistante entre le droit à la santé et le devoir de protéger la collectivité, entre ce que Michel Foucault appelait «le souci de soi» et «la gouvernamentalité de la vie».

Anne Marie MOULIN, médecin et historienne des sciences (CNRS), dirige le département Sociétés et Santé à l'Institut de recherche pour le développement, l'IRD.



Les œufs de 100 ans

HERVÉ THIS

Expériences avec des acides et des bases.

Pour préserver les œufs, on les plaçait jadis dans le sable, la sciure, ou la cire, par exemple. Certains peuples d'Orient ont même mis au point des recettes qui tiraient avantage du vieillissement au lieu d'en pallier les effets : les œufs en conserve, également nommés «œufs centenaires» ou «œufs vieux de 1 000 ans», symbolisent les liens avec le passé, ainsi que la longévité. Que valent ces recettes, au point de vue chimique ? Quelques expériences révèlent le comportement inattendu des œufs en milieu acide ou basique.

L'art chinois de conserver les œufs se perd dans la nuit des temps. Initialement on immergeait les œufs dans des sucres extraits d'un arbre local. Puis on découvrit qu'en plaçant les œufs dans un mélange de cendres et de terre, au frais et à l'obscurité, on obtenait le même résultat culinaire, mais en seulement 10 à 12 semaines.

Pourquoi ces pratiques ? Peut-on en imaginer d'autres ? Notons d'abord que la recette des œufs de 100 ans varie selon les régions de Chine. Certains les préparent plutôt en plaçant des œufs de cane dans un emplâtre qui contient des ingrédients variés : chaux, salpêtre, bicarbonate de sodium, boue, herbes odorantes, thé, paille de riz... On laisse reposer au moins trois mois, et l'on dit que la saveur se bonifie progressivement.

Il est étonnant que certains de ces ingrédients soient également utilisés dans des régions françaises : même des civilisations récentes comme la nôtre font usage de la chaux ou des cendres, lesquelles contiennent de la potasse. Ainsi les recettes de conservation forment deux classes : celles qui abritent seulement les œufs, et celles qui les mettent au contact d'un composé basique. Quel est l'effet des bases ? Et celui des acides ? Après tout, une recette française conseille aussi de placer des œufs de caille dans du vinaigre.

Expérimentons en plaçant un œuf entier, dans sa coquille, dans un grand récipient transparent. Quand on recouvre de vinaigre d'alcool blanc, des bulles se dégagent bientôt : l'acide acétique du

vinaigre attaque-t-il le carbonate de calcium ? Une bougie allumée, dans le récipient, finit par s'éteindre : c'est l'indication que l'acide dégage du dioxyde de carbone, qui, plus dense que l'air, s'accumule dans le récipient, chassant l'air (on peut faire plus technique en recueillant le gaz dans de l'eau de chaux, qui se trouble). Puis, après une demi-journée environ, une mince peau rouge se détache. Voilà pourquoi les œufs ont une coquille rosée : le blanc du carbonate et le rouge de cette peau font la couleur finale.

Continuons d'observer : après une ou deux journées de lent dégagement gazeux, l'œuf semble grossir. Est-ce seulement une impression ? La suite des événements montrera que le grossissement est réel : le volume final peut être plus du double du volume initial (voir la photographie ci-dessus). La coquille, elle, a été complètement dissoute, mais le contenu de l'œuf n'est pas répandu dans le vinaigre, car l'acidité coagule le blanc : des expériences avec plusieurs œufs qu'on sacrifie à des temps différents montrent que cette coagulation, d'abord limitée à une mince couche externe, concerne une épaisseur de blanc croissante, et s'étend même jusqu'au jaune. À la réflexion, l'effet n'est pas complètement imprévisible, car on le retrouve quand on verse du vinaigre sur du blanc d'œuf, dans un bol : la couche superficielle du blanc coagule notamment parce que les ions H^+ apportés par l'acide évitent l'ionisation des groupes acides des protéines, tandis qu'ils provoquent l'ionisation des groupes basiques, qui se chargent ainsi positivement (les bases ont l'effet inverse) ; les répulsions électriques entre les groupes chargés des protéines déplient alors ces dernières, qui se lient par des forces nommées pont disulfure, entre des atomes de soufre. Le réseau de protéines ainsi formé piège l'eau : c'est cela la coagulation.

Si la dissolution de la coquille et la coagulation du blanc s'expliquent simplement, pourquoi la dilatation ? Le phénomène d'osmose serait-il à l'origine du gonflement ? Les molécules d'eau

tendent à passer des zones où elles sont le plus concentrées, vers les zones où elles le sont moins. Or, si la concentration en eau est voisine de 95 pour cent dans le vinaigre, elle n'atteint que 90 pour cent dans le blanc d'œuf. De surcroît, alors que l'acide acétique migre vers l'intérieur du blanc (on le vérifie en mesurant l'acidité du blanc d'un œuf qui a attendu pendant plusieurs semaines, dans le vinaigre), les protéines qui sont dissoutes dans l'eau des blancs sont des molécules trop grosses pour traverser la membrane coagulée. Au total, c'est l'eau du vinaigre qui entre pour réduire la concentration en eau.

Pour corroborer cette hypothèse, il suffit de laisser des œufs dans une solution d'acide acétique à une concentration supérieure à dix pour cent : le même phénomène de dissolution de coquille a lieu, mais, cette fois, l'œuf est finalement d'une taille médiocre, parce que l'osmose est réduite. Et, puisque nous y sommes à acidifier des œufs, que donnerait un œuf dans une solution concentrée d'acide chlorhydrique ? On obtient finalement le même petit œuf qu'avec une solution d'acide acétique, mais la coagulation est bien plus rapide et nette.

Je vous invite à faire les expériences : bien d'autres surprises attendent celui qui sait observer. Par exemple, quand la coquille est dissoute et que le blanc est encore translucide, on voit le jaune flotter dans le blanc.

Et les bases ? Un blanc d'œuf additionné de soude caustique a commencé par coaguler, alors qu'une réaction chimique engendrait un gaz sulfuré, nauséabond. Puis l'œuf est redevenu clair. Manifestement la soude a dissocié les protéines, après avoir provoqué leur précipitation. Dans la cendre ou dans la chaux, à des pH inférieurs, attendons... 100 ans.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 30 octobre 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Informatique vestimentaire

Comment l'étude d'un problème d'informatique peut aider à s'habiller.

Aujourd'hui, vous avez décidé d'être raffiné. Vous vous imposez de porter au moins un article de chacun des groupes suivants : le pantalon vert ou la chemise rayée ou la veste marron ; le pantalon orange ou la veste violette ; la chemise à pois ou le pantalon vert ; et enfin la veste marron ou le pantalon orange ou la chemise rayée. Vos collègues vont-ils vous voir arriver nu ?

Cet exemple illustre un problème nommé satisfiabilité, ou K-SAT : sur un ensemble de N variables (pantalon, veste, chemise) prenant deux valeurs (pour les pantalons, vert ou orange), on compose un ensemble de M clauses (par exemple, on doit porter au moins le pantalon orange ou la veste violette) contenant chacune un nombre K de variables, ou de leur négation (la négation de pantalon vert est pantalon orange), associées par un «OU» inclusif logique. Une clause est satisfaite lorsqu'au moins une des variables ou une des négations de variables est vérifiée. Par exemple, la deuxième clause est satisfaite lorsque vous portez soit le pantalon orange, soit la veste violette. En envisageant toutes les combinaisons possibles de pantalon, de chemise et de veste, on cherche à assigner à chaque variable une valeur

(ici, une couleur), telle que toutes les clauses soient satisfaites.

Quand le nombre de clauses est grand, un ordinateur est nécessaire pour trouver les solutions, si elles existent. Or, le temps de résolution d'un problème de 2-SAT (deux variables par clause, par exemple les clauses 2 et 3 de la figure) varie en fonction d'une puissance de N , il est donc polynomial et on dit que le problème est de la classe P . En revanche, pour un problème de 3-SAT (trois variables par clause), le temps est une fonction exponentielle de N : le problème est dit NP -complet, c'est-à-dire qu'il n'existe – aujourd'hui – aucun algorithme polynomial pour le résoudre.

Un problème NP -complet est le représentant d'une grande famille de problèmes. Rémi Monasson, de l'École normale supérieure, avec Riccardo Zecchina, Scott Kirkpatrick, Bart Selman et Lidror Troyansky, a analysé la modification du comportement des temps de résolution qui accompagne le passage d'un problème de 2-SAT à un problème de 3-SAT, notamment grâce aux analogies qui existent entre les problèmes de K-SAT et les phénomènes de transition de phase en physique.

Quel rapport existe-t-il entre une garde-robe et une transition de phase ? Lorsqu'on étudie la satisfiabilité d'ensembles de clauses déterminées aléatoirement, en fonction du rapport α de M sur N , on constate qu'au-dessous d'une valeur critique, la probabilité de trouver des valeurs qui satisfont un ensemble de clauses est proche de un, tandis qu'au-dessus de cette même valeur, cette probabilité devient très faible. Plus le nombre de variables croît, plus le passage d'un régime à l'autre est brusque :

la courbe de probabilité de satisfiabilité en fonction de α présente un saut, rappelant ainsi les phénomènes de transition de phase, telle une vaporisation. On observe la transition de phase lorsqu'une fraction des variables devient totalement contrainte, c'est-à-dire qu'elle est obligée de prendre la même valeur dans toutes les solutions qui satisfont l'ensemble de clauses. Dans notre exemple, la variable «veste» n'est pas contrainte puisqu'elle prend une valeur différente dans les deux solutions.

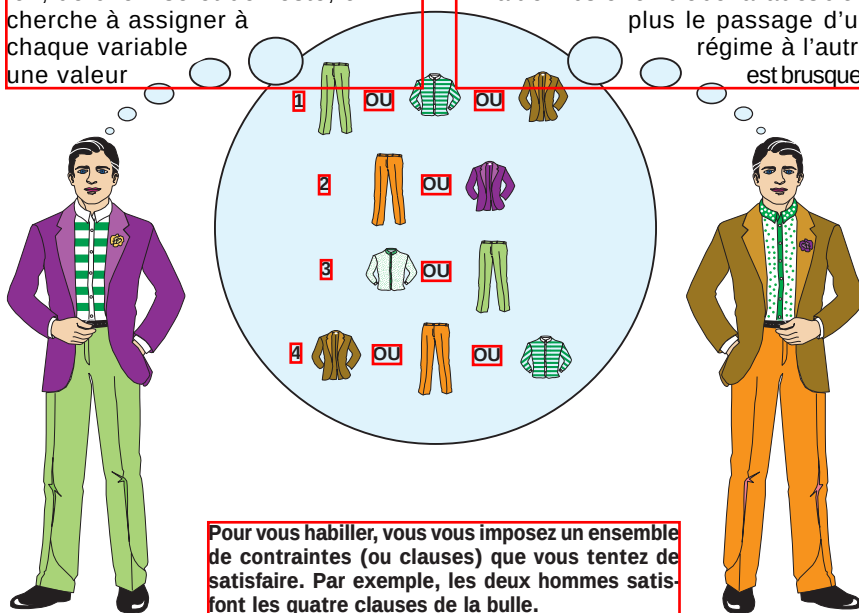
Par ailleurs, quand α est très différent de la valeur critique, la résolution du problème est rapide. Pour un petit α , avec beaucoup de vêtements et peu de clauses, vous aurez peu de difficultés à trouver une solution pour vous habiller. Pour des α élevés – vous êtes très exigeant avec peu de vêtements – il est facile de deviner que vous sortirez nu. En revanche, lorsque α est proche de sa valeur critique, il est difficile soit d'assigner aux variables des valeurs qui satisfassent les clauses, soit de démontrer l'insatisfiabilité.

Pour comprendre l'augmentation de difficulté entre un problème de 2-SAT et un problème de 3-SAT, les physiciens ont étudié la $(2 + p)$ -SAT, où p , compris entre zéro et un, rend compte de la proportion de clauses à trois variables par rapport aux clauses à deux variables. Devant votre garde-robe, vous êtes confronté à un problème de 2,5-SAT, puisque $p = 2/4 = 0,5$.

En faisant varier p de zéro à un, les physiciens ont montré que la transition d'un problème polynomial à un problème exponentiel, autrement dit d'un problème facile à un problème difficile, s'effectue pour une valeur critique p_0 .

Quand p est inférieur à p_0 , la résolution d'un problème de K-SAT adopte le profil d'une transition de phase continue (le passage d'un état à l'autre est progressif), c'est-à-dire que le nombre de variables totalement contraintes augmente peu à peu : le temps de résolution du problème est alors fonction d'une puissance de N . Tandis que lorsque p est supérieur à p_0 , le profil est celui d'une transition de phase discontinue (le passage est brusque), le nombre de variables totalement contraintes augmente d'un coup : le temps de résolution croît alors exponentiellement en fonction de N .

Votre dilemme vestimentaire se résout de deux façons : pantalon vert, veste violette et chemise rayée ; ou pantalon orange, veste marron et chemise à pois.



Pour vous habiller, vous vous imposez un ensemble de contraintes (ou clauses) que vous tentez de satisfaire. Par exemple, les deux hommes satisfont les quatre clauses de la bulle.

La baignoire d'Archimède

On déchiffre un manuscrit du X^e siècle qui contient le traité sur les corps flottants d'Archimède.

Archimède découvrit les lois de l'hydrostatique alors qu'il était dans sa baignoire, dit-on, et il sortit nu dans la rue en criant *Eureka* : étudiant la falsification probable de la couronne de Hiéron d'Alexandrie, il avait découvert que la force de poussée qui s'exerce sur un corps immergé est égale au poids de la masse d'eau déplacée.

L'histoire est-elle vraie ? Les preuves manquent, tout comme manquaient les textes décrivant correctement l'œuvre scientifique du grand inventeur grec. Un palimpseste vendu aux enchères en 1998 contient toutefois le texte du traité sur les corps flottants, recouvert par des prières.

Ce «palimpseste d'Archimède» est un parchemin qui est aujourd'hui

conservé à la Galerie Walters, à Baltimore, et qui sera étudié par une équipe d'historiens des sciences dans les cinq prochaines années. On ignore aujourd'hui où le texte d'Archimède fut initialement écrit (en grec), mais William Noël, conservateur de la galerie Walters, suppose qu'il fut produit à Constantinople, dans un monastère ou dans un palais impérial.

Entre l'an 950 et le xv^e siècle, on ne sait où le manuscrit fut conservé, mais, au xii^e siècle, il fut coupé en deux, les feuilles furent tournées d'un quart de tour, et un moine de Constantinople gratta le vieux parchemin et copia des prières au-dessus du texte de physique. Ces textes religieux assurèrent la préservation du palimpseste. À partir du xv^e siècle, on en retrouve la trace dans le catalogue du monastère de Mar Saba, à quelques kilomètres à l'Est de Bethléem. Il reste là jusqu'au xix^e siècle, puis il revient à Constantinople en 1907, où il est alors étudié par le Danois Ludvig Heiberg, qui transcrit ce qu'il peut à l'aide d'une loupe et de lumière naturelle. Puis la trace du palimpseste est de nouveau perdue jusqu'en 1920, où il entre dans une collection privée, à Paris. Enfin, il est vendu aux enchères en 1998.

Les prières du xii^e siècle recouvrent le texte original d'une rarissime version de plusieurs traités : le document porte la *Méthode des théorèmes mécaniques* (une procédure mécanique qui anticipait les travaux de Newton) et six autres traités, dont le *Traité des corps flottants*, le seul original connu en grec.

Par chance, celui qui copia les textes d'Archimède avait appuyé suffisamment fort sur le parchemin : les traces, à 90 degrés du texte des prières, sont visibles sous des éclairages spéciaux. Les programmes d'analyse d'images qui seront appliqués au palimpseste devraient redonner le texte d'Archimède, tel qu'il a été posé un peu avant l'an mil.

Immortel Archimède...

BRÈVES

Millénaire retardé

La sonde *Cassini-Huygens* a récemment tourné autour de la Terre, et profité de la force de gravitation pour acquérir suffisamment d'énergie et s'élancer vers Jupiter, puis vers Saturne, qu'elle atteindra en 2004. L'énergie cinétique récupérée par la sonde a été prise à la Terre qui a donc ralenti. John Zarnecki, de l'Université du Kent, a calculé cette déperdition : nous entrerons dans le nouveau millénaire avec un retard d'environ un millième de milliardième de seconde. L'année 2000 sera un peu plus courte que l'année 1999.



Une clé cassée

Plus de 90 pour cent des transactions effectuées sur le réseau *Internet* utilisent un codage dont la clé est un nombre de 155 chiffres (ou 512 bits) obtenu par le produit de deux nombres premiers. La société qui commercialise ce système de sécurité a promis une récompense à qui réussirait à déterminer les deux facteurs. Armée de 292 ordinateurs personnels et d'un super ordinateur *Cray-C916*, une équipe internationale a cassé le code le 22 août dernier, c'est-à-dire qu'elle a identifié les deux nombres de 78 chiffres. Aussitôt, la société a recommandé d'utiliser des codes à 768 ou 1 024 bits.

Voir les atomes

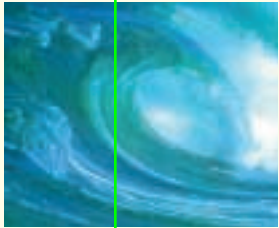
Quelle est la forme des atomes ? Tout dépend de leurs électrons. Ces derniers se répartissent dans l'espace selon des orbitales, leurs zones d'occupation les plus probables, qui ne sont pas toutes sphériques. Certaines ont une forme de huit, d'autres de trèfle à quatre feuilles... À l'Université de l'Arizona, J.M. Zuo a focalisé un faisceau d'électrons sur une zone sans défaut d'un cristal pour observer ces orbitales : les images sont exactement comme on le prévoyait en résolvant l'équation de Schrödinger. Le cristal choisi par J.M. Zuo et ses collègues est l'oxyde cuivreux, important parce qu'il semble être la clé de la remarquable supraconduction à haute température, découverte il y a dix ans.



Le palimpseste d'Archimède (en haut) est aujourd'hui livré aux experts. À l'aide d'éclairages spéciaux et de logiciels d'analyse d'images, on analysera le document grec recouvert par des prières (en bas).

La disparition des océans

Selon des géologues japonais, dans quelques milliards d'années, la Terre sera aussi désertique que Mars l'est aujourd'hui. Les géophysiciens pensent qu'un immense réservoir d'eau dort à quelque 400 kilomètres sous la surface de la Terre, alimenté par l'eau des océans qui s'infiltrent dans le manteau dans les zones de subduction.



L'eau «ressort» de la Terre au moment des éruptions volcaniques terrestres ou sous-marines. Or, les océans semblent «fuir» : l'eau s'infiltre dans le manteau terrestre cinq fois plus vite qu'elle n'est rejetée. Dans un milliard d'années, le niveau de la mer aura peut-être baissé de 600 mètres ; comme le Soleil en expansion chauffera davantage la Terre, il ne fera plus très bon y vivre.

Faux clone

Dolly, la brebis clonée, est-elle identique à sa mère? Dolly est née de la fusion d'une cellule de brebis adulte et d'un ovocyte d'une autre brebis dont on avait retiré le noyau, donc l'ADN nucléaire. Or, une toute petite partie du génome est contenue dans l'ADN des mitochondries, des organites qui fournissent leur énergie aux cellules. Au moment de la division cellulaire, le nombre des mitochondries double, et chaque cellule fille reçoit la moitié des mitochondries présentes dans le cytoplasme de la cellule mère. De quelles mitochondries proviennent celles des cellules de Dolly? Une équipe de l'Université de New York a montré qu'elles proviennent en majeure partie des mitochondries de l'ovocyte : à cause de ses mitochondries, Dolly n'est pas totalement identique à sa «mère».

Mémoire à l'église

En septembre 1997, la Basilique Saint-François, à Assise (Italie), est endommagée par une série de cinq tremblements de terre. Comment limiter les dégâts à venir pour ce monument situé sur une zone sismique? En utilisant des alliages à mémoire de forme. Parmi les propriétés inhabituelles de ces alliages, leur capacité à reprendre leur position initiale après de grandes déformations est des plus utiles. Grâce à elle, le monument dissipera mieux l'énergie mécanique, caractéristique essentielle pour résister à un tremblement de terre.

Les minoritaires font mouche

Les parades sexuelles des drosophiles dépendent de substances sécrétées en faible quantité.

Sur un fruit mûr oublié, des mouches de différentes espèces se posent et s'envolent dans un ballet incessant. Pour ces insectes, les zones de nourriture constituent des endroits privilégiés de rencontre, et plus si affinés : deux individus de sexes opposés d'une même espèce s'accouplent après une parade nuptiale.

La parade sexuelle du mâle est déclenchée par des substances, nommées phéromones, sécrétées par la femelle ; certaines sont abondantes – les phéromones majoritaires. D'autres sont libérées en faible quantité, ce sont les phéromones minoritaires.

L'équipe de Jean-François Ferveur, du Laboratoire de développement et communication chimique de l'Université de Bourgogne, à Dijon, a montré que seules les phéromones minoritaires sont responsables de la stimulation sexuelle du mâle, tandis que les phéromones majoritaires sont impliquées dans la distinction des espèces.

Les phéromones sont sécrétées par des cellules nommées cénocytes, placées sous l'épiderme de l'abdomen des mouches. Les signaux sont soit olfactifs, c'est-à-dire que les phéromones sont soit volatiles et perçues par des récepteurs présents sur les antennes et sur une partie de l'appareil buccal, soit gustatifs lorsque les composés, trop lourds et donc peu volatils, ne sont captés

qu'après contact gustatif de la trompe, ou des poils des pattes.

Les phéromones se distinguent également selon la quantité produite par l'insecte. Les phéromones dites majoritaires sont présentes à raison de 2 000 nanogrammes (milliardièmes de gramme) sur la cuticule de l'insecte, tandis que l'on trouve seulement environ 100 nanogrammes de phéromones minoritaires. Les entomologistes

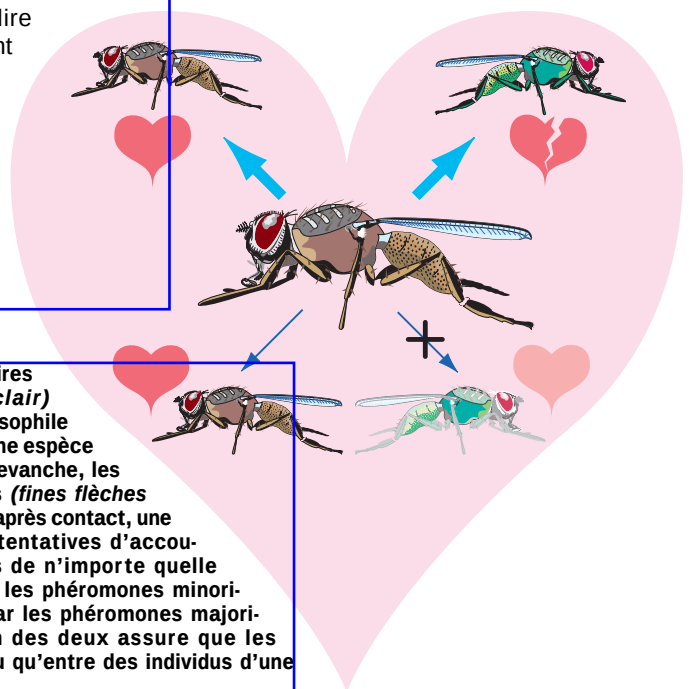
pensaient que les phéromones majoritaires étaient les principaux facteurs de l'attraction sexuelle chez les drosophiles.

Or, J.-F. Ferveur et ses collègues ont effectué diverses expériences qui infirment cette hypothèse.

Ainsi, lors d'une première expérience, ils ont débarrassé la cuticule des phéromones majoritaires en plongeant de jeunes mouches âgées de six heures dans un bain-marie à 37 °C : ce traitement empêche la synthèse des phéromones majoritaires.

En effet, les phéromones sont des hydrocarbures, c'est-à-dire des enchaînements d'atomes de carbone liés à des atomes d'hydrogène. Alors que les phéromones minoritaires sont saturées, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune double liaison entre deux atomes de carbone, les phéromones majoritaires sont insaturées. Les phéromones sont d'abord synthétisées sous forme saturée, puis, l'enzyme désaturase transforme les molécules saturées en molécules insaturées.

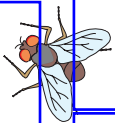
Au cours de l'expérience où les phéromones insaturées majoritaires n'étaient plus synthétisées (seules les phéromones minoritaires étaient présentes), les drosophiles femelles



Les phéromones majoritaires (larges flèches bleu clair) émises par la femelle drosophile repoussent les mâles d'une espèce différente (en vert). En revanche, les phéromones minoritaires (fines flèches bleu foncé) déclenchent, après contact, une parade nuptiale et des tentatives d'accouplement chez les mâles de n'importe quelle espèce. Dans la réalité, les phéromones minoritaires sont masquées par les phéromones majoritaires, et l'association des deux assure que les accouplements n'ont lieu qu'entre des individus d'une même espèce.

traitées continuaient à stimuler une parade nuptiale chez les mâles de leur espèce, mais aussi chez les mâles d'espèces différentes.

Dans une seconde expérience, des drosophiles femelles ont été «nettoyées» de toutes leurs phéromones par un solvant, puis recouvertes de phéromones majoritaires d'une espèce différente. Elles n'ont eu aucun succès auprès des mâles de leur espèce qui refusaient de les courtiser. Ces phéromones majoritaires



constituent donc un rempart qui empêche les croisements et les accouplements interspécifiques (les accouplements sont parfois possibles, mais la descendance est stérile). Les phéromones majoritaires éliminent les partenaires d'espèces différentes. C'est ensuite aux phéromones minoritaires de déclencher la parade sexuelle du mâle choisi.

Les phéromones minoritaires de plusieurs espèces de drosophiles sont très semblables, et les entomologistes

supposent qu'elles ont une origine commune. Elles seraient des phéromones primitives, caractéristiques des drosophiles ancestrales, tandis que la synthèse des phéromones majoritaires serait un caractère récent, apparu pour renforcer la spéciation.

Les êtres humains s'inspireront peut-être de ces résultats en diminuant la quantité du parfum – de majoritaire, cette phéromone artificielle deviendra minoritaire – qu'ils utilisent comme arme de séduction.

L'espion et l'ADN

Des biologistes utilisent de l'ADN pour transmettre un message secret.

Je suis très émue de vous dire que j'ai bien compris, l'autre jour, que vous avez toujours une envie folle de me faire danser. Je garde un souvenir de votre baiser et je voudrais que ce soit là une preuve que je puisse être aimée par vous...

G. Sand à A. de Musset

Par un matin d'hiver brumeux, deux voitures s'arrêtent sur une place déserte. Deux hommes en descendant après les appels de phares de circonstance. Une fois face à face, l'un sort de sa poche un petit tube glacé qu'il donne à l'autre. Puis sans un mot, tous deux retournent vers leur véhicule. Soudain, un troisième homme court, renverse un des hommes et lui dérobe le tube avant de disparaître dans le brouillard. Les deux hommes ne semblent pas émus. Ils savent que le voleur aura fort à faire pour déchiffrer le message contenu dans le tube, et plus précisément dans la molécule d'acide désoxyribonucléique (ADN) qui y est conservée. Ils ont dissimulé leur message dans un mélange de molécules d'ADN grâce à la technique mise au point par Carter Bancroft, Viviana Risca et Catherine Clelland, de l'École de médecine de New York.

L'ADN est composé de deux chaînes en vis-à-vis dont les maillons, nommés nucléotides, se caractérisent par un groupe chimique (une base azotée) ; les bases sont l'adénine (A), la cytosine (C), la guanine (G) et la thymine (T). Une cellule traduit un segment d'un brin d'ADN en une protéine (par l'intermédiaire d'une molécule d'ARN) grâce au code génétique qui associe un acide aminé à chaque triplet de nucléotides. Une protéine est constituée d'une succession d'acides aminés.

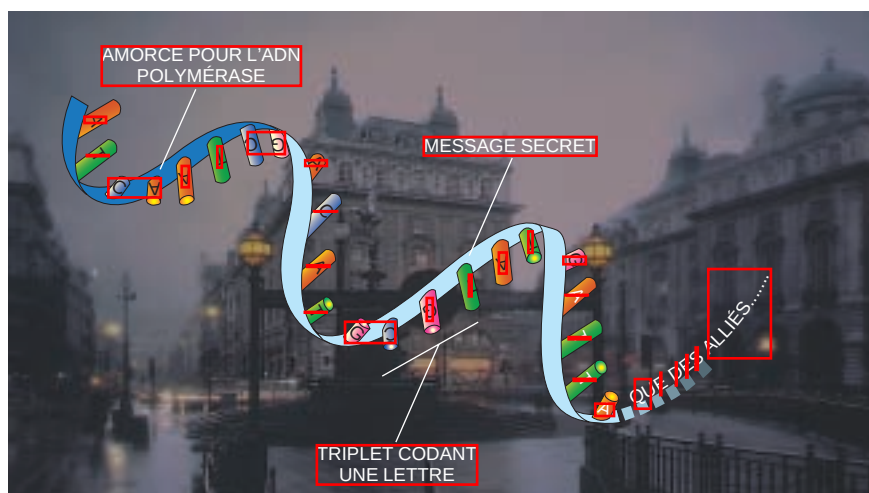
Les biologistes ont détourné ce code en associant à chaque triplet une lettre de l'alphabet, une marque d'espace ou un signe de ponctuation. À chaque caractère correspond une combinaison unique de trois des quatre nucléotides. Avec $I = ATG$, $N = TCT...$, on peut coder le mot «INVASION», par la séquence $ATG-TCT-CCT-CGA-ACG-ATG-GGC-TCT$. On dispose de $4^3 = 64$ combinaisons.

Comment dissimuler, puis déchiffrer le brin d'ADN ? À chaque extrémité du brin signifiant, on place deux amorces, c'est-à-dire deux petites séquences d'environ 20 nucléotides, qui seront reconnues par une enzyme, l'ADN polymérase, qui multipliera à volonté le brin porteur de cette amorce, grâce à la technique d'amplification nommée PCR. Il existe environ 10^{20} amorces possibles, mais seul le receveur du message sait laquelle utiliser pour la PCR. Le brin secret est dissimulé parmi une multitude de brins d'ADN, par exemple, de l'ADN humain dénaturé (en simple brin) et découpé en fragments de même longueur. Un message moyen de 100 nucléotides est ainsi caché dans environ 60 millions de fragments, puisque l'ADN

humain est composé de 6 milliards de nucléotides. Après l'action de l'ADN polymérase, le message devenu largement prédominant est décodé par des techniques biochimiques classiques.

Le message peut être doublement caché grâce à la technique du micropoint, inventée par M. Zapp, à la fin des années 1930, qui consiste à réduire un texte secret à la taille d'un point et à le cacher dans un caractère quelconque d'un texte innocent. Cette technique a été très utilisée pendant la Seconde Guerre mondiale, au point de devenir la pièce maîtresse de l'espionnage. L'échantillon des brins d'ADN et le message secret qu'il contient pourraient être dissimulés dans un point d'un texte. Une personne qui souhaiterait intercepter le message devrait, d'une part, trouver le point et, d'autre part, déchiffrer le message sans connaître la séquence de l'amorce.

Ces travaux constituent une version moderne de la stéganographie où un message destiné à rester secret est dissimulé dans un autre, nettement plus volumineux, qui peut être rendu public. George Sand aurait pu déclarer ses désirs à Alfred de Musset grâce à un brin d'ADN.



Dissimulé dans de nombreux éléments qui lui ressemblent, un fragment d'ADN codant un message secret est reconnu par une enzyme nommée ADN polymérase grâce à une amorce spécifique. Le message ainsi multiplié à volonté est facilement identifié et déchiffré par le destinataire.

Plantes transgéniques purifiées

Pour sélectionner les plantes transgéniques qui ont incorporé le gène que l'on souhaite y introduire, on adjoint à ce dernier un gène de résistance aux antibiotiques : en présence de ces antibiotiques, seuls résistent les plants qui ont intégré le gène de résistance à l'antibiotique et, par conséquent, le gène d'intérêt. Toutefois ce gène de résistance aux antibiotiques inquiète, car on redoute sa dissémination dans l'environnement. Une équipe de l'Université Rockefeller a remplacé ce gène de résistance par un gène codant une enzyme qui participe à la synthèse de l'hormone de croissance des plantes. Au même stade de développement, les tout jeunes plants modifiés ont des rejets, ceux qui n'ont pas incorporé le gène sélectionné n'en ont pas.

Virus gelés

Des virus piégés dans les glaces arctiques y dorment depuis la nuit des temps. Un réchauffement notable de la température de la Terre entraînerait la fonte des glaces et, par conséquent, la libération possible de virus que l'homme n'a jamais côtoyés et qui seraient potentiellement très dangereux. Cette crainte est née de la découverte d'un virus de plante, commun aujourd'hui, dans une carotte glaciaire prélevée au Groenland et qui couvrirait une période d'environ 140 000 ans. Transportés par l'air ou par l'eau, des virus seraient piégés dans les glaces. Dans la glace, leur évolution est figée. Cela expliquerait que des souches apparemment «invariables» réapparaissent en divers points de la Terre : la fonte régulière de la glace au voisinage des pôles libérerait des virus emprisonnés ; emportés par les eaux, ils réinfecteraient une nouvelle région du monde.

Dépollution par les algues

Les algues peuvent absorber des métaux lourds dissous dans les rejets industriels. Séchées puis broyées, les algues sont conditionnées en granulés, bon marché. Mélangés à l'effluent à traiter, ces granulés absorbent jusqu'à plusieurs dizaines de grammes de métaux lourds par kilogramme de granulés. Après saturation, ils sont régénérables plusieurs fois et incinérables en fin de cycle. Une solution écologique!

Anti-inflammatoires de demain ?

Une nouvelle classe d'inhibiteurs enzymatiques.

La vie est un équilibre délicat : chaque réaction biologique est régulée de sorte que la quantité de substance produite reste confinée dans une fourchette «normale». Les enzymes jouent un rôle essentiel dans cette surveillance de la normalité : elles dégradent les molécules, dès qu'elles sont en excès. Simultanément, de multiples inhibiteurs régulent l'activité des enzymes elles-mêmes. Joëlle Vidal, dans l'équipe d'André Collet, à l'École normale supérieure de Lyon, et l'équipe de Michèle Reboud-Ravaux, à l'Institut Jacques Monod, à Paris, ont conçu, synthétisé et testé une nouvelle classe d'inhibiteurs enzymatiques, les alpha-hydrazinopeptides. Ils ont pour cible l'élastase leucocytaire humaine, une enzyme impliquée dans de nombreuses pathologies inflammatoires, telles que l'emphysème pulmonaire, la bronchite chronique, l'arthrite rhumatoïde ou encore le psoriasis.

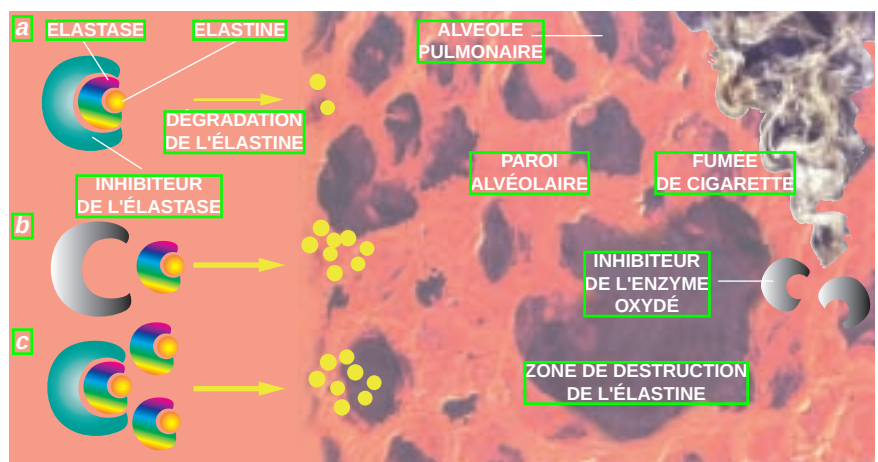
Dans l'organisme, les protéines sont dégradées par des enzymes, les protéases, lesquelles sont contrôlées par des inhibiteurs spécifiques qui évitent une suractivité des protéases et, par conséquent, des dégradations excessives des protéines. Parfois, les protéines sont exagérément dégradées, car les protéases sont trop actives en raison d'un

manque d'inhibiteur : ou bien un gène codant l'inhibiteur est muté, et ce dernier n'est pas produit ou est inactif ; ou bien l'inhibiteur est produit, mais sa structure est modifiée, et il est partiellement inactivé ; ce défaut d'inhibition d'une enzyme est responsable de plusieurs réactions inflammatoires.

L'élastase leucocytaire humaine est une enzyme véhiculée par des globules blancs. Elle est située dans les lysosomes, des organites qui constituent l'appareil digestif des cellules. Dans les conditions physiologiques normales, l'élastase, qui reste localisée dans les lysosomes, participe à l'élimination des cellules infectées ou anormales, mais lors de certaines inflammations, elle est excrétée des lysosomes et libérée sur le lieu de l'inflammation.

Son activité est modulée de deux façons : comme les lysosomes sont des vésicules isolées du reste des constituants cellulaires, l'élastase n'agit, normalement, que dans ces compartiments. Quand il lui arrive de quitter les lysosomes, elle passe dans le sang, et son activité y est contrôlée par son inhibiteur naturel, l'alpha1 PI, et par des inhibiteurs tissulaires, qui agissent localement. Le large spectre d'action de l'élastase lui permet de dégrader différentes molécules, telles que des immunoglobulines (des anticorps) et des constituants de la matrice extracellulaire, l'élastine notamment.

Ainsi, on sait que dans l'emphysème pulmonaire, le gène codant l'inhibiteur principal de l'élastase, l'alpha1-PI, est parfois muté ; la concentration plasmatique de cet inhibiteur diminue, de sorte que l'élastase est trop active et



La protéine élastine est dégradée par l'enzyme élastase leucocytaire humaine, dont l'activité est contrôlée par l'inhibiteur de l'élastase (a). Normalement la dégradation de l'élastine est limitée. Lorsque l'inhibiteur est inefficace (b, en gris), la réaction de dégradation de l'élastine s'emballe et les produits de dégradation de l'élastine (en jaune) s'accumulent. C'est également le cas lorsque l'inhibiteur est actif, mais que l'enzyme est présente en trop grande quantité (c). La paroi (en rouge orangé) des alvéoles pulmonaires (en gris) est alors détruite, de sorte que la surface disponible pour les échanges gazeux diminue. Les personnes ont alors des difficultés respiratoires. La fumée de cigarette oxyde l'inhibiteur, accélérant encore le phénomène.

dégrade à l'excès l'élastine, présente dans la paroi des alvéoles pulmonaires. La surface alvéolaire totale diminue et, par conséquent, les échanges gazeux sont perturbés : les malades ont des difficultés respiratoires. La fumée de tabac aggrave la situation en oxydant l'inhibiteur $\alpha 1$ -PI, ce qui l'inactive.

Dans le cas de la mucoviscidose, les infections bactériennes (notamment par *Pseudomonas aeruginosa*) sont fréquentes ; la concentration en inhibiteur est normale, mais c'est un excès d'enzyme destructrice qui est en cause : en réaction à une telle infection, certaines cellules immunitaires produisent de l'élastase, à laquelle s'ajoute l'élastase libérée par la bactérie, qui est proche de l'enzyme humaine.

Enfin, l'élastase leucocytaire joue également un rôle dans les mécanismes d'invasion tumorale et de dissémination des métastases, en activant d'autres enzymes qui dégradent, elles aussi, la matrice extracellulaire ; n'étant plus bloquées dans un réseau semi-rigide, les cellules tumorales peuvent migrer vers d'autres sites.

Aujourd'hui, la seule parade face à un emphysème pulmonaire d'origine génétique consiste à administrer de l'inhibiteur naturel extrait du plasma. Toutefois ce traitement est onéreux. C'est pourquoi plusieurs équipes recherchent des inhibiteurs de synthèse. Ainsi, les chimistes de Lyon ont modifié la structure d'un peptide cible de l'élastase leucocytaire humaine et ont remplacé un des six acides aminés par un analogue dérivé de l'hydrazine ($\text{NH}_2\text{-NH}_2$). Grâce à l'élaboration de nouveaux réactifs, cette substitution s'effectue aisément et transforme la liaison peptidique CO-NH en une liaison CO-NHNH : on obtient des pseudopeptides, nommés hydrazinopeptides.

M. Reboud-Ravaux et ses collègues ont testé, *in vitro*, l'activité des différents hydrazinopeptides obtenus sur de l'élastase purifiée. Ils sont tous reconnus par la protéase et s'y fixent, mais ils ne sont pas tous dégradés : selon la place occupée par l'acide alpha-hydraziné, les pseudopeptides sont coupés par l'enzyme ou restent intacts. Les hydrazinopeptides qui ne sont pas dégradés bloquent le site actif de l'enzyme : ce sont des inhibiteurs de l'élastase.

Les hydrazinopeptides sont-ils les anti-inflammatoires de demain ? Le passage des tests *in vitro* aux tests *in vivo* reste toujours une étape cruciale et imprévisible. Toutefois, cette nouvelle méthode de préparation d'inhibiteurs enzymatiques offre aux pharmacologues toute une palette de molécules dont l'activité biologique reste à découvrir.

Marie-Thérèse LANDOUSY

Lacs ou océans ?

La surface de Titan, un satellite de Saturne, comprend des zones sombres qui seraient des lacs de matériau organique liquide.

Le 18 août 1999, le véhicule spatial *Cassini-Huygens* a profité de l'attraction terrestre pour être accéléré en direction de Saturne. En 2004, la sonde *Huygens* se séparera de *Cassini* et plongera dans l'atmosphère de Titan, le plus gros satellite de Saturne. Y trouvera-t-elle des lacs ou des océans d'éthane et de méthane, comme le pensent les planétologues ? Dès aujourd'hui, à l'aide du télescope *Keck*, des astronomes américains ont obtenu des images de haute résolution de Titan où l'on distingue des motifs sombres, caractéristiques de lacs d'hydrocarbures.

Malgré des siècles d'observation, Titan demeure l'un des objets les plus mystérieux du Système solaire. Avec un diamètre angulaire de 0,8 seconde d'angle, Titan est une planète difficile à observer : c'est la plus petite taille observable en raison de la turbulence atmosphérique et, par conséquent, toutes les observations faites jusqu'à aujourd'hui mesuraient uniquement des propriétés de l'ensemble du disque de Titan.

Comme celle de la Terre, l'atmosphère de Titan est principalement constituée d'azote, mais elle comprend aussi du méthane, de l'hydrogène et, peut-être, de l'argon. Lorsque les sondes *Voyager* passèrent à proximité, dans les années 1980, tout ce qu'elles distinguèrent fut une couche de brume orangée au sommet de l'atmosphère.

La mince couche de brume qui masque Titan résulte de réactions photochimiques du méthane atmosphérique :



Image de Titan prise par la sonde *Voyager 2*. Une brume opaque, au sommet de l'atmosphère, cache la surface.

sous l'action de la lumière, le méthane produit des molécules organiques et des polymères qui forment une couche opaque aux rayonnements visibles, mais partiellement transparente aux rayonnements infrarouges. De nombreux planétologues pensent que ces produits organiques tombent en pluie sur la planète, qui contiendrait des lacs ou des océans.

À l'aide d'observations dans le visible et dans les fenêtres infrarouges qui permettent d'observer le sol, les astronomes sont maintenant convaincus que Titan n'est pas totalement recouverte d'un océan. En revanche, le satellite de Saturne pourrait receler des mers. La détection de ces mers nécessite une résolution inaccessible par l'observation directe.

Grâce à une nouvelle technique d'imagerie, dite imagerie de tavelure, utilisée sur le télescope Keck de dix mètres de diamètre, implanté à Hawaï, les astronomes ont obtenu des images dans l'infrarouge d'une résolution bien meilleure que toute les images obtenues jusqu'ici. L'imagerie de tavelure permet de s'affranchir partiellement de la baisse de résolution liée à la turbulence atmosphérique. Cette technique fonctionne bien sur des objets brillants tels que Titan.

La méthode est fondée sur la prise d'images avec des temps de pose très

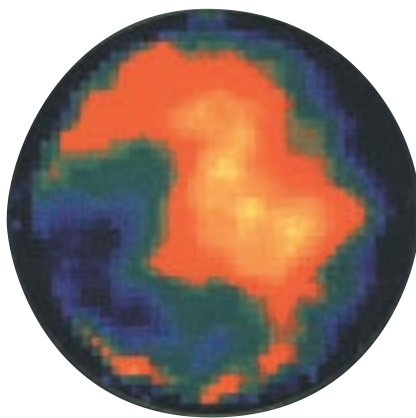


Image de Titan obtenue par la technique d'imagerie de tavelure sur le télescope Keck, à Hawaï. On y distingue des structures sombres qui seraient des lacs d'hydrocarbures.

courts, de l'ordre de 100 millisecondes. De la sorte, on «gèle» la turbulence atmosphérique à différents instants. En traitant mathématiquement près d'un millier de telles images, on reconstruit une image où cette turbulence est soustraite et dont la résolution est alors proche de la limite théorique de diffraction. Une telle technique, initialement mise au point par une équipe de l'Observatoire de Meudon, avait déjà été utilisée en 1995 par des astronomes français sur le télescope de 3,6 mètres de diamètre de l'Observatoire euro-

péen austral, au Chili, mais le diamètre supérieur du télescope Keck a nettement amélioré la résolution : les images reconstituées à partir d'enregistrements à des longueurs d'onde de 1,6 et 2,1 micromètres ont une résolution de 0,04 seconde d'angle, suffisante pour distinguer des motifs sur la surface.

Munis de ces images de bonne résolution, les astronomes séparent la contribution de la lumière due à l'atmosphère de celle qui est réfléchie par la surface, à l'aide d'un modèle de l'atmosphère. Sur les images du sol ainsi reconstituées, on distingue des zones sombres et des zones claires à la surface de la planète. Comment les caractériser ? Seule la fraction de lumière qui est réfléchie ou diffusée par le sol – ce que l'on nomme l'albédo – est révélatrice. Pour les matériaux réfléchissants, l'albédo est élevé, tandis que pour les matériaux foncés, l'albédo est faible.

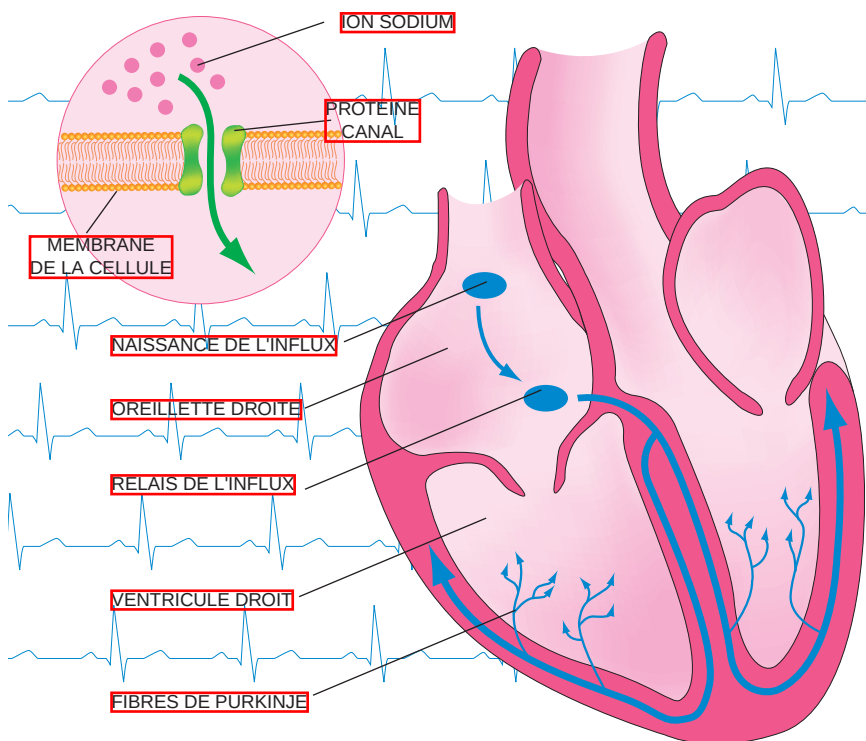
L'albédo des parties claires de Titan est similaire à celui de l'eau sous forme de glace. En revanche, pour les parties sombres, l'albédo est très faible, analogue à celui d'hydrocarbures liquides. Titan aurait donc des mers. Néanmoins, d'autres possibilités existent, comme la précipitation de matériaux sombres, non liquides, qui proviendraient de l'atmosphère. Solution en 2004.

Le gène du stimulateur cardiaque

L'étude d'une famille vendéenne a permis l'identification du gène qui prédispose à un trouble du rythme cardiaque.

En France, 40 000 stimulateurs cardiaques sont posés chaque année pour compenser des troubles de la conduction cardiaque et empêcher ainsi le phénomène de mort subite. Dans 50 pour cent des cas, les personnes qui portent ces stimulateurs sont atteintes de la maladie de Lenègre, du nom du cardiologue Jean Lenègre qui l'a décrite pour la première fois. L'équipe de Denis Escande et Hervé Le Marec, de l'INSERM à Nantes, a identifié un gène responsable de cette maladie souvent attribuée au vieillissement.

Le cœur se contracte en deux temps, à mesure qu'un influx électrique le traverse de haut en bas. Cet influx, une différence de potentiel, se propage de cellule en cellule en provoquant leur contraction. Cette différence de potentiel résulte



Grâce à des mouvements d'ions à travers des protéines de la membrane des cellules cardiaques (en haut à gauche), l'influx électrique (en bleu) parcourt le cœur du haut de l'oreillette droite aux fibres de Purkinje, dans les ventricules, et permet ainsi au cœur de se contracter. Lorsque le gène de la protéine canal des cellules des fibres de Purkinje est muté, les ventricules ne se contractent plus : l'implantation d'un stimulateur cardiaque devient nécessaire.

d'un mouvement d'ions potassium et sodium à travers la membrane des cellules. Une impulsion naît spontanément dans des cellules, nommées cellules cardionectrices, situées en haut de l'oreillette droite. Cette impulsion se propage à travers les deux oreillettes qui se contractent alors, c'est le premier «boum» du cœur. Puis, l'influx électrique parcourt la paroi qui sépare les deux ventricules, et est transmis aux fibres de Purkinje qui entourent ces deux ventricules : ils se contractent à leur tour, c'est le second «boum» (voir la figure).

Lorsque l'influx parvient à une cellule, les ions sodium traversent la membrane des cellules cardiaques par des canaux qui constituent des protéines.

En étudiant le génome de 15 membres d'une famille vendéenne où la proportion de porteurs de stimulateurs cardiaques est anormalement élevée, l'équipe nantaise a découvert un gène qui code une protéine canal, laquelle favorise l'entrée rapide des ions sodium dans les cellules des fibres de Purkinje. Lorsque le gène est muté, la protéine ne fonctionne plus, les ions ne traversent plus la membrane, la différence de potentiel n'est plus transmise : l'influx ne passe plus dans les ventricules, qui ne se contractent plus. Dans ce cas, on implante un stimulateur cardiaque qui compense la perte de cette protéine.

Le gène incriminé, nommé *SCN5A*, est localisé sur un chromosome qui héberge au moins deux autres gènes impliqués dans des maladies cardiaques. Chaque cellule porte deux gènes pour chaque protéine : quand l'un d'eux est défaillant, l'expression de l'autre compense parfois l'anormal. Toutefois, selon D. Escande, le gène responsable de la maladie de Lenègre est dominant : le gène normal code une protéine normale, mais le gène muté code une protéine délétère qui finit par prendre le dessus. Jusqu'à 50 ans environ, le gène normal synthétise suffisamment de protéines fonctionnelles. Au-delà, la protéine codée par le gène muté devient majoritaire. Les cellules des fibres de Purkinje disposent de moins en moins de la protéine canal normale : la conduction s'effectue de plus en plus mal, le pouls ralentit, des syncopes se produisent, l'implantation d'un stimulateur cardiaque s'impose.

On connaît déjà des molécules, tels des anesthésiques locaux et des toxines ou des molécules anticonvulsivantes, qui agissent spécifiquement sur les canaux sodium. Grâce à ces molécules, les médecins espèrent qu'ils pourront bientôt éviter certaines implantations de stimulateur cardiaque.

Dissymétrie de la nature

Particules et antiparticules ont des comportements physiques différents.

Pourquoi l'Univers est-il fait de matière plutôt que d'antimatière ? C'est en tentant de répondre à cette question fondamentale que deux équipes de physiciens des particules, l'une américaine et l'autre européenne, ont mis en évidence une nouvelle forme de violation d'une symétrie de la nature, la violation CP.

En physique des particules, on introduit trois symétries : C qui échange matière et antimatière (échange de la charge des particules), P qui renverse les coordonnées spatiales (comme lorsque l'on regarde une particule dans un miroir) et T qui renverse le sens du temps (comme lorsque l'on fait défiler un film à l'envers). Initialement, les physiciens considéraient ces symétries comme de bonnes symétries de la nature, c'est-à-dire que les lois physiques restaient les mêmes après application de ces transformations. Par exemple, l'interaction électromagnétique agit de manière analogue sur une particule et sur son antiparticule.

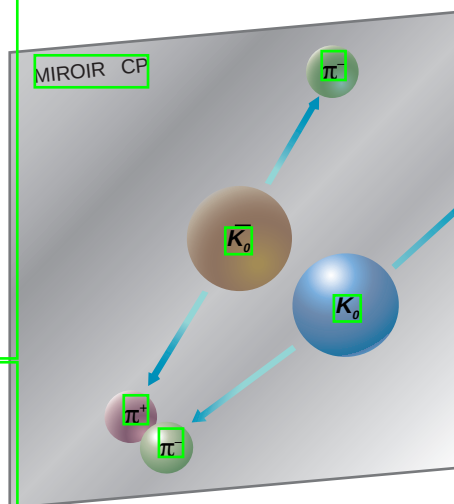
Plus généralement, les interactions électromagnétique, gravitationnelle et nucléaire forte sont inchangées lorsque l'on applique ces symétries. Toutefois, dans les années 1950, des physiciens américains ont montré que l'interaction nucléaire faible violait C et P : l'image d'un processus physique d'interaction faible par la symétrie C ou par la symétrie P correspondait à un processus qui n'existait pas. En revanche, la composition des deux symétries, nommée CP, semblait une bonne symétrie : une particule de matière avait le même comportement physique que son antiparticule vue dans un miroir.

En 1964, cette hypothèse a été remise en cause dans une expérience qui montra la «violation de CP indirecte». Cette expérience étudiait la symétrie CP à l'aide de particules nommées kaons neutres. Un kaon est formé d'une paire quark-antiquark, où soit le quark, soit l'antiquark est étrange (l'un des six types de quarks). On nomme le kaon K^0 si l'antiquark est étrange et $\bar{K}^0$ si le quark est étrange. Ces particules ne sont pas directement observables, mais elles se combinent en des états observables, nommés états K_S et K_L , avec une

masse et une durée de vie bien définies.

En se désintégrant par l'interaction faible, les kaons se transforment en des systèmes de plusieurs pions (un état lié d'un quark et d'un antiquark légers). En mécanique quantique, on montre que si la symétrie CP était valide, une quantité nommée nombre CP serait conservée. L'état K_L , qui a la durée de vie la plus longue, a un nombre CP égal à -1 . Si la symétrie CP était respectée, il ne pourrait pas se désintégrer en deux pions dont le nombre CP est égal à $+1$. Or, les résultats ont montré, qu'une fois sur 500, K_L se désintégrait en deux pions. La symétrie CP était violée pour les interactions faibles.

La violation n'est pas directe dans le sens où elle ne concerne pas les désintégrations des kaons eux-mêmes. Elle s'interprète comme une violation de CP en raison de la façon dont les états



Le Modèle standard de la physique des particules prédisait une violation de CP directe dans la désintégration des kaons, des particules neutres. Imaginons un kaon (K_0) qui se désintègre en deux pions (π^+ et π^-). L'image de ce processus par la symétrie CP est un kaon ($\bar{K}^0$) qui se désintègre également en deux pions. Si la symétrie CP n'est pas respectée, la probabilité de désintégration différencierait légèrement, ce que les physiciens ont observé.

K^0 et $\bar{K}^0$ se combinent pour former les nouveaux états observables K_L et K_S : dans cette interprétation, l'état K_L est principalement composé d'un état de nombre CP égal à $+1$, mais comprend également une faible proportion d'un état de nombre CP égal à -1 qui rend compte de la désintégration en deux pions. Cette violation indirecte de CP se mesure par le paramètre ϵ .

Le mécanisme de la violation CP indirecte était prévu dans la théorie des interactions faibles (qui fait partie du Modèle standard de la physique des particules), mais ce mécanisme prédit aussi d'autres formes de violation CP

observables. Pour vérifier ou invalider cette théorie, les physiciens ont donc recherché ces formes. Entre autres, la théorie prédisait une violation de CP «directe» dans la désintégration des kaons : la probabilité de désintégration d'un K_0 en deux pions chargés différencierait légèrement de la probabilité du processus image par la symétrie CP (désintégration d'un $\bar{K}^0$ vers le même état final). On peut observer cet effet en comparant les probabilités de désintégrations des K_S et des K_L en deux pions neutres et en deux pions chargés. Cette asymétrie, mesurée par le paramètre ϵ'/ϵ , serait environ 1 000 fois inférieure à celle de la violation indirecte. Les physiciens ont donc construit des appareillages de grande précision en vue de mesurer cette faible asymétrie.

A la fin des années 1980, à l'aide de l'expérience NA31 du CERN, les physiciens ont mesuré une première indication de la violation directe. Toutefois, la signification statistique de la mesure (valeur divisée par l'erreur) n'était pas suffisante pour qu'ils soient certains de l'effet. De surcroît, cet effet n'était pas confirmé en 1993 par une expérience américaine qui mesurait une valeur proche de zéro.

L'étude de la désintégration des kaons a alors repris avec des détecteurs encore plus précis, accumulant un nombre d'événements supérieur. Les premiers résultats, qui n'utilisent qu'une partie des données, viennent d'être rendus publics : l'expérience américaine (KTeV au Fermilab de Chicago) mesure $\epsilon'/\epsilon = (28,0 \pm 4,1) \times 10^{-4}$, et l'expérience du CERN (NA48) obtient $\epsilon'/\epsilon = (18,5 \pm 7,3) \times 10^{-4}$. Ces deux résultats compatibles établissent une valeur non nulle du paramètre ϵ'/ϵ et mettent en évidence la violation directe de la symétrie CP.

Cette mesure confirme-t-elle la théorie ? La valeur obtenue expérimentalement semble supérieure aux prédictions théoriques. Toutefois ces dernières ne sont pas encore calculées avec une très grande précision. De plus, les résultats expérimentaux s'affineront lorsque l'on aura analysé l'intégralité des données.

L'Univers est aujourd'hui essentiellement composé de matière, alors qu'à ses premiers instants les quantités de matière et d'antimatière étaient égales. La violation CP est l'un des ingrédients nécessaires pour expliquer la prédominance de matière dans l'Univers actuel, mais elle demeure insuffisante : d'autres asymétries restent à découvrir.

Guillaume UNAL,
Lab. de l'accélérateur linéaire, Orsay.

Ça vous chatouille?

Le rire provoqué par les chatouilles semble être un réflexe.

Pourquoi rions-nous quand on nous chatouille? Et pourquoi ne rions-nous pas quand nous nous chatouillons nous-mêmes? Ces deux questions ont intéressé les plus grands esprits, de Platon à Darwin, mais des expériences de psychophysiologie font le tri parmi les théories. Notamment des expériences à l'Université de San Diego montrent que les chatouilles déclenchent probablement un réflexe.

Socrate, un des premiers «théoriciens de la chatouille», avait noté le mélange de plaisir et de douleur qu'elles procurent. D'ailleurs, les physiologistes modernes distinguent divers chatouillis. Certains, provoqués par le passage léger d'un corps sur la peau, provoquent l'envie de frotter la peau à l'endroit chatouillé quand la stimulation a cessé. Les chatouilles qui font rire, d'autre part, sont des pressions plus fortes, répétées, sur des zones particulières du corps : sur les côtes, sous les bras, sous les pieds...

Les chatouilles du premier type sont ressenties par les animaux : les chevaux bougent les oreilles quand une mouche les chatouille. En revanche, les chatouilles du second type semblent

l'apanage des primates : la plupart des primatologistes ont vu les chimpanzés et d'autres singes se chatouiller au cours de leurs jeux. Ces animaux ne rient alors pas, parce que leur appareil vocal ne s'y prête pas, mais ils font entendre des sons de respiration qui équivalent au rire humain.

Les chatouilles procurent-elles du plaisir? Cette question aussi est difficile, car les sentiments que nous ressentons sont souvent provoqués par l'expression du visage : quand des personnes reproduisent une émotion, elles ressentent souvent, à un certain degré, l'émotion qu'elles reproduisent. Par exemple, en 1988, des psychologues ont découvert que des personnes jugent des dessins animés plus drôles quand on leur demande de sourire pendant la projection que quand on leur demande de se renfrogner.

Voulant distinguer le rire dû à l'humour et le rire des chatouilles, Christine Harris et Nicholas Christenfeld ont cherché à savoir si celui d'une sorte facilitait celui de l'autre sorte. En 1997, à l'Université de San Diego, ils ont soumis des histoires drôles à des étudiants et observé que, dans une série, les dernières blagues sont plus drôles que les premières. Cet effet de préparation n'a pas lieu avec les chatouilles : les sujets qui ont été préparés par le visionnage de comédies n'ont pas ri plus que des sujets qui n'avaient pas vu les films. Ainsi le rire des chatouilles n'est pas associé à un état d'esprit amusé, de même que nous ne sommes pas

tristes quand nous pleurons en épluchant des oignons.

Si le rire des chatouilles n'a pas de rapport avec la joie ou avec l'amusement, quelle est son origine? Tout d'abord, il ne semble pas apparaître chez les enfants âgés de moins de six mois. Ensuite, il semble pouvoir déclencher un conditionnement. Arthur Koestler, après Darwin, a également signalé que ce rire n'apparaît que si la situation est jugée sans danger par celui qui est chatouillé. Enfin, les psychologues ont observé que si le rire des chatouilles est provoqué par un comportement interpersonnel, on ne pourrait pas se chatouiller soi-même. Les psychologues de San Diego ont testé expérimentalement l'hypothèse : une personne qui saurait qu'elle est chatouillée par une machine rirait-elle?

En 1998, N. Christenfeld et C. Harris ont interrogé un groupe d'étudiants et montré, d'abord, que 50 pour cent d'entre eux pensaient qu'ils ne riraient pas s'ils étaient chatouillés par une machine ; seuls 15 pour cent avaient l'idée opposée. Comme il n'était pas certain que la machine à chatouiller qu'ils utilisaient chatouillerait comme un être humain, les deux psychologues ont fabriqué une machine où seule une main gantée dépasse ; la machine fait entendre divers bruits de respiration, afin qu'on puisse la confondre avec une personne.

On disait aux sujets volontaires (yeux bandés) qu'ils seraient chatouillés deux fois : une fois par un expérimentateur et une fois par la machine. Toutefois, toutes les chatouilles étaient, en réalité, faites par un expérimentateur humain. L'expérience a montré que les sujets riaient autant quand ils croyaient être chatouillés par une machine ou par un être humain. Ainsi le rire des chatouilles ne dépend pas de ce qui chatouille. Ce n'est probablement pas un comportement interpersonnel.

Est-ce un réflexe? Et pourquoi, alors, ne rit-on pas quand on se chatouille soi-même? La question n'est pas résolue, mais on sait qu'on peut provoquer l'extension réflexe de la jambe quand on se tape soi-même sur le genou ; en revanche, les sursauts de peur sont un réflexe que l'on ne peut s'infliger. De fait, les sujets testés à San Diego riaient plus quand ils n'avaient pas les yeux bandés, et des études du cerveau par résonance magnétique nucléaire montrent que les aires du cerveau activées quand on se chatouille soi-même diffèrent de celles qui sont activées quand on est chatouillé par autrui.



Si le rire est le propre de l'homme, le phénomène des chatouilles n'en est pas l'apanage. Pourquoi?

La révolution de l'informatique

MICHAEL DERTOUZOS

L'infrastructure informatique nommée Oxygen, en cours de mise au point, facilitera l'accès aux informations réparties dans le monde. Enfin, les hommes pourront en faire plus en en faisant moins.

En 1998, dans l'avion qui nous emmenait à Taiwan, avec quelques collègues, j'essayais de transférer mon agenda sur mon nouvel ordinateur portable. Il y avait seulement une carte à insérer et un logiciel à installer. Après trois heures d'énervement, je passais le problème non résolu à mon voisin Tim Berners-Lee, qui m'avait proposé son aide. Après une heure de travail, l'inventeur du réseau *Internet* s'avouait vaincu.

Je sollicitai alors Ronald Rivest, l'inventeur de la cryptographie à clef publique, qui, dans sa grande sagesse, déclina poliment l'offre. Puis, l'un des plus jeunes membres de l'équipe, sûr de lui, s'y risqua... et abandonna bientôt. J'essayai alors n'importe quoi, changeant les paramètres de configuration au hasard... et, par chance, trois heures plus tard, l'installation était faite.

En faire plus en en faisant moins

La majorité des utilisateurs de l'informatique rencontrent ce type de difficultés. C'est la rançon de 40 ans d'une informatique qui s'est surtout préoccupée des ordinateurs : elle conçoit séparément les systèmes et les sous-systèmes, que les utilisateurs doivent ensuite assembler eux-mêmes.

Imaginez que, lorsque vous achetez une voiture, vous deviez régler des dizaines de boutons afin d'assurer l'injection du carburant, l'allumage des bougies, l'écartement des pistons...

Ça suffit ! À l'ère de l'informatique, les utilisateurs ont besoin d'un volant, d'un accélérateur et de freins. Ils doivent – enfin – disposer de techniques qui leur donneront plus alors qu'ils en feront moins.

Ces nouvelles techniques doivent entrer dans nos vies, et pas l'inverse : nous ne devons pas changer nos vies pour plonger dans un cyberspace qui nous est étranger. Lors de la révolution industrielle, les moteurs sont venus à nous dans les réfrigérateurs et les automobiles, sans que nous changions nos mœurs. J'attends des ordinateurs et des systèmes de communication qu'ils participent de la même façon à nos vies et qu'ils n'existent que par des tâches précises qu'ils réalisent pour nous.

L'informatique doit augmenter la productivité humaine, tout en se simplifiant. On devrait pouvoir demander à un ordinateur portable : « Emmène-nous à Athènes ce week-end. » La machine se connecterait au système de réservation d'une compagnie aérienne, elle saurait que « nous » représente deux personnes habituées à la classe économique, aux places côté couloir... En quelques minutes, un vol adapté serait trouvé et confirmé. L'ordre prendrait ainsi trois secondes de temps humain, et l'informatique œuvrerait pendant dix minutes : le gain de productivité serait de 20 000 pour cent.

De tels gains ne seront pas possibles dans toutes les applications, mais je pense qu'au cours du XXI^e siècle on augmentera la productivité humaine de 300 pour cent, en moyenne, en auto-

matissant les activités de routine dans les bureaux et en déchargeant une partie du travail de nos cerveaux et de nos pupilles sur nos bulldozers électroniques (les logiciels), de la même manière que nous nous sommes déchargés des travaux de force sur les bulldozers. La transition n'a pas commencé : nous cliquons encore avec acharnement sur les fenêtres de navigation du réseau *Internet* ou de courrier électronique, nous nous faisons mal aux yeux en scrutant les pages affichées et nous nous donnons des migraines à force de les déchiffrer, sans nous apercevoir que nous sommes encore au stade de la pelle. Nous sommes éblouis parce que ces pelles sont en or et qu'elles sont déclarées « haute technologie ». Nous devons demander aux ordinateurs bien plus que le peu qu'ils nous donnent aujourd'hui.

Le commerce électronique

Les marchands d'ordinateurs abusent de l'expression « facile à utiliser » : ils habillent un singe d'une blouse verte et veulent nous faire croire que c'est un chirurgien ! Je ne parle pas de l'aspect esthétique des ordinateurs ou des logiciels, mais d'une réelle facilité d'utilisation. Les différences entre les logiciels de navigation et les systèmes d'exploitation doivent disparaître rapidement : n'ont-ils pas la même fonction d'accès à l'information, les premiers à distance, les seconds localement ? L'utilisateur, lui, n'a pas à se préoccuper du lieu où se trouve

l'information, et il doit disposer d'un seul type de commandes. Le système actuel est aussi absurde que si le volant d'une voiture guidait le véhicule en ville et le freinait à la campagne.

Enfin, les nouvelles techniques doivent s'adresser à tous les hommes. Aujourd'hui, on se satisfait qu'une centaine de millions d'ordinateurs soient interconnectés : ils ne relient pourtant que 1,7 pour cent de la popu-

lation mondiale ! Les voix de milliards d'êtres humains ne nous parviennent que filtrées par la télévision ou par les propagandes gouvernementales. De plus, sans contrôle, l'informatique creusera le fossé entre les riches et les pauvres, car les riches utiliseront leurs ordinateurs pour devenir plus productifs, donc plus riches, tandis que les pauvres en resteront au même point.

De telles disparités provoquent inévitablement des conflits sanglants. Pourtant, l'informatique peut aider ceux qui en ont besoin : les riches pourraient décider d'acheter des services aux plus démunis, de la même façon que l'on peut décider d'acheter des produits



fabriqués dans des pays en développement (des étudiants de notre laboratoire ont déjà créé un tel système sur le site Internet www.compassioncorps.org). L'aide pourrait être internationale : un médecin du Sri Lanka pourrait donner des consultations à des sans-abri de Boston par l'intermédiaire d'un kiosque équipé d'une caméra vidéo, connecté à des instruments médicaux et administré par une infirmière ; le service, bien qu'imparfait, serait meilleur qu'une absence totale de soins.

Le commerce informatique commence seulement. Dans les dix prochaines années, un demi-milliard de machines et d'innombrables ordinateurs intégrés à des appareils électriques, des détecteurs, à des systèmes de régulation, etc. seront interconnectés. Ces machines et leurs utilisateurs achèteront, vendront et échangeront de l'information et des services informatiques. Aujourd'hui, 300 milliards de francs sont échangés sur l'*Internet* chaque année ; en 2030, j'estime que les sommes s'élèveront à 25 000 milliards de nos francs actuels, soit un quart des capitaux de l'industrie mondiale. Elles concerneront principalement le secteur des services et de l'informatique, qui représente la moitié de cette économie.

L'échange d'informations via les systèmes informatiques devrait également s'imposer dans nos vies pri-

vées : dans les familles, les activités associatives, l'enseignement, la culture, la politique...

Amener la technique au cœur de nos vies, accroître la productivité humaine et la simplicité d'utilisation des machines, rendre ces gains accessibles à tous : quel système informatique concrétisera une telle vision ?

La conception d'Oxygen

Notre laboratoire étudie un système, radicalement nouveau, de matériels et de logiciels adapté aux hommes et à leurs besoins. En collaboration avec le Laboratoire d'intelligence artificielle de l'Institut de technologie du Massachusetts, 30 membres de notre équipe participent à ce projet, nommé *Oxygen*.

Le *Handy 21* est au cœur du projet. Il ressemble à un téléphone portable, mais il est muni, en outre, d'un écran, d'une caméra, de détecteurs infrarouges et d'un ordinateur. Toujours près de l'utilisateur, n'importe où, il est entièrement configurable par logiciels : une commande suffit pour en faire un téléphone ou un émetteur-récepteur en relation avec les autres *Handy 21*, un nœud de réseau près d'un réseau sans fil à grand débit, ou encore une simple radio (voir *Les caméléons de la communication*, page 40, et *Une puce universelle*, page 42).

La deuxième pièce du système *Oxygen* est l'*Enviro 21*, qui, plus rapide et de plus grande capacité, reste relié à son environnement, tel un bureau, un appartement ou une voiture. L'*Enviro 21* est au *Handy 21* ce que la prise de courant est à la pile. Il fait la même

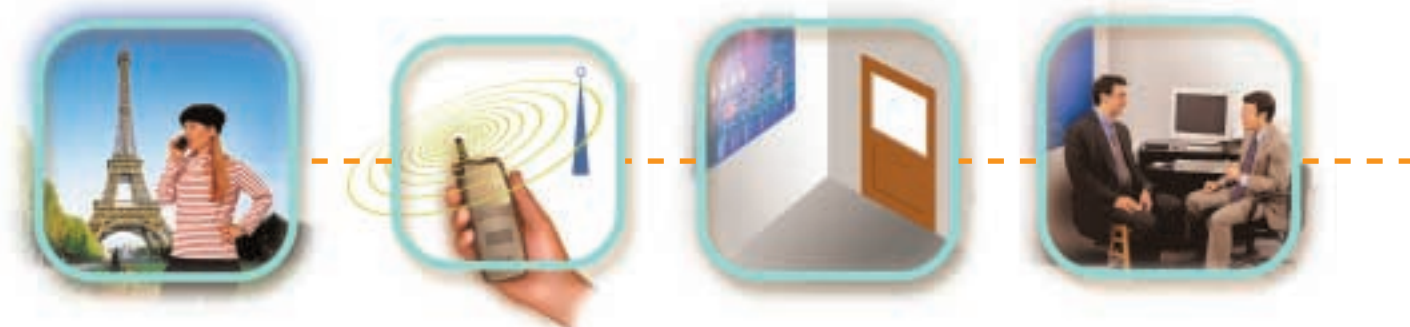
chose que le *Handy 21*, mais il est plus puissant et plus rapide. Il peut notamment commander des appareils variés, tels des détecteurs, des téléphones, des télécopieurs, des réseaux de caméras ou de microphones.

Le système *Oxygen* interagit avec le monde physique grâce à ces appareils contrôlables et à des détecteurs infrarouges placés dans les *Handy 21*. Pour créer un lien entre la porte et vos machines, vous collez sur cette porte un détecteur infrarouge : lorsque quelqu'un pointera son *Handy 21* vers la porte, la machine identifiera cette porte et indiquera ce qui est derrière. Les utilisateurs seront en relation avec les objets de leur environnement.

Le *Handy 21* et l'*Enviro 21* seront reliés grâce à un nouveau réseau, le *Net 21*, qui créera des régions de collaborations sécurisées pour les utilisateurs d'*Oxygen* qui souhaitent communiquer. Le *Net 21* doit donc s'émanciper du réseau *Internet*, trop encombré et trop vaste : il gèrera les fluctuations (créations et destructions) des nœuds de connexion ; il doit pouvoir vous trouver où que vous soyez ; et il se connectera à de nombreux appareils et aux réseaux du monde entier. Pour mettre au point ce réseau, nous devons construire des protocoles de connexion originaux, intégrant des concepts d'auto-organisation et d'auto-adaptation.

Le système *Oxygen* doit également être un système avec lequel nous interagissons simplement : nous ne naissons pas avec des souris et des claviers, mais avec une bouche, des oreilles et des yeux. Toutes les composantes du système *Oxygen* et toutes

UNE JOURNÉE des utilisateurs du système *Oxygen* est imaginée au travers de ces vignettes : cinq collaborateurs prennent une décision rapide grâce au système qui les trouve, qui assure leurs communications et effectue pour eux des recherches.



1 – À PARIS, JEANNE a repéré un site intéressant pour les bureaux de sa société. L'affaire est à saisir rapidement. Elle demande à son *Handy 21* de joindre son patron, Robert.

2 – LE HANDY 21 DE JEANNE se connecte au réseau local après l'avoir détecté et établit instantanément la connexion avec l'*Enviro 21* situé dans le mur du bureau de Robert.

3 – L'ENVIRO 21 DE ROBERT, dans le mur, reconnaît le *Handy 21* de Jeanne, comprend l'urgence et fait suivre l'appel à Châteauroux, où Robert bavarde avec le représentant local.

4 – LE BUREAU DE CHATEAURoux est également équipé d'un *Enviro 21*, qui réceptionne l'appel. Il détecte automatiquement qu'il peut interrompre la conversation.

Parler n'est pas suffisant

La communication naturelle ne se limite pas aux échanges oraux. De ce fait, une interaction homme-machine n'est idéale que si la communication est «multimodale», c'est-à-dire si elle intègre la parole, mais aussi les gestes de désignation et la perception visuelle. Lorsque nous parlons, nous faisons souvent référence à des objets de notre environnement, que nous voyons et désignons, par des déterminants ou pronoms particuliers, tels «une», «la», «cette», «celle-ci»...

Naturelle chez les êtres humains, cette multimodalité pose à la machine des problèmes d'interprétation et d'influence réciproque entre les modes d'interaction. Par exemple, avec une interaction associée à deux désignations, telle «place cette figure au-dessus de ce texte», la parole, le geste et la perception ne peuvent pas s'interpréter indépendamment.

Depuis dix ans, notre équipe, composée d'informaticiens et de linguistes, étudie la mise en place d'une telle communication : à partir d'études linguistiques, cognitives et informatiques, nous élaborons tout d'abord des modèles informatiques de représentation des connaissances, puis des algorithmes pour traiter un problème particulier, dont nous testons ensuite les capacités de reconnaissance, de compréhension et d'interprétation sur des applications concrètes. Quand l'algorithme est performant, nous l'intégrons enfin à un logiciel ou à une interface.

Ainsi, un de nos modèles linguistiques intègre et comprend les hésitations, les reprises et les corrections, nombreuses à l'oral et qui, bien que diverses, respectent une structure prévisible. Un autre modèle est spécialisé pour interpréter les gestes de désignation naturelle de l'utilisateur, et un troisième modèle, dit de représentation mentale, unifie l'ensemble des informations connues sur chaque composant d'une tâche. Un autre modèle tient compte des présupposés inclus dans les énoncés d'un utilisateur afin de mieux adapter les réponses de la machine et de gérer le dialogue.

Par ailleurs, nous cherchons des algorithmes qui exploitent les connaissances de ces modèles pour comprendre les énoncés multimodaux. Ainsi un de nos algorithmes interprète les différentes références incluses dans une tâche, notamment quand celle-ci est visualisée sur un écran, et intègre le fonctionnement des déterminants en français. S'appuyant sur un pavage de l'espace cognitif, par exemple, de l'écran, l'algorithme lève les ambiguïtés d'énoncés, tels «la figure», «cette figure», «une de ces figures». Nos algorithmes sont écrits en Java, le langage en vigueur sur le réseau *Internet*, assurant ainsi leur adéquation aux divers systèmes informatiques.

Enfin, nous avons proposé une nouvelle architecture, modulable et répartie, pour les systèmes de dialogues multimodaux, qui s'adapte d'une part au modèle de l'application à gérer, c'est-à-dire à la définition des objets à traiter, à leurs propriétés et aux fonctions qui leur sont applicables. D'autre part, l'architecture s'adapte aux spécificités lexicale, syntaxique, sémantique et d'usage des différents modes de communication ; ainsi, pour le langage, nous traitons la langue soutenue, technique, écrite et orale.

Bien que nos recherches soient encore fondamentales, des applications industrielles sont déjà en cours. Ainsi, avec la Société *Alcatel*, nous avons mis au point une interface de communication, répondant aux gestes et à la voix, qui équipe un terminal de télécommunication composé d'un écran tactile et d'un combiné téléphonique. Nous mettons également au point un environnement multimodal de consultation d'annuaires complexes pour ce type de terminal de télécommunication qui pourrait bientôt apparaître sur le marché.

À l'avenir, seule une communication multimodale nous permettra d'accéder de façon naturelle aux nombreuses applications interactives qu'offrent aujourd'hui le réseau *Internet* et la télévision numérique.

Jean-Marie PIERREL,
Université de Nancy et Équipe
«Langue et Dialogue» du LORIA

transférés directement du *Net 21* sur les *Handy 21* et *Enviro 21*, en fonction des demandes, des erreurs et des mises à jour des utilisateurs. Les utilisateurs adapteront les machines qui les entourent à leurs besoins et à leurs habitudes.

Une conviction et un souhait

Oxygen nécessite des ordinateurs portables, des ordinateurs muraux et des ordinateurs embarqués, un réseau innovant, des systèmes de compréhension de la parole et de synthèse vocale, l'accès aux connaissances, la collaboration, l'automatisation et la personnalisation. *Oxygen* devra sa puissance à l'ensemble de ses éléments, qui sont tous tournés vers l'utilisateur. La communication avec les ordinateurs a commencé avec des nombres binaires. Puis on a utilisé des textes et, récemment, des icônes ; il est temps d'améliorer encore les interfaces homme-machine.

Je crois que l'informatique du futur dépendra essentiellement des échanges vocaux (ou à l'aide d'autres capacités sensorielles), de l'accès aux connaissances, de l'automatisation, de la collaboration et de la personnalisation. Ces cinq aspects, à mon avis incontournables, sont le volant, l'accélérateur et les freins que l'informatique utilisera pour nous en donner plus.

Je propose que tous ceux qui souhaiteront tirer profit du nouveau monde de l'information exploitent les potentialités du système *Oxygen*. Les médecins, par exemple, seraient plus efficaces s'ils disposaient à tout instant des données de *Medline* (qui regroupent des articles médicaux de très nombreuses revues), des dossiers médicaux de leurs patients et des avis de collègues spécialisés.

L'informatique, avec *Oxygen* et d'autres systèmes de même nature, doit maintenant nous libérer des détails techniques que nous supportons depuis 40 ans et nous faire entrer dans une nouvelle ère : celle des ordinateurs au service de l'utilisateur. Après la charrue, le moteur et l'ordinateur, la quatrième révolution concerne la ressource terrestre la plus précieuse : nous-mêmes.

Michael DERTOUZOS est directeur du Laboratoire d'informatique de l'Institut de technologie du Massachusetts.

Conversation avec votre ordinateur

VICTOR ZUE

Comment commander les ordinateurs sans lever le petit doigt.

Les auteurs de science-fiction savent depuis longtemps que le langage parlé est, pour l'homme, le moyen le plus pratique de communiquer avec les machines. Croire qu'ils donnent simplement leur version du mythe de Pygmalion est insuffisant. La parole est surtout naturelle : nous savons parler avant de savoir lire ou écrire. La parole est rapide : nous parlons environ cinq fois plus vite que nous ne tapons à la machine, et peut-être dix fois plus vite que nous n'écrivons. Enfin, le langage parlé est flexible : nous n'avons besoin d'aucun autre support que l'oral pour mener une conversation, les yeux ou les mains sont libres.

La première génération de systèmes intégrant des techniques vocales apparaît aujourd'hui. Certains d'entre eux reconnaissent des dizaines de milliers de mots. Des logiciels de dictée sont déjà fabriqués par plusieurs sociétés : IBM, Dragon Systems, Lernout & Hauspie ou Philips. D'autres systèmes, initialement étudiés par les Laboratoires AT&T Bell, puis mis au point par les Sociétés Nuance, Philips et Speech Works, traitent des discours transmis par téléphone sans étalonnage préalable. Ces techniques, intégrées dans des services d'assistant virtuel, permettent aux utilisateurs d'accéder par téléphone à des informations de presse, à des cotes en Bourse ou au courrier électronique. Cependant, le projet Oxygen requiert des systèmes de reconnaissance de la parole plus efficaces.

Avec les systèmes de la nouvelle génération, les hommes communiqueront avec les ordinateurs presque aussi facilement qu'entre eux. Les ordinateurs ne se limiteront pas à comprendre ce qu'on leur dit, mais devront tenir des conversations : les dispositifs classiques de reconnaissance vocale, qui convertissent des signaux sonores en symboles numériques, seront associés à des logiciels de compréhension du langage, afin que l'ordinateur saisisse la signification des mots prononcés.



L'ordinateur sera capable de parler, c'est-à-dire de trouver des documents sur le réseau Internet, d'en extraire l'information appropriée et de la présenter sous la forme de phrases correctement construites. À chaque étape du processus, la machine dialoguera avec l'utilisateur pour clarifier certains points et rectifier d'éventuelles erreurs. Il posera des questions : «Vous avez dit Rodez, dans l'Aveyron, ou Rodes, dans les Pyrénées-Orientales?»

Galaxy vous parle

Nous étudions de tels systèmes depuis dix ans au Laboratoire d'informatique de l'Institut de technologie du Massachusetts. Jusqu'à présent, les machines qui ont vu le jour ont des domaines de compétence très limités, mais elles sont utiles parce qu'elles donnent une information à jour, par téléphone. Par exemple, le système Jupiter fournit des prévisions météorologiques de 500 villes à travers le monde (ce service gratuit est disponible au 00 1 881 573 8255) ; le système Pegasus donne les horaires de 4 000 vols aux États-Unis ; le système Voyager informe sur le trafic routier. Aujourd'hui, ces systèmes parlent l'anglais, l'espagnol et le chinois. Si l'on ne tient pas compte du temps nécessaire à la récupération des informations sur le réseau Internet, nos systèmes répondent à la vitesse d'une conversation normale. En France, la SNCF met au point le système ARISE, qui permettra de réserver des billets de train par téléphone, et le système MASK, qui sera intégré dans un kiosque de vente de billets (voir l'encadré).

Nos applications de reconnaissance et de synthèse vocale sont fondées sur une architecture, nommée Galaxy, que nous avons construite il y a cinq ans. C'est une architecture répartie, c'est-à-dire que différents calculs sont exécutés par plusieurs ordinateurs. Galaxy extrait de l'information de différents domaines

de connaissances pour répondre à la requête d'un ou de plusieurs utilisateurs simultanément. On accède à *Galaxy* par téléphone ou par ordinateur, avec une connexion au réseau *Internet*, qui transmet les données.

Galaxy assure cinq fonctions : la reconnaissance de la parole, la compréhension du langage, l'extraction de l'information, l'élaboration du langage et la synthèse vocale. Quand on pose une question, un serveur nommé *Summit* analyse ce qu'il entend à l'aide d'une bibliothèque de phonèmes (les plus petites unités sonores qui constituent les mots, dans une langue), puis il dresse une liste ordonnée de phrases possibles. Un deuxième serveur, nommé *Tina*, applique les règles grammaticales, décompose la phrase en éléments (sujet, verbe, complément...) et traduit alors l'énoncé le plus plausible en un bloc sémantique, c'est-à-dire une série de commandes que la machine comprend. Par exemple, *Tina* reformulera la question : «Où se trouve le musée d'Orsay?» en la commande suivante : «Localiser le musée nommé musée d'Orsay.»

Ensuite, un troisième serveur, *Genesis*, convertit le bloc sémantique en une requête adaptée au format de la banque de données la plus pertinente. *Tina* réorganise alors l'information extraite en un nouveau bloc sémantique, que *Genesis* convertit en une phrase dans la langue de l'utilisateur : «Le musée d'Orsay se trouve au numéro 1 de la rue de la Légion d'honneur, à Paris, dans le VII^e arrondissement.» Enfin, un synthétiseur vocal dit la phrase.

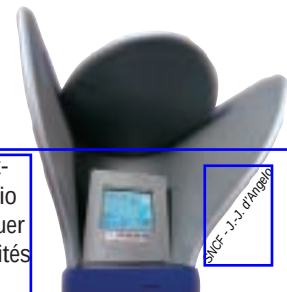
Pour passer d'un système à l'autre, l'utilisateur n'a qu'à demander : «Je veux parler à *Jupiter*» ou : «Passe-moi *Voyager*.» Depuis mai 1997, *Jupiter* a répondu à plus 30 000 appels, et le taux de compréhension des requêtes d'utilisateurs novices atteint 80 pour cent.

Le projet MASK

Dans les halls de gare, des billetteries automatiques à interface tactile sont destinées à faciliter l'accès de la clientèle au système de distribution. Malheureusement, la rigidité et le manque de convivialité de ce système n'ont pas séduit les voyageurs. Depuis 1994, dans le cadre d'un programme de recherche européen, en collaboration avec le CNRS, l'Université de Londres et les Sociétés *Mors* et *Signes particuliers*, la SNCF met au point une borne d'information et de distribution qui, à terme, remplacera les billetteries actuelles.

Il s'agit d'un kiosque de réservation et d'achats de billets de train à interface naturelle multimodale : la machine répond aux paroles ou au toucher de l'utilisateur par une voix de synthèse, des séquences vidéo ou des textes. Le kiosque, nommé *MASK*, est composé de deux ordinateurs : une station de travail *Silicon Graphics* qui gère les différents modules, ou logiciels, du système, et un ordinateur personnel classique, qui se charge de l'interface graphique. Lorsqu'un utilisateur énonce une requête, un premier module de reconnaissance de la parole, qui intègre les hésitations, traduit les signaux acoustiques en signaux numériques. Un deuxième module extrait de ces signaux les informations requises (date de départ, destination, gare de départ...) qu'un troisième module, le gestionnaire de dialogue, recherche dans une banque d'information, nommée *Riho*. Le lexique répertorie aujourd'hui plus de 1 500 mots, dont les noms de 600 villes françaises. Quand des informations sont encore nécessaires, un module de génération de phrase formule une question qu'un synthétiseur vocal prononce. Lorsque la requête est complète, une liste de trains est proposée sur l'écran, et le voyageur n'a plus qu'à choisir. L'achat d'un billet peut durer moins d'une minute.

Le kiosque a été testé pendant un mois à la gare Saint-Lazare par des clients volontaires qui suivaient un scénario préétabli. On analyse ces essais préliminaires afin d'évaluer la machine en conditions réelles, et d'améliorer ses capacités de compréhension et de dialogue.



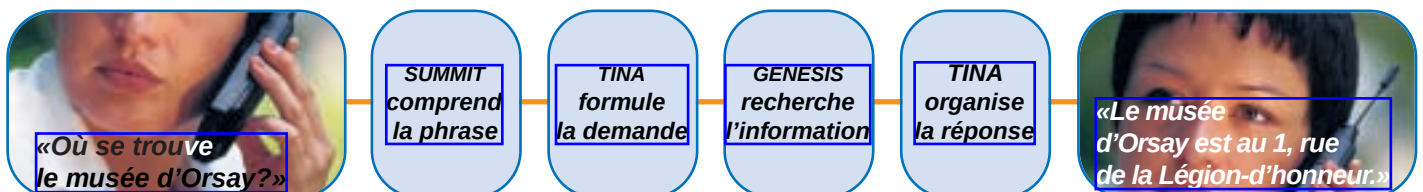
SNCF - J.-J. Chagnon

Nous enregistrons les appels, puis nous les analysons, afin d'améliorer les performances du système.

Nos systèmes de reconnaissance de la parole seraient parfaitement adaptés aux appareils portatifs *Handy 21* du projet *Oxygen* : le clavier, notamment, pourrait être supprimé, et le langage parlé permettrait aux utilisateurs de communiquer plus efficacement avec leur appareil. Ainsi, un homme d'affaires en déplacement pourrait demander à son ordinateur : «Dis-moi quand l'action Crédit lyonnais dépassera 210 francs.» La machine deviendra ainsi un assistant qui accomplit des tâches variées à partir d'un minimum d'instructions.

Nous devons encore progresser avant d'atteindre ce but. Notamment, nous devons réaliser des programmes capables de traiter de l'information dans des domaines complexes, nous devons augmenter le nombre de langues comprises par la machine et nous devons obtenir des systèmes qui réunissent des données variées sans y être explicitement invités. L'ordinateur ne doit pas seulement comprendre ce que l'on dit, mais plutôt ce que l'on veut dire.

Victor ZUE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique de l'Institut de technologie du Massachusetts.



LES APPLICATIONS À RECONNAISSANCE VOCALE utiliseront l'architecture *Galaxy* pour répondre à la question d'un utilisateur. Le système *Summit* établit une liste d'interprétations de la phrase, puis le

système *Tina* traduit la proposition la plus plausible en instructions qui permettent au système *Genesis* d'extraire l'information d'une banque de données. Enfin, le système *Tina* formule une réponse.

Les caméléons de la communication

JOHN GUTTAC

Nos téléphones mobiles seront bientôt remplacés par des appareils qui seront à la fois des téléviseurs, des messagers de poche, des radios, des ordinateurs et... des téléphones.

Les informaticiens du projet Oxygen cherchent à remplacer nos divers outils de communication par un dispositif unique, portable et polyvalent. Pourquoi en effet utiliser plusieurs appareils qui font presque tous la même chose? Après tout, nous n'utilisons pas une machine particulière pour les traitements de textes, une autre pour les tableurs, une troisième pour le traitement des images et une quatrième pour le courrier électronique. Un seul appareil portable, sans fil, ne pourrait-il, à notre choix, faire office de téléphone cellulaire, de messenger de poche, de radio, de télévision ou d'ordinateur relié au réseau Internet?

Le Handy 21 que nous mettons au point est cet appareil. Au premier abord, le projet semble utopique : comment doter un appareil d'autant de fonctions sans qu'il devienne intransportable? Nous tentons de résoudre ce problème avec le projet Spectrum Ware.

Nous étudions ainsi des systèmes de communication à usages multiples, nommés caméléons de la communication, qui sont programmés pour recevoir et transmettre différents types de signaux. L'utilisateur qui souhaite appeler un correspondant activera le mode téléphone cellulaire ; le même appareil exécutera un programme dif-

férent pour accéder au réseau Internet, pour recevoir des images télévisées, des ondes radio...

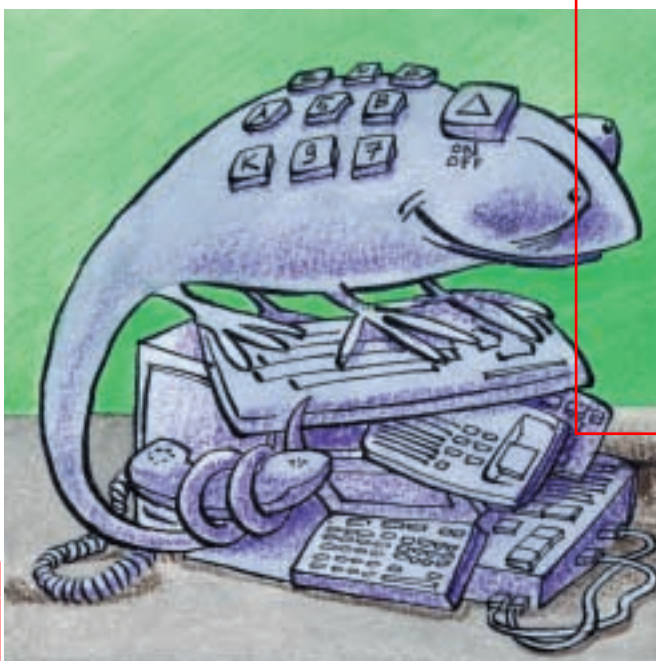
Les programmes, qui remplaceront le matériel électronique trop encombrant et moins flexible, sont les éléments clés de ce projet. Ils feront d'un caméléon de la communication un matériel généraliste, relié à plusieurs applications. Par exemple, dans notre laboratoire, Vanu Bose et Matt Welborn ont mis au point un programme de radio qui fonctionne sur un ordinateur de bureau équipé d'une antenne et d'un amplificateur. Un autre programme, créé par John Ankcorn, fait du même ordinateur une télévision.

Des programmes émettent des signaux

Pour notre radio, nous avons minimisé les traitements analogiques des signaux captés par l'antenne et faisons exécuter par programme le plus de tâches possible. Le matériel capte les ondes électromagnétiques par bandes spectrales d'une largeur de dix mégahertz, et il les transforme en une fréquence intermédiaire, qui est transmise à la mémoire vive d'un ordinateur. Le traitement du signal est effectué par un microprocesseur généraliste, qui utilise un système d'exploitation standard, tel Windows ou Mac OS. Avec un tel système, l'ordinateur assure l'essentiel

de la fonction d'une radio, tout comme il se charge des autres applications. Le combiné, qui contient peu de matériel spécialisé, est facile à moderniser : notre logiciel de radio sera plus rapide sur un ordinateur lui-même plus rapide. De plus, avec une telle architecture, des appareils jugés jusqu'à aujourd'hui incompatibles (tels les téléphones mobiles digitaux et analogiques) ne le seront plus.

Jadis, pour téléphoner, on décrochait le combiné et l'on demandait à une standardiste : «Je voudrais parler à untel.» Avec les nouveaux systèmes, l'utilisateur formulera la même demande à un appareil sans fil, connecté





LE HANDY 21 sera à la fois (de gauche à droite) un téléviseur, un messenger de poche, une radio, un téléphone mobile et un système de navigation connecté au réseau Internet. L'antenne du dispositif transmettra et recevra des signaux de communication qu'un unique microprocesseur généraliste traitera.

à un réseau. Le système se chargera alors de transférer l'appel vers le récepteur de la personne en question.

Ces systèmes peuvent également transmettre des données : reprogrammé, le même matériel deviendra un appareil médical portable, qui enverra et recevra des échographies ou les signaux d'un électrocardiographe. Les médecins munis de ces appareils auront instantanément accès aux dossiers médicaux et aux résultats des analyses de leurs patients, même loin de leur cabinet.

Les caméléons et Oxygen

Les caméléons de la communication utilisant le système *SpectrumWare* seront sans doute les éléments majeurs de l'infrastructure du projet *Oxygen*. Toutefois, dans un réseau sans fil, tel celui qui relierait les *Handy 21*, l'état des canaux varie de

façon imprévisible. De plus, les diverses applications requièrent des largeurs de bande différentes et tolèrent des taux d'erreurs variables, avec, parfois, des niveaux de sécurité élevés. Par exemple, une application de commerce électronique nécessite un cryptage du signal de communication plus performant qu'une application de radio ou de télévision. Or, les interfaces d'un réseau classique sont fixes : elles sont conçues pour fonctionner dans les pires conditions qui puissent être tolérées, plutôt que pour s'adapter aux conditions réellement rencontrées par le système.

Avec le système *SpectrumWare*, nous voulons exploiter mieux les ressources du réseau en changeant les caractéristiques de la communication pour chacune des applications. Les bornes des réseaux devront alors modifier les canaux en fonction du nombre d'unités mobiles dans la zone

couverte et de leurs besoins spécifiques. Le réseau affectera des canaux personnalisés aux *Handy 21* qui nécessiteront une réponse en temps réel ou des débits d'information élevés, alors qu'il fera partager un même canal à d'autres unités moins exigeantes.

Aujourd'hui, nous construisons les programmes de communication qui équiperont les réseaux du futur. Nous conservons trois idées directrices : nos programmes sont tous généralistes ; nous prévoyons une attribution dynamique des ressources, au lieu de prévoir la pire des situations ; nous faisons exécuter par un programme le maximum de tâches, afin de minimiser la part du matériel.

John GUTTAG est directeur du Département de génie électronique et d'informatique de l'Institut de technologie du Massachusetts.

Une puce universelle

ANANT AGARWAL

Constituée de circuits qui se réorganisent automatiquement selon les tâches à accomplir, la puce Raw est au cœur du projet Oxygen.

Pour mettre l'informatique au service des utilisateurs, les informaticiens, les concepteurs de logiciels et les électroniciens repensent l'architecture des systèmes informatiques actuels. Nous étudions notamment un nouveau microprocesseur, la puce *Raw* («brut», en anglais), dont les circuits électriques seront modifiés par les programmes. Grâce à cette conception flexible, la puce *Raw* devrait être plus performante et plus rentable que les microprocesseurs d'aujourd'hui.

La conception de la puce *Raw* a bénéficié de la miniaturisation régulière des microprocesseurs. En 1987, un microprocesseur d'environ 100 000 transistors, capable d'exécuter 20 millions d'instructions par seconde, occupait environ un centimètre carré de silicium. En 1997, un microprocesseur aussi puissant n'occupait que un millimètre carré. Et en 2007, un tel microprocesseur tiendra sur une puce d'un dixième de millimètre carré, soit un dix-millième de la taille du microprocesseur de 1987. Les perspectives sont enthousiasmantes, mais l'informatique n'est-elle qu'une course à la miniaturisation?

Non, l'architecture courante des microprocesseurs devra changer ! Entre le matériel et les logiciels, la plupart des ordinateurs personnels utilisent comme interface un jeu d'instructions, nommé *ISA*, qui régit le transfert des données, des mémoires aux unités fonctionnelles où elles sont traitées (additionnées, multipliées, etc.) Par exemple, une instruction du type «ADD, registre 7, case mémoire 1024, registre 8» commande au microprocesseur de stocker dans le registre 7 la somme des informations du registre 8 et de la case mémoire 1024. Cependant,

les instructions n'informent pas les programmes de l'emplacement des cases de mémoire ou des unités fonctionnelles : aujourd'hui, dans un microprocesseur, chaque case de mémoire est donc connectée à chaque unité de traitement. Cette architecture limite les performances des puces.

La diminution de taille des transistors augmentera encore le nombre de sites de stockage et d'unités fonctionnelles sur chaque puce, et réduira le cycle



de l'horloge interne de la puce, c'est-à-dire le temps d'exécution d'une opération de base, telle une addition. Néanmoins, la longueur totale des connexions restera proportionnelle à la surface de la puce, sans l'être au cycle d'horloge : les temps de transfert des données le long des connexions seront ainsi de plus en plus longs, jusqu'à limiter les performances de la puce. De surcroît, les microprocesseurs d'architecture classique consommeront beaucoup d'énergie, car l'énergie nécessaire à l'aiguillage des signaux dépend de la longueur des connexions.

Une nouvelle architecture

Nous heurtons-nous à un mur de complexité, de vitesse et d'efficacité énergétique ? Tous les ordinateurs personnels contiennent un microprocesseur que l'on complète par des cartes électroniques, telles une carte modem, une carte graphique, une carte son... Ces cartes sont encombrantes. Des ingénieurs en micro-électronique doivent optimiser l'assemblage de puces spécifiques pour chaque type de carte, en minimisant la taille des connexions électriques.

Nous proposons de simplifier la production micro-électronique en utilisant des portes logiques, c'est-à-dire des assemblages de transistors qui commandent la circulation du courant électrique – et donc le traitement de l'information – sur les puces. Dans une dizaine d'années, les puces seront composées de milliards de portes logiques. Une partie seulement sera utilisée pour les applications ; le reste sera à la disposition d'autres programmes, nommés compilateurs, qui géreront la circulation de l'information.

C'est là le projet que nous avons en cours : nous construirons un processeur et un compilateur qui configureront automatiquement les connexions. Ainsi, le compilateur adaptera la puce à l'exécution des diverses applications, lesquelles seront écrites en langages de programmation de haut niveau, tel le *C* ou *Java*.

Nous avons nommé notre système *Raw*, car il met directement en contact le matériel, notamment les connexions, avec le compilateur. Dans les architectures existantes, le logiciel commande les opérations logiques de la puce (les fonctions de base telles

«AJOUTER» et «RETRANCHER»), mais pas les connexions. En revanche, en utilisant les portes logiques libres pour diriger et stocker les signaux qui circulent sur les connecteurs de la puce, le compilateur du système *Raw* programmera les connexions.

La puce *Raw* est composée d'un réseau de nombreux pavés tous identiques (voir la figure 1), qui contiennent chacun des mémoires et des unités fonctionnelles. En outre, chaque pavé comporte un commutateur qui commande les connexions avec les pavés adjacents.

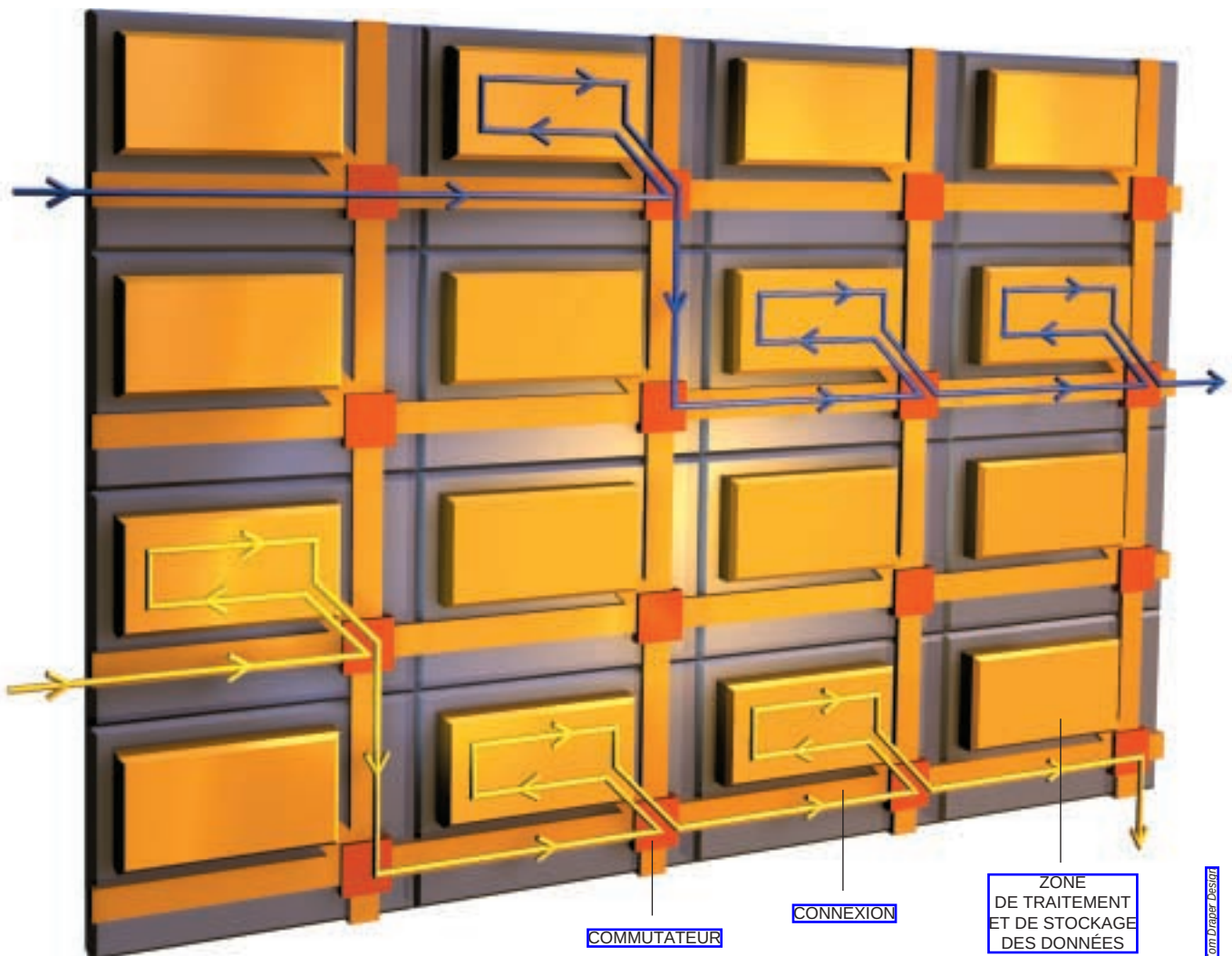
Le compilateur programmera les commutateurs de tous les pavés afin de créer un circuit spécifique à chaque cycle du fonctionnement de la puce.

Le trajet du signal est modifié pour chaque application.

Dans une première étape, le compilateur fragmente les connexions de la puce afin d'éviter les connexions longues (d'un pavé à un autre éloigné), qui requièrent de longs délais : chaque commutateur comporte des registres qui stockent les données de passage, de sorte que les connexions les plus longues sont divisées en de nombreux segments ; les signaux parcourent ainsi toute la longueur du connecteur, en passant d'un registre au suivant à chaque cycle d'horloge. Ainsi on réduit le cycle d'horloge (la fréquence d'horloge, c'est-à-dire le nombre de cycles par seconde, est alors augmentée). En 2010, les puces *Raw*

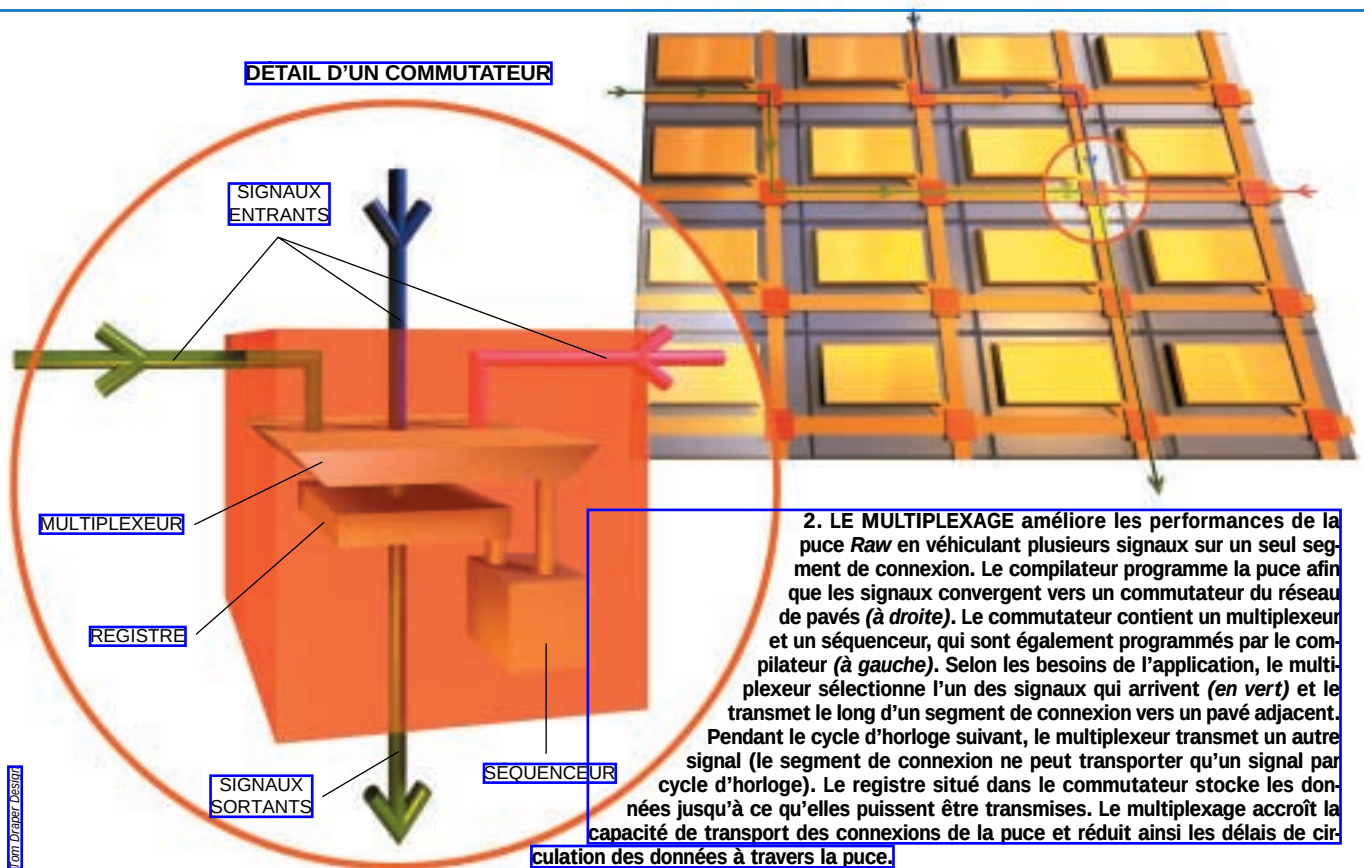
auront des fréquences d'horloge de 10 à 15 gigahertz (milliards de cycles par seconde), alors qu'aujourd'hui le microprocesseur le plus performant a une fréquence d'horloge de un gigahertz seulement. Les signaux parcourent les connexions fragmentées en plusieurs cycles d'horloge, mais de nombreuses données (une pour chaque segment) se déplaceront simultanément. Lorsque la première aura atteint sa destination, les composantes suivantes d'un signal arriveront successivement, cycle après cycle, augmentant ainsi le débit d'information dans la connexion.

Le compilateur placera les données dans les emplacements de mémoire les plus proches possible des unités



1. LA PUCE RAW est un réseau rectangulaire constitué de nombreux pavés identiques (seule une petite partie de la puce est représentée ici). Chaque pavé contient une unité de calcul et des mémoires (rectangles orange). Les signaux se propagent le long de connexions, reliant chaque pavé à ses voisins, et sont acheminés par des commutateurs placés à l'intersection des

connexions. Les trajets des signaux sont déterminés par un compilateur, qui programme les commutateurs selon les besoins de l'application en cours. Avec la puce *Raw*, plusieurs applications fonctionneront simultanément. Par exemple, des signaux vidéo (en bleu) et radio (en jaune) suivront chacun le chemin le mieux adapté à leur traitement.



fonctionnelles qui les traiteront. Le nombre de cycles d'horloge nécessaires aux valeurs d'un signal pour se propager d'un site à un autre sera ainsi minimisé.

Dans une deuxième étape, nous avons tenté d'éviter le gaspillage des connexions en utilisant chacune d'entre elles pour relier plusieurs emplacements de mémoire et plusieurs unités fonctionnelles. Ce procédé, nommé multiplexage, est comparable au regroupement de plusieurs routes issues de différentes villes en une grosse autoroute. Lorsque plusieurs signaux parviennent à une extrémité d'un segment de connexion, un multiplexeur, composé de portes logiques, les sépare : pendant un cycle d'horloge, un seul signal est transmis le long du segment donné (voir la figure 2). Ainsi, les connexions dont les multiplexeurs ont été optimisés par le compilateur achemineront beaucoup plus de signaux que les connexions classiques.

Enfin, le compilateur dirigera les signaux le long de chemins optimaux, s'assurant qu'ils arrivent quand il le faut, là où ils sont nécessaires.

Grâce à cette architecture, de grandes quantités de données, par exemple

de l'information vidéo, seront véhiculées directement dans les parties de la puce où les calculs sont effectués : les performances et l'efficacité énergétique seront bien supérieures aux possibilités actuelles. La puce Raw que nous construisons aura plus de 1 000 broches d'entrée ou de sortie de données, soit dix fois plus que les microprocesseurs d'aujourd'hui.

La puce à tout faire

La puce Raw pourra effectuer des tâches diverses, tels le cryptage, la reconnaissance de la parole, les jeux ou la communication, dans un appareil unique. Quand l'utilisateur demandera : « Transforme-toi en téléphone », son appareil trouvera le logiciel approprié, l'installera et le compilateur adaptera les connecteurs de la puce Raw.

La même puce pourra ainsi commander plusieurs interfaces de communication, tels une caméra, un écran vidéo, des haut-parleurs, un microphone, une antenne pour les télécommunications et un convertisseur de signaux analogiques en signaux numériques. Ce dernier sera intégré à la puce Raw : toutes les fonctions pour lesquelles nous sommes aujourd'hui

obligés d'acheter du matériel spécialisé seront ainsi assurées grâce aux applications configurables directement dans les connexions de la puce.

Nous avons déjà construit un compilateur capable de programmer les applications sur un simulateur de la puce Raw, par exemple une radio avec une puce Raw de 128 pavés (voir *Les caméléons de la communication*, page 40). Nos résultats indiquent que l'application fonctionnera dix fois plus vite sur la puce Raw que sur n'importe quel microprocesseur classique. Nous avons multiplié par dix encore cette vitesse en optimisant l'application sans l'aide d'un compilateur. Cependant, nous souhaitons mettre au point un compilateur 100 fois plus performant. La puce Raw deviendra alors une puce logique universelle, qui remplacera les microprocesseurs généralistes et les micropuces spécialisées.

Anant AGARWAL est codirecteur du projet Raw du Laboratoire d'informatique de l'Institut de technologie de Massachusetts.

Michael DERTOUZOS, *What Will Be*, Harper Collins, 1997.

Les nouvelles armes contre l'asthme

MARC HUMBERT

Des médicaments mieux ciblés bloquent les mécanismes allergiques responsables de cette maladie chronique et soulagent les difficultés respiratoires des malades, dont le nombre ne cesse d'augmenter.

L'asthme sera-t-il la maladie du XXI^e siècle? Cette maladie respiratoire chronique, ne mérite sans doute pas cette qualification et, en terme de mortalité, elle vient loin derrière les maladies cardio-vasculaires ou le cancer. Toutefois, la communauté médicale s'inquiète devant le nombre croissant de personnes qui souffrent d'asthme : environ 200 millions de personnes dans le monde et, selon l'Organisation mondiale de la santé, 180 000 en sont mortes en 1997. En France, 2 000 personnes meurent d'asthme chaque année. Cette mortalité est inacceptable pour une maladie que, dans la majorité des cas, on peut maîtriser par des mesures d'hygiène et par quelques médicaments efficaces. Qui plus est, des médicaments plus spécifiques, issus d'une meilleure connaissance des mécanismes de l'asthme, devraient bientôt enrichir l'arsenal thérapeutique destiné à combattre la maladie.

Le diagnostic de l'asthme n'est pas toujours aisé : la maladie a longtemps été diagnostiquée à tort chez certaines personnes âgées où un essoufflement et des sifflements respiratoires traduisent

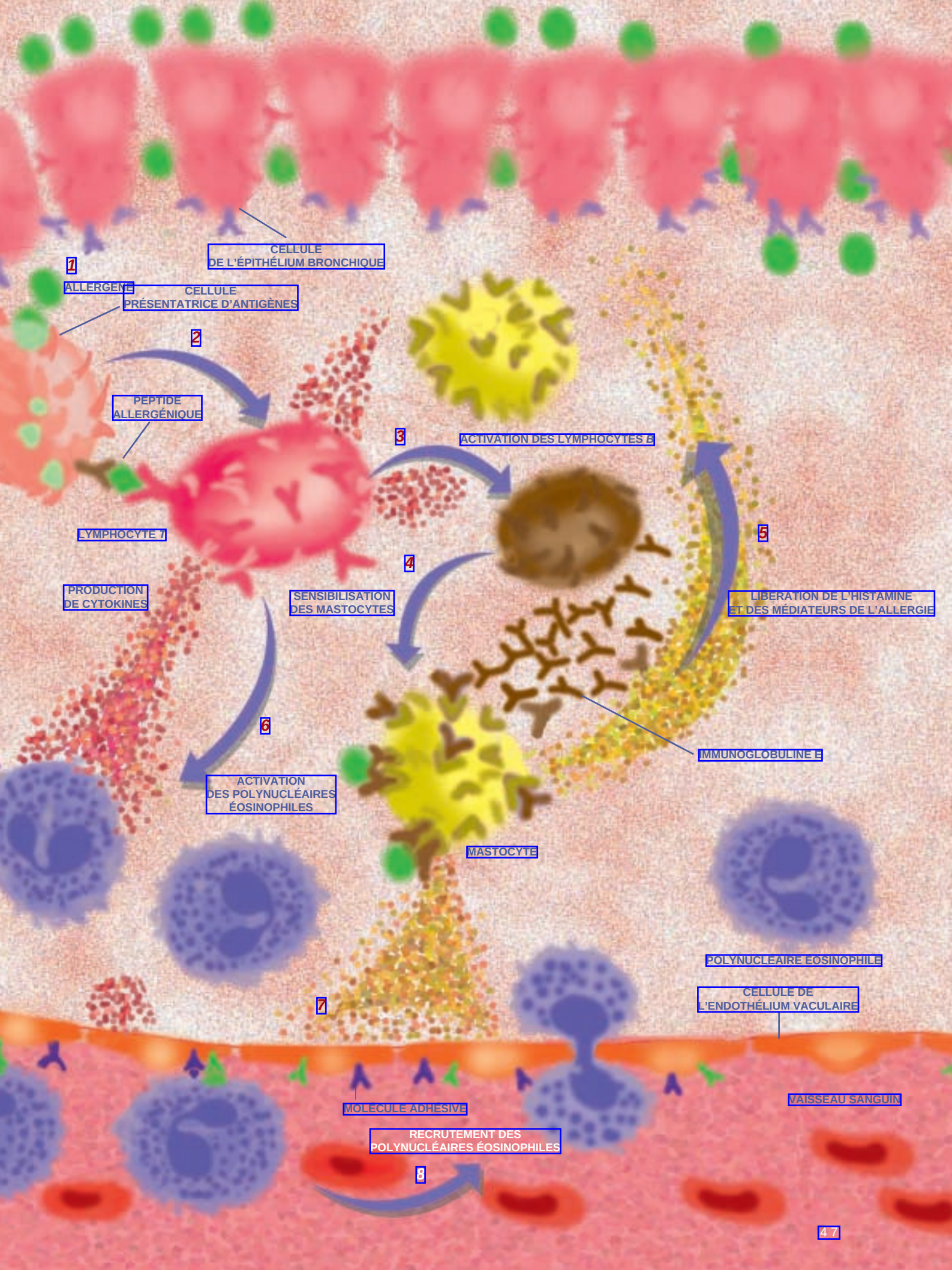
le plus souvent une maladie cardiaque et un œdème pulmonaire. Au contraire, sous-estimée chez l'enfant, on l'assimile encore souvent à une infection, telle une bronchiolite. Ces erreurs diagnostiques aboutissent à des erreurs thérapeutiques : l'insuffisance cardiaque n'est pas reconnue chez le vieillard, tandis que les antibiotiques, trop souvent prescrits contre les bronchiolites, sont inefficaces contre l'asthme de l'enfant.

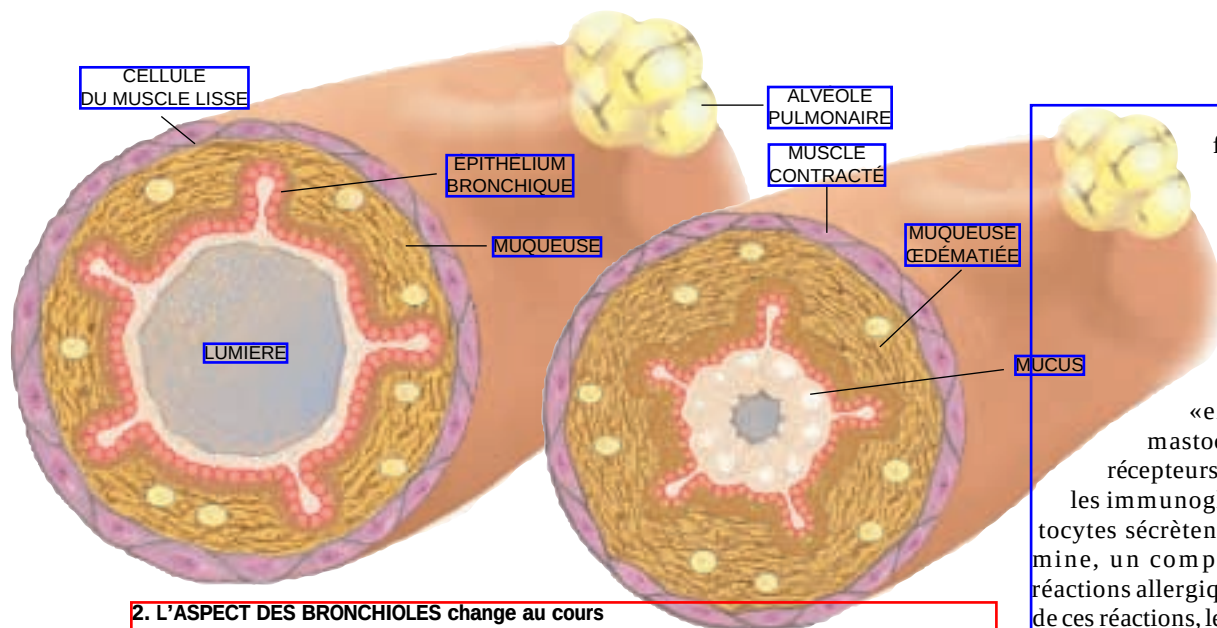
L'asthme est un état inflammatoire chronique des voies respiratoires où interviennent de nombreuses cellules du système immunitaire. Chez les personnes prédisposées, cette inflammation déclenche des épisodes récurrents de sifflements, d'essoufflement, d'oppression thoracique et de toux, surtout durant la nuit et à l'aube. Ces symptômes résultent d'une limitation du flux d'air ; de plus, l'inflammation augmente la réactivité des bronches vis-à-vis de divers stimuli, dont les allergènes.

Les réactions allergiques immédiates ont des manifestations paroxystiques : quelques minutes après une exposition aux allergènes de chat, un asthmatique

1. LA RENCONTRE AVEC UN ALLERGÈNE déclenche, dans les bronches d'un asthmatique, toute une cascade de réactions, qui aboutissent à la crise d'asthme. Lorsque l'allergène est rencontré pour la première fois (1), il est découpé en morceaux et présenté à la surface des cellules présentatrices d'antigènes. Ensuite, les lymphocytes τ qui reconnaissent ces peptides antigéniques sont activés (2) et libèrent des substances qui, à leur tour, activent les lymphocytes B (3), lesquels produisent des anticorps contre l'allergène, des immunoglobulines E. Lorsque cette personne est à nouveau exposée à l'allergène, les immunoglobulines E déjà présentes le reconnaissent et activent les mastocytes (4) qui libèrent les médiateurs de l'allergie (5), dont le principal est l'histamine, responsable de contractions réflexes des bronches, cause de l'oppression respiratoire. Les lymphocytes τ libèrent des cytokines qui activent d'autres acteurs de l'allergie, notamment les polynucléaires éosinophiles (6), qui libèrent des protéines basiques (7). Celles-ci endommagent l'épithélium bronchique. Les polynucléaires éosinophiles s'accumulent sur le site de l'inflammation, attirés par des molécules adhésives et des chimiokines produites par les lymphocytes τ et par les cellules épithéliales et endothéliales activées (8).

LIBÉRATION
DE PROTÉINES BASIQUES





Les réactions inflammatoires allergiques ont généralement lieu dans les muqueuses bronchique, nasale, oculaire ou digestive. Les cellules responsables des réactions allergiques «explosives» sont les mastocytes qui portent des récepteurs de haute affinité pour les immunoglobulines E. Les mastocytes sécrètent notamment l'histamine, un composant essentiel des réactions allergiques. D'autres acteurs de ces réactions, les polynucléaires éosinophiles (des globules blancs) participent plutôt aux réactions allergiques chroniques. Ils endommagent les bronches des asthmatiques.

2. L'ASPECT DES BRONCHIOLES change au cours d'une crise d'asthme et lorsque la maladie devient chronique. Les cellules de muscle lisse et la muqueuse entourent la «lumière» bronchique, la cavité centrale de la bronchiole où circule l'air (à gauche). Les échanges gazeux ont lieu dans les alvéoles pulmonaires. Lors d'une crise d'asthme, les médiateurs de l'allergie entraînent une contraction brusque des muscles lisses, de sorte que le diamètre des bronches diminue ; la muqueuse s'épaissit en raison de la formation d'un œdème, et du mucus s'accumule dans la lumière des bronches (à droite). Tous ces facteurs ont la même conséquence : le diamètre utile des bronches diminue et les échanges gazeux sont perturbés, ce qui explique la sensation d'asphyxie des malades asthmatiques.

Première rencontre

sensible ressent un spasme bronchique, c'est-à-dire une gêne respiratoire notable. Ainsi, l'asthme se manifeste par crises, dont la gravité varie d'une simple gêne respiratoire à l'asphyxie. Certaines personnes ne souffrent plus de crises, mais ressentent une limitation permanente liée à une obstruction irréversible des bronches. Nous pensons qu'avec l'arsenal thérapeutique dont on dispose aujourd'hui et avec une meilleure prise en charge des malades, la maladie peut être maîtrisée.

xhosa du Transkei, en Afrique du Sud, puisqu'elle ne touche que 0,15 pour cent d'entre eux lorsqu'ils vivent à la campagne, tandis que 3,2 pour cent de ces mêmes enfants vivant dans les banlieues du Cap en souffrent. Toutefois, si les allergènes, notamment les poussières domestiques et les acariens, semblent être des facteurs déclenchants des allergies respiratoires, la pollution serait plutôt un facteur aggravant.

Des travaux récents ont montré qu'avec l'occidentalisation des sociétés de l'Est, depuis la chute du mur de Berlin, la fréquence des allergies respiratoires a augmenté, alors même que la pollution y était supérieure avant 1989. Le paradoxe n'est qu'apparent : l'amélioration de l'hygiène à l'Est de l'Europe aurait comme conséquence néfaste que les enfants seraient moins exposés, au cours de la petite enfance, à certains micro-organismes pathogènes qui interviennent dans la maturation du système immunitaire. Or, comme nous le verrons, lorsque les enfants ont des infections précoces, ils sont moins sujets à l'allergie lorsqu'ils grandissent.

Bien qu'il existe une autre forme de la maladie (voir l'encadré page 53), l'asthme est essentiellement d'origine allergique. Il survient chez les sujets qui sécrètent des quantités anormalement élevées d'immunoglobulines E, des anticorps qui n'ont aucun effet délétère chez la majorité des individus.

Quels sont les principaux allergènes chez l'asthmatique ? Ce sont les poussières des habitations, et surtout les acariens qu'elles renferment, les animaux domestiques, en particulier le chat, les pollens et les moisissures. Le tabac, les agents polluants et divers agents volatils utilisés dans diverses activités professionnelles ou de loisir, tels les solvants ou les colles, ne sont que des agents irritants, mais pas allergisants, c'est-à-dire qu'ils ne déclenchent pas la production d'immunoglobulines E. Lorsque l'un de ces allergènes est inhalé, il pénètre dans la muqueuse des poumons et est absorbé par des cellules présentatrices d'antigènes (essentiellement des cellules dites dendritiques et des macrophages) ; ces cellules digèrent les antigènes et exposent, à leur surface, des fragments peptidiques de petite taille de ces volumineux allergènes ; ces fragments sont présentés associés à des molécules du soi, les antigènes majeurs d'histocompatibilité de classe II.

Les antigènes ainsi présentés sont reconnus par des récepteurs spécifiques portés par les lymphocytes T auxiliaires, qui orchestrent les réactions déclenchées par un allergène. Ces lymphocytes portent, à leur surface, la protéine CD₄, qui se lie aux protéines du complexe majeur d'histocompatibilité de classe II des cellules présentatrices d'antigènes. Cette liaison active les lymphocytes T qui, en réaction, produisent des cytokines, des substances responsables des réactions inflammatoires.

Le rôle de la pollution

La maladie asthmatique, dont il ressortira que les facteurs favorisants (génétiques et environnementaux) sont multiples, ne touche pas également toutes les populations. C'est en Australie et en Nouvelle-Zélande que l'asthme est le plus fréquent : plus d'un adolescent sur cinq est atteint. En Europe, l'asthme est plus répandu à l'Ouest qu'à l'Est (maximal en Grande-Bretagne, moindre en Europe centrale). Dans les pays industrialisés, la prévalence de la maladie asthmatique augmente d'environ 50 pour cent tous les 10 ans (la prévalence est le nombre de personnes ayant eu au moins une crise d'asthme dans leur vie).

Le rôle de l'environnement est mis en relief par l'urbanisation des enfants africains : l'asthme est une maladie exceptionnelle chez les enfants

Les cytokines sont de petites protéines jouant le rôle de messagers pour les cellules de l'organisme qui portent des récepteurs spécifiques de ces molécules. L'interleukine 4 et l'interleukine 13 ont un rôle essentiel dans les mécanismes allergiques. Elles se lient aux lymphocytes *B* qui, ainsi activés, synthétisent des immunoglobulines *E*. Ces immunoglobulines se fixent sur les mastocytes qui portent des récepteurs spécifiques de ces anticorps. À ce stade, le futur asthmatique ne ressent aucun symptôme, il ignore que son organisme est prêt à réagir violemment lors d'une exposition ultérieure au même allergène.

Lorsque cela se produit, le système immunitaire «s'emballe», et une réaction allergique apparaît dans les minutes qui suivent l'exposition à l'allergène. Les immunoglobulines *E* déjà présentes sur les mastocytes reconnaissent immédiatement les antigènes : la réaction est rapide, car les immunoglobulines *E* reconnaissent l'allergène entier, sans que les cellules présentatrices d'antigènes aient à le «digérer» (ou plutôt à l'«apprêter»). Cette reconnaissance active diverses cascades moléculaires, aboutissant au déversement des médiateurs, notamment l'histamine, puissant agent de l'allergie, stockés dans les granules des mastocytes.

Histamine, chimiokines et autres cytokines

L'histamine déversée localement a deux effets : c'est un bronchoconstricteur qui stimule à l'excès les cellules des muscles lisses bronchiques en provoquant une sorte de paralysie. Ce spasme bronchique bloque la respiration.

De plus, elle agit sur les vaisseaux sanguins qui tapissent les bronchioles : elle augmente la perméabilité des vaisseaux sanguins des voies aériennes et la sécrétion de mucus. Ainsi, elle favorise la fuite de fluide des capillaires vers la muqueuse qui tapisse ces bronchioles. Ce fluide entraîne un épaississement de la muqueuse et un rétrécissement du diamètre utile de la bronchiole. Ce deuxième facteur entrave aussi la respiration.

Au cours d'une crise d'asthme, on constate également que des enzymes, synthétisées sur le site de

l'inflammation, dégradent les phospholipides de la membrane des mastocytes, des polynucléaires éosinophiles, des plaquettes et des macrophages activés : les prostaglandines, les leucotriènes et le facteur d'activation des plaquettes sont libérés.

Ils favorisent tous, à des degrés divers, la bronchoconstriction et augmentent la perméabilité des vaisseaux et la sécrétion de mucus. Certains participent au recrutement des éléments «nocifs», notamment des polynucléaires éosinophiles sur le site de l'inflammation. Ainsi, ils agissent en synergie avec l'histamine et avec diverses cytokines, et cette accumulation de facteurs agissant dans le même sens explique l'«emballement» de la réaction allergique.

Outre les cytokines déjà mentionnées, les lymphocytes *T* libèrent de l'interleukine 5, de l'interleukine 3 et un facteur nommé GM-CSF, qui favorisent la prolifération des polynucléaires éosinophiles. Ces derniers sont produits dans la moelle osseuse et, sous l'effet de ces cytokines, ils prolifèrent. Ils gagnent ensuite la circulation sanguine et, quand ils parviennent à proximité du site de l'inflammation, dans les poumons, ils roulent contre la paroi du

vaisseau, adhèrent aux cellules endothéliales qui en recouvrent la paroi interne, traversent cette couche cellulaire, et se faufilent dans la matrice extra-cellulaire jusqu'à la paroi enflammée, où leur activation est renforcée par la production de cytokines, notamment d'interleukine 5.

Ce «recrutement» de polynucléaires éosinophiles semble commandé par les nombreuses molécules d'adhésion exprimées à la surface des cellules de l'endothélium bronchique sous l'influence de cytokines, telles que l'interleukine 1 et le facteur de nécrose des tumeurs alpha, produites par les cellules présentatrices d'antigènes et par les mastocytes.

Par ailleurs, on a récemment décrit un nouveau groupe de cytokines, nommées chimiokines, dont l'activité principale semble comporter l'attraction et l'activation des globules blancs (polynucléaires éosinophiles, lymphocytes, monocytes, macrophages). Les chimiokines sont surtout produites par les cellules endothéliales qui recouvrent les vaisseaux et par les cellules épithéliales qui tapissent les bronches, de même que par les macrophages, par les lymphocytes *T* et par les polynucléaires éosinophiles eux-mêmes. Elles ont été regroupées selon leur structure moléculaire : les CXC chimiokines (par exemple, l'interleukine 8) et les CC chimiokines, telle l'éotaxine, découverte par Tim Williams, à Londres. Ces deux familles de chimiokines n'ont pas exactement les mêmes cibles : les CXC chimiokines sont plus actives sur les polynucléaires neutrophiles, tandis que les CC chimiokines agissent plutôt sur les macrophages, sur les polynucléaires éosinophiles, et sur les lymphocytes.

Elles semblent jouer un rôle important dans l'allergie. Ainsi, chez les asthmatiques, l'éotaxine et quelques molécules apparentées sont exprimées par les cellules de l'endothélium vasculaire et de la paroi des bronches.



3. LES TESTS CUTANES servent à la détection des allergènes responsables d'allergies respiratoires, et notamment de l'asthme. On a appliqué des extraits purifiés de pollen de graminées sur la peau légèrement scarifiée de cette personne. quinze minutes après l'application, on observe une intense réaction inflammatoire. Cette réaction rapide est comparable à celle que déclenche de l'histamine. En revanche, le diluant utilisé pour solubiliser les extraits d'allergènes n'a aucun effet. Cette personne est également insensible aux poussières domestiques.

Les chimiokines de la famille de l'éotaxine agissent sur un même récepteur, nommé CCR3, principalement exprimé par les polynucléaires éosinophiles. Ainsi, l'éotaxine se fixe sur le récepteur CCR3, recrutant les polynucléaires sur le site de l'allergie. Tout un réseau complexe de cytokines stimule l'accumulation des polynucléaires éosinophiles dans la paroi bronchique des malades asthmatiques.

De la crise à la maladie chronique

La maladie asthmatique se déroule en deux temps : comme nous l'avons mentionné, dès qu'une personne déjà sensibilisée est en présence de l'allergène, elle a une crise d'asthme déclenchée par les mastocytes qui reconnaissent immédiatement l'allergène et libèrent l'histamine, les prostaglandines, les leucotriènes, notamment, responsables de la contraction excessive des cellules du muscle lisse qui entourent les bronchioles.

Le spasme bronchique qui survient quelques minutes après l'exposition à l'allergène est la manifestation immédiate de l'allergie. D'autres réactions surviennent plus tardivement : les polynucléaires éosinophiles, caractéristiques de la réaction retardée et de la maladie chronique, mettent plusieurs heures à proliférer et à s'accumuler sur le site de l'inflammation. Ils sont principalement activés par les lymphocytes *T* qui ne reconnaissent pas les allergènes entiers, mais seulement les peptides antigéniques présentés par les cellules spécialisées : l'activation des lymphocytes *T* et, par conséquent, des polynucléaires éosinophiles, exige plusieurs heures.

La maladie devient chronique à cause de l'accumulation quasi permanente de médiateurs de l'inflammation, ainsi que du recrutement quasi incessant de polynucléaires éosinophiles destructeurs : ces cellules s'accumulent dans la muqueuse bronchique et libèrent des protéines basiques qui détruisent l'épithélium bronchique. Les dégâts que causent ces protéines basiques entraînent une hyperréactivité des bronches : les terminaisons nerveuses qui innervent les bronches sont mises à nu et ne sont plus protégées des agressions extérieures.

Rappelons que les lymphocytes activés libèrent notamment de l'interleukine 4, qui déclenche la production

d'immunoglobulines E. Cette «orientation allergique», encore nommée voie *Th₂*, s'oppose aux réactions anti-infectieuses de la voie *Th₁* : dans le cas de la lutte contre une bactérie (le bacille de la tuberculose, par exemple), les lymphocytes *T* activés libèrent de l'interleukine 2 et de l'interféron gamma, deux cytokines qui n'interviennent pas dans les réactions allergiques. L'interféron gamma active les macrophages et les lymphocytes *B* qui, à leur tour, produisent de l'interleukine 12. Ainsi, l'interleukine 4 oriente les réactions immunitaires vers les réactions allergiques, tandis que l'interféron gamma semble promouvoir les réactions de type défense.

Or cette orientation du système immunitaire serait imprimée très tôt, chez le tout jeune enfant. Chez un nourrisson exposé à un agent pathogène, le système immunitaire s'oriente vers la voie défensive : ce sont les lymphocytes *T* producteurs d'interleukine 2 et d'interféron gamma qui sont activés

les premiers et qui le resteront. Ces enfants auraient moins de risques allergiques. En revanche, des nourrissons élevés en milieu aseptisé ont des risques d'être confrontés à un environnement riche en allergènes et pauvres en micro-organismes pathogènes. Si tel est le cas, le système immunitaire encore immature va activer les lymphocytes *T* qui sécrètent l'interleukine 4, conférant au système immunitaire une orientation allergique, laquelle favorise l'asthme. Cette hypothèse, issue des travaux de Tim Mosman et Robert Coffmann, de l'Institut de biologie moléculaire et cellulaire *DNAX*, à Palo Alto, expliquerait l'augmentation de la prévalence de la maladie asthmatique dans les pays industrialisés.

Les mécanismes de déclenchement des crises d'asthme et d'installation de la maladie chronique étant assez bien décryptés, il reste aux pharmaciens à trouver des traitements qui bloqueraient spécifiquement une ou

Traitements présents et futurs de l'asthme

Les traitements de l'asthme s'attaquent aux différents acteurs des réactions inflammatoires : les glucocorticoïdes et la ciclosporine inhibent certains gènes des cytokines, évitant leur production et, par conséquent, l'activation de leurs cibles (lymphocytes *B* ou polynucléaires éosinophiles).

Quand ils sont activés, les lymphocytes *T* produisent notamment de l'interleukine 5. Des anticorps dirigés contre ces molécules sont à l'essai. De surcroît, les lymphocytes portent une molécule nommée *CD₄*, essentielle à la reconnaissance des allergènes. En masquant cette molécule par un anticorps, on pourrait également freiner l'activation des lymphocytes *T*. Des molécules récepteurs de l'interleukine 4 et de l'interleukine 13 forment des complexes solubles avec ces deux interleukines, les empêchant d'agir. Les glucocorticoïdes agissent aussi sur les cellules présentatrices d'antigènes, inhibant la production de diverses cytokines de l'inflammation.

Si les lymphocytes *T* sont une des principales cibles des traitements de l'asthme, les lymphocytes *B* et les polynucléaires éosinophiles le sont également. Le recrutement des polynucléaires se fait par le biais de molécules adhésives, portées par les cellules endothéliales qui recouvrent les vaisseaux sanguins et par les cellules épithéliales des parois bronchiques ; ces molécules attirent les polynucléaires qui circulent dans

le sang contre la paroi des vaisseaux et en favorisent le passage à travers l'endothélium vasculaire jusqu'au site de l'inflammation. On étudie l'effet d'anticorps dirigés contre ces molécules adhésives ou contre leur récepteur, porté par les polynucléaires éosinophiles. Des anticorps dirigés contre des chimiokines, notamment contre l'éotaxine, et surtout contre son récepteur *CCR₃*, sont en cours de développement.

Enfin des anticorps dirigés contre les immunoglobulines E sont également en phase d'essais cliniques. D'autres voies thérapeutiques sont explorées. Les mastocytes, les cellules présentatrices d'antigènes et les polynucléaires éosinophiles produisent des leucotriènes délétères. Des agents qui inhibent leur action (en bloquant leur récepteur ou en interrompant la voie de leur synthèse) semblent intéressants. Toutefois, ils sont étroitement surveillés, car on a constaté l'émergence de formes rares d'asthme grave avec ce type de traitement. Enfin, les cromones (le cromoglycate et le nedocromil de sodium) stabilisent la membrane des mastocytes et réduisent la libération des médiateurs de l'allergie.

Si les glucocorticoïdes soulagent l'asthme si efficacement, c'est qu'ils agissent sur de nombreuses cibles et il est vraisemblable qu'on ne traitera pas avec une seule molécule spécifique une maladie à laquelle participent tant de messagers chimiques.

plusieurs étapes et éviteraient les troubles respiratoires.

Bien qu'on ne guérisse pas l'asthme, on sait généralement éviter les crises graves et l'installation d'une maladie chronique. Pour tester le risque allergique des personnes sensibles, le médecin pratique un test cutané à l'aide d'extraits purifiés d'allergènes appliqués sur la peau légèrement scarifiée. La réaction inflammatoire survenant dans les 15 minutes après l'exposition traduit une sensibilisation préalable à l'agent testé et sa probable responsabilité dans des symptômes allergiques. On sait tester la sensibilisation à l'égard de nombreux allergènes : les acariens, les pollens, les animaux domestiques et certaines moisissures. Dès qu'un allergène est détecté, on doit impérativement l'éliminer pour éviter les crises d'asthme. Puis on instaure des traitements pour soulager les crises et pour les prévenir. Le médecin apprend au malade et à ses

proches à évaluer la gravité de l'asthme grâce à des mesures régulières de la fonction respiratoire, par un débitmètre portable, et d'après l'intensité des manifestations cliniques, au cours des crises (coloration bleutée des extrémités, présence de sueurs, voire de troubles de la conscience). Quand la personne a moins d'une crise par semaine et une fonction respiratoire normale, l'asthme est qualifié d'intermittent ; quand plusieurs crises surviennent chaque semaine ou que la fonction respiratoire est perturbée, l'asthme est qualifié de persistant ou de chronique.

L'asthme est généralement une maladie assez facile à maîtriser par l'action combinée de mesures d'hygiène de vie et la prise de traitements administrés par inhalation. Le traitement de l'asthme a deux facettes : traitement de crise et traitement de fond. On traite les crises par des médicaments qui relâchent les spasmes des muscles bronchiques, les bronchodilatateurs. Ces

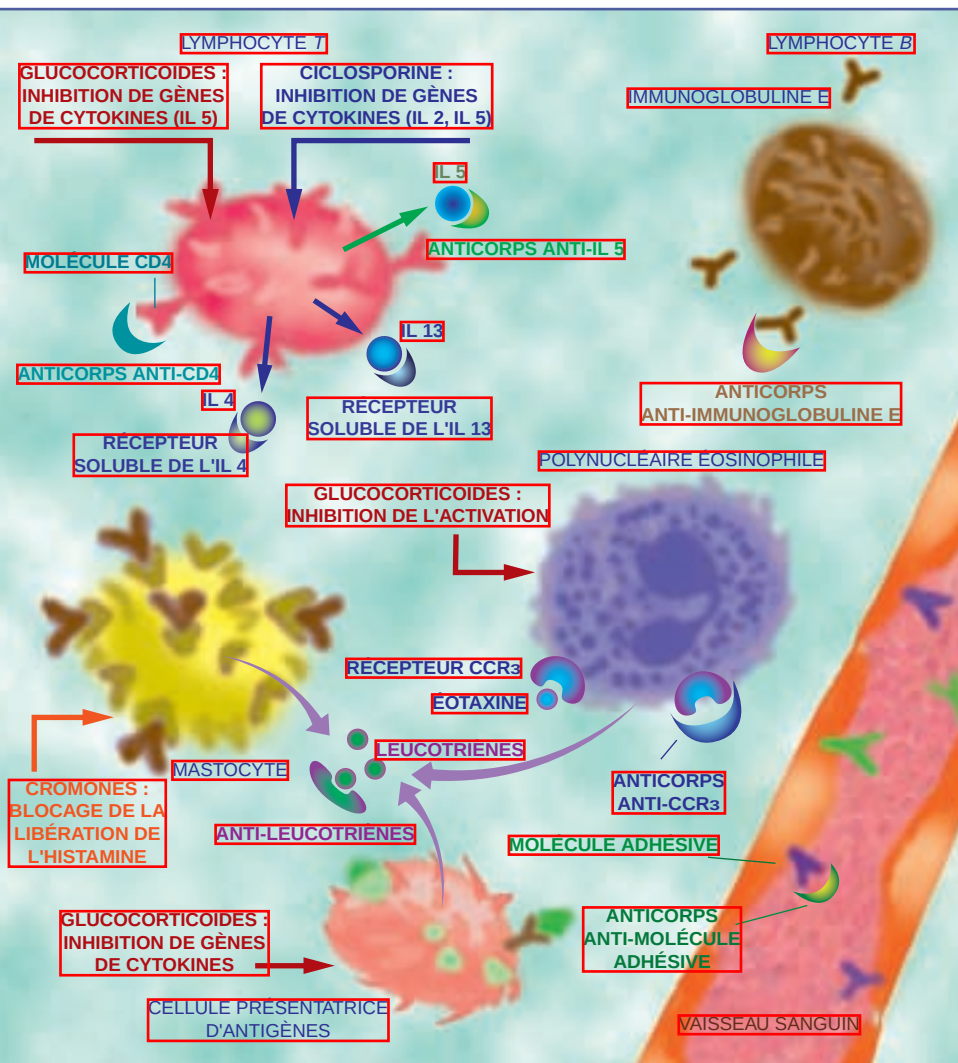
médicaments (tels le salbutamol ou la terbutaline) sont surtout administrés par voie inhalée, à l'aide de sprays doseurs. Ces traitements apportent un soulagement immédiat, mais le recours trop fréquent au traitement de crise représente un échec de la prise en charge et impose un traitement de fond par les glucocorticoïdes inhalés.

Comme tous les traitements de fond, celui de l'asthme n'est pas toujours bien accepté, car le malade doit prendre un traitement qui semble dépourvu d'efficacité immédiate tangible. Il n'apporte pas d'amélioration instantanée de la sensation d'oppression thoracique. En revanche, il empêche les mécanismes inflammatoires de s'emballer, de sorte que les crises seront moins nombreuses et la fonction respiratoire préservée.

La corticothérapie est reconnue comme étant le traitement de fond par excellence de l'asthme. Dans la plupart des cas, les glucocorticoïdes (le dipropionate de bécloéthasone, le budésonide, la fluticasone) sont administrés localement sous forme de sprays inhalables. Les doses de glucocorticoïdes sont régulièrement adaptées en fonction de l'aggravation ou de l'amélioration de la maladie asthmatique.

Les mécanismes d'action des médicaments

Comment agissent les glucocorticoïdes ? Ce sont de puissants immunosuppresseurs, inhibant les trois étapes essentielles de toute réaction allergique : la reconnaissance des antigènes, l'amplification de la réaction immunitaire et l'entretien des mécanismes inflammatoires. Ces effets immunosuppresseurs sont essentiellement ciblés sur les lymphocytes T et les cellules présentatrices d'antigènes. Les glucocorticoïdes inhibent la transcription des gènes codant de nombreuses cytokines, notamment l'interleukine 5, dont nous avons rappelé qu'elle active la prolifération des polynucléaires éosinophiles. En revanche, les glucocorticoïdes freinent peu la production d'immunoglobulines. Ils inhibent aussi la production de prostaglandines et de leucotriènes, facteurs qui stimulent la production des polynucléaires éosinophiles dans le sang et leur accumulation dans les bronches. L'action anti-inflammatoire de la corticothérapie chez l'asthmatique améliore la fonction respiratoire. Les formes inhalables assurent un traitement direct



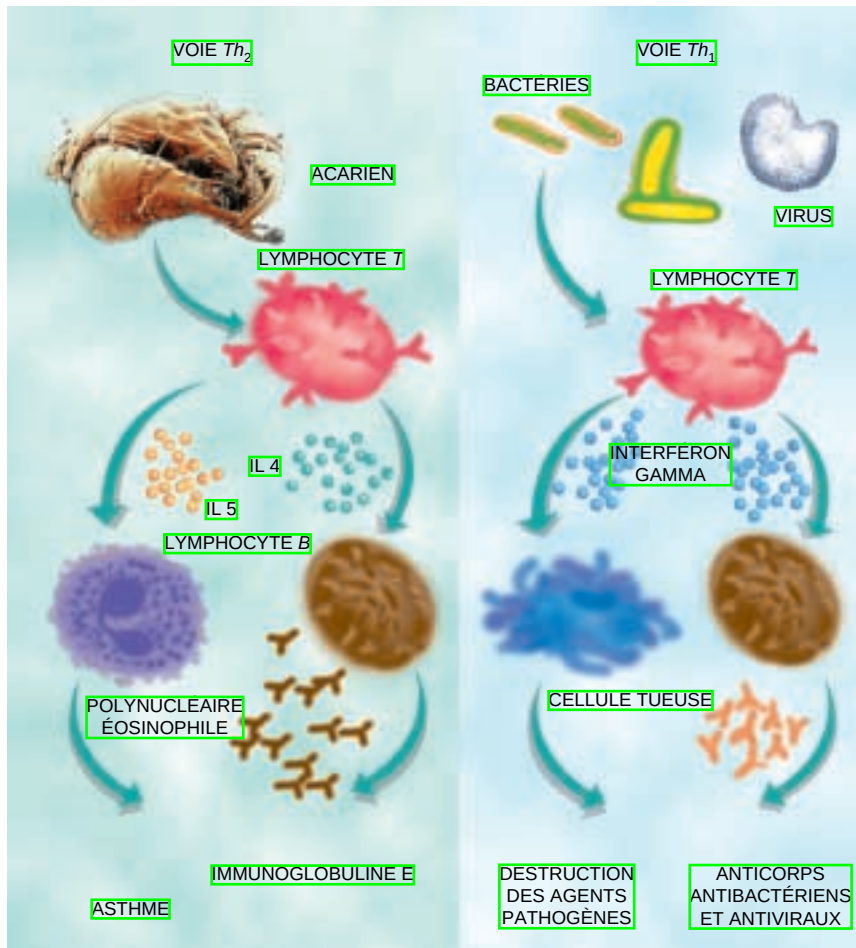
des voies aériennes cibles, sans effets secondaires notables.

Toutefois, certains asthmes corticodépendants ne peuvent être traités que par des glucocorticoïdes systémiques administrés à des doses élevées. Ces traitements corticoïdes prolongés ne sont pas dépourvus de risques : diabète, ostéoporose, cataracte, prise de poids, faciès disgracieux. Quelques médicaments de remplacement qui permettent de réduire la quantité de corticoïdes administrés tout en maintenant la fonction respiratoire sont en cours d'évaluation dans des services hospitaliers spécialisés. Ces traitements sont avant tout des immunosuppresseurs, tels le méthotrexate, l'azathioprine et la ciclosporine A, ou des anticorps monoclonaux qui bloquent sélectivement certaines cellules ou divers médiateurs.

La ciclosporine est un puissant immunosuppresseur, agissant principalement sur les lymphocytes T. Elle commence par interagir avec une protéine du cytoplasme, nommée cyclophiline; cette interaction déclenche une cascade de réactions qui aboutit à l'inhibition de l'expression de gènes codant diverses cytokines, dont l'interleukine 2 et l'interleukine 5. Très utilisée dans les transplantations d'organes, elle a notablement réduit les rejets de greffes. Elle est également utilisée avec quelques succès dans le traitement de maladies inflammatoires chroniques, telles que les colites inflammatoires ou la polyarthrite rhumatoïde. La ciclosporine serait utile pour les asthmatiques chez qui les corticoïdes sont peu efficaces. Toutefois, elle n'est pas dépourvue d'effets secondaires indésirables : elle est toxique

pour les reins, le foie et le système nerveux, elle favorise l'hypertension artérielle et l'hyperpilosité. Une forme inhalable réduirait ces effets délétères.

Pour bloquer l'activation des lymphocytes T, on pourrait aussi utiliser des anticorps monoclonaux dirigés contre la protéine CD₄, portée par les lymphocytes T auxiliaires (le keliximab est en cours d'essais cliniques en Grande-Bretagne et aux États-Unis). Toutefois un tel traitement doit être administré en perfusion, et une baisse prolongée du nombre de ces cellules immunitaires essentielles aux réactions de défense (les lymphocytes TCD₄ diminuent) serait dangereuse, car les risques de certaines maladies infectieuses graves augmenteraient. Outre ces grandes voies, les biologistes étudient, sur des modèles animaux, l'intérêt thérapeutique des molécules qui bloquent spécifiquement les cytokines de l'asthme.



4. LE SYSTEME IMMUNITAIRE semble s'orienter, chez le tout jeune enfant, soit vers la voie des défenses dirigées contre les micro-organismes pathogènes, dite Th₁, soit vers la voie de l'allergie, dite Th₂. En présence d'un allergène, notamment d'acariens (à gauche), les lymphocytes T activés produisent en abondance de l'interleukine 4, qui stimule la production d'immunoglobuline E par les lymphocytes B. C'est la voie préférentielle que choisirait le système immunitaire confronté à un excès d'allergènes dans un environnement où règne une grande hygiène. Au contraire, en présence de micro-organismes pathogènes, les lymphocytes T produisent de l'interféron gamma qui favorise l'élimination des agents infectieux par des cellules tueuses (à droite). Parce qu'il bloque la voie Th₂, l'interféron gamma affaiblit les réactions allergiques.

Modèles animaux et essais cliniques

Ces modèles sont des reproductions d'asthmes allergiques déclenchés par de puissants allergènes inhalés : on constate une production massive d'immunoglobulines E, une réaction immédiate et une réaction retardée après toute nouvelle exposition. Ces modèles permettent une analyse précise des réactions allergiques, car on réussit à agir sélectivement sur divers médiateurs.

Les études sur les primates ont confirmé la pertinence de certaines stratégies thérapeutiques envisagées chez l'homme, par exemple l'utilisation d'anticorps monoclonaux dirigés contre des cytokines et contre certaines molécules d'adhésion. Les modèles murins ont révélé le rôle clé des cytokines libérées par les lymphocytes T, notamment l'interleukine 4 et l'interleukine 5. Récemment, l'équipe de Marsha Wills-Karp, à l'Université Johns Hopkins, a montré l'intérêt de la protéine IL-13Rα₂, qui bloque sélectivement l'interleukine 13 : chez la souris sensibilisée, cette protéine réduit l'intensité de l'hyperactivité bronchique asthmatique.

On cherche aussi à bloquer l'action des molécules adhésives, puisque le recrutement massif des polynucléaires éosinophiles se fait par le biais de molécules d'adhésion qui piègent les cellules circulantes et favorisent leur agrégation dans le tissu pulmonaire. Des anticorps spécifiques de ces

molécules d'adhésion ont été testées chez le singe. Les résultats ayant été intéressants, ces molécules vont être expérimentées chez l'homme.

Chez l'homme, des essais cliniques sont en cours avec des molécules anti-interleukine 5. Les résultats obtenus avec ces anticorps semblent prometteurs chez les personnes atteintes d'asthme chronique. Au cours des prochaines années, des antagonistes de l'éotaxine et de son récepteur CCR₃ devraient être testés.

Museler les agents de l'asthme

Certaines techniques de désensibilisation, déjà utilisées chez l'homme, modifieraient le profil de production des cytokines par les lymphocytes T auxiliaires : elles «réduqueraient» le système immunitaire, abolissant les réactions allergiques chez ces personnes, comme l'ont montré Jean Bousquet, Philippe Godard et François-Bernard Michel, de l'Université de Montpellier. La désensibilisation, ou immunothérapie spécifique, doit être effectuée par des équipes entraînées et équipées d'un matériel de réanimation. La désensibilisation n'est pas recommandée chez les personnes ayant un asthme grave, car elle risque de déclencher des crises aiguës.

Certaines équipes espèrent réorienter les réactions immunitaires de personnes sensibles en limitant la «voie allergique» Th₂ de la réponse immunitaire. L'interleukine 12, l'interféron gamma ou des antagonistes sélectifs de l'interleukine 4, principale cytokine d'entretien de la polarisation de la voie allergique, auraient cet effet. Enfin, des «vaccins peptidiques», petits fragments d'allergènes, sont en cours d'évaluation. Contrairement aux allergènes entiers, ces petites molécules n'activent pas les mastocytes, mais elles seraient présentées aux lymphocytes T auxiliaires qui seraient réorientés vers la voie Th₁.

On cherche à agir sur les cytokines, mais aussi sur les autres molécules de l'allergie, notamment les leucotriènes et les immunoglobulines E. Des anticorps anti-immunoglobulines E ont été testés avec succès dans divers modèles animaux et dans l'asthme allergique humain. Avec l'équipe de J. Bousquet, nous menons des essais cliniques sur ces anticorps, administrés par voie sous cutanée : ils rédui-

Quand l'asthme n'est pas allergique

Entre 10 et 40 pour cent des asthmes ne semblent pas d'origine allergique. Comme dans l'asthme allergique, les personnes atteintes semblent être génétiquement prédisposées.

Les malades sont souvent des femmes et sont plus âgés, lorsque la maladie se déclare, que les personnes atteintes d'asthme allergique. Les malades sont moins sensibles aux glucocorticoïdes administrés comme traitement de fond. Les tests cutanés réalisés avec les allergènes usuels sont négatifs et les concentrations sanguines en immunoglobulines E sont basses.

Pourtant, on retrouve les signes biologiques et cliniques de l'asthme allergique : les polynucléaires éosinophiles associés à l'inflammation allergique sont abondants

dans les bronches de ces malades. Un puissant réseau de cytokines recrute et active ces éosinophiles, qui libèrent des protéines basiques responsables de lésions de l'épithélium bronchique et de l'hypersensibilité des bronches.

Pour certains, la maladie aurait une origine virale, car on a retrouvé des immunoglobulines E dirigées contre des virus respiratoires communs, tel le virus respiratoire syncytial, responsable des bronchiolites du nourrisson. D'autres biologistes pensent que l'asthme non allergique serait une maladie auto-immune.

Les nouveaux traitements envisagés pour l'asthme allergique seraient applicables à l'asthme non allergique : ciclosporine, anticorps anti-CD4, anticorps anti-IL5, agents bloquant le récepteur CCR3, par exemple.

sent notablement les concentrations sanguines d'immunoglobulines E ; chez l'homme, les symptômes de l'asthme sont réduits.

On a testé l'intérêt des traitements antiallergiques dirigés contre l'histamine, contre les leucotriènes, ou encore contre les prostaglandines, qui toutes participent au spasme bronchique. La plupart de ces traitements sont moins efficaces que les glucocorticoïdes. Seuls les antileucotriènes, et les cromones, qui empêchent les granules des mastocytes de libérer l'histamine qu'ils contiennent, sont utilisés dans le traitement de l'asthme léger à modéré.

Ainsi, les glucocorticoïdes restent le meilleur traitement de fond de l'asthme. Les nouveaux traitements, issus des connaissances des mécanismes cellulaires et moléculaires de l'asthme sont certes plus spécifiques, mais, étant donné le nombre de cytokines et de molécules de l'inflammation qui agissent en synergie dans la

maladie asthmatique, on ne soulagera vraisemblablement pas l'asthme par un seul antagoniste sélectif.

Parmi toutes les voies qui sont aujourd'hui explorées, citons pour terminer celle de la sensibilité génétique à la maladie. L'asthme est une maladie multifactorielle favorisée par certains terrains génétiques. On a confirmé le caractère génétique de l'asthme en étudiant des familles, notamment des jumeaux. Plusieurs gènes de susceptibilité à la maladie asthmatique ont été localisés, notamment sur le bras long du chromosome 5, dans une région qui contient aussi... de nombreux gènes codant des médiateurs puissants de l'allergie, les interleukines 4, 5 et 13!

Enfin, insistons sur le fait que l'asthme de l'enfant (comme celui de l'adulte) est notablement soulagé par de simples mesures d'hygiène, c'est-à-dire par l'éviction de l'allergène et par la lutte contre le tabagisme passif.

Marc HUMBERT est professeur de pneumologie à l'Université Paris-Sud. Il mène ses recherches dans le cadre de l'Institut Paris-Sud sur les cytokines et exerce à l'Hôpital Antoine-Béclère, à Clamart.

Manual of Asthma Management, sous la direction de Paul O'Byrne et Neil Thomson, WB Saunders, 1995.

Vaincre l'asthme. Stratégie globale pour la guidance de l'asthme et sa prévention. Rapport du groupe de travail NHLBI/OMS, in *Rev. Fr. Allergol. Immunol. Clin.*, vol. 36, pp. 545-740, 1996.

A.D. LUSTER, *Chemokines – Chemotactic Cytokines that Mediate Inflammation*, in *New Engl. J. Med.*, vol. 338, pp. 436-45, 1998.

M. ROTHENBERG, *Eosinophilia*, in *New Engl. J. Med.*, vol. 338, pp. 1592-600, 1998.

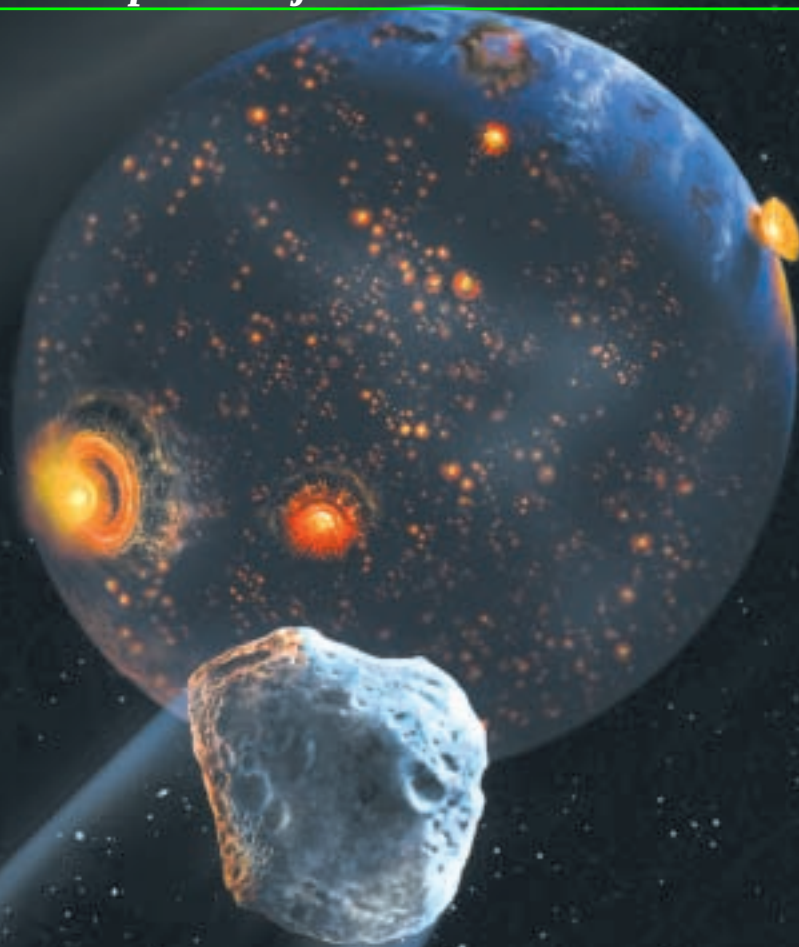
J. BOUSQUET et al., *Comprendre la maladie asthmatique*, in *Médecine/Sciences*, vol. 15, pp. 823-32, 1999.

M. HUMBERT et al., *Extrinsic (Atopic) and Intrinsic (Non-Atopic) Asthma: more Similarities than Differences*, in *Immunol. Today*, sous presse, novembre 1999.

La migration des planètes

RENU MALHOTRA

Le Système solaire a-t-il toujours eu sa conformation actuelle? De nouvelles observations laissent penser que la position des planètes externes a changé en raison d'interactions avec des petits objets.



1. A PEINE FORMÉE, NEPTUNE aurait voyagé dans un essaim de petits corps célestes de roches et de glaces nommés planétésimaux. Certains d'entre eux ont heurté la planète, mais la plupart ont été diffusés par la gravité de Neptune vers Jupiter, qui les a alors expulsés hors du Système solaire (page ci-contre). Lors de chaque diffusion, l'énergie de Neptune a augmenté, et le rayon de son orbite a légèrement crû. Des milliards de rencontres de ce type auraient progressivement amené Neptune vers son orbite actuelle.

Dans la représentation classique du Système solaire, chaque planète se déplace autour du Soleil sur une orbite bien définie, à une distance respectueuse de ses voisines. Ce manège céleste est immuable depuis que des astronomes enregistrent les mouvements planétaires, et les modèles mathématiques montrent que cette configuration orbitale stable est restée inchangée pendant la majeure partie des quatre milliards et demi d'années du Système solaire. On est tenté de supposer que les planètes sont nées sur leurs orbites actuelles.

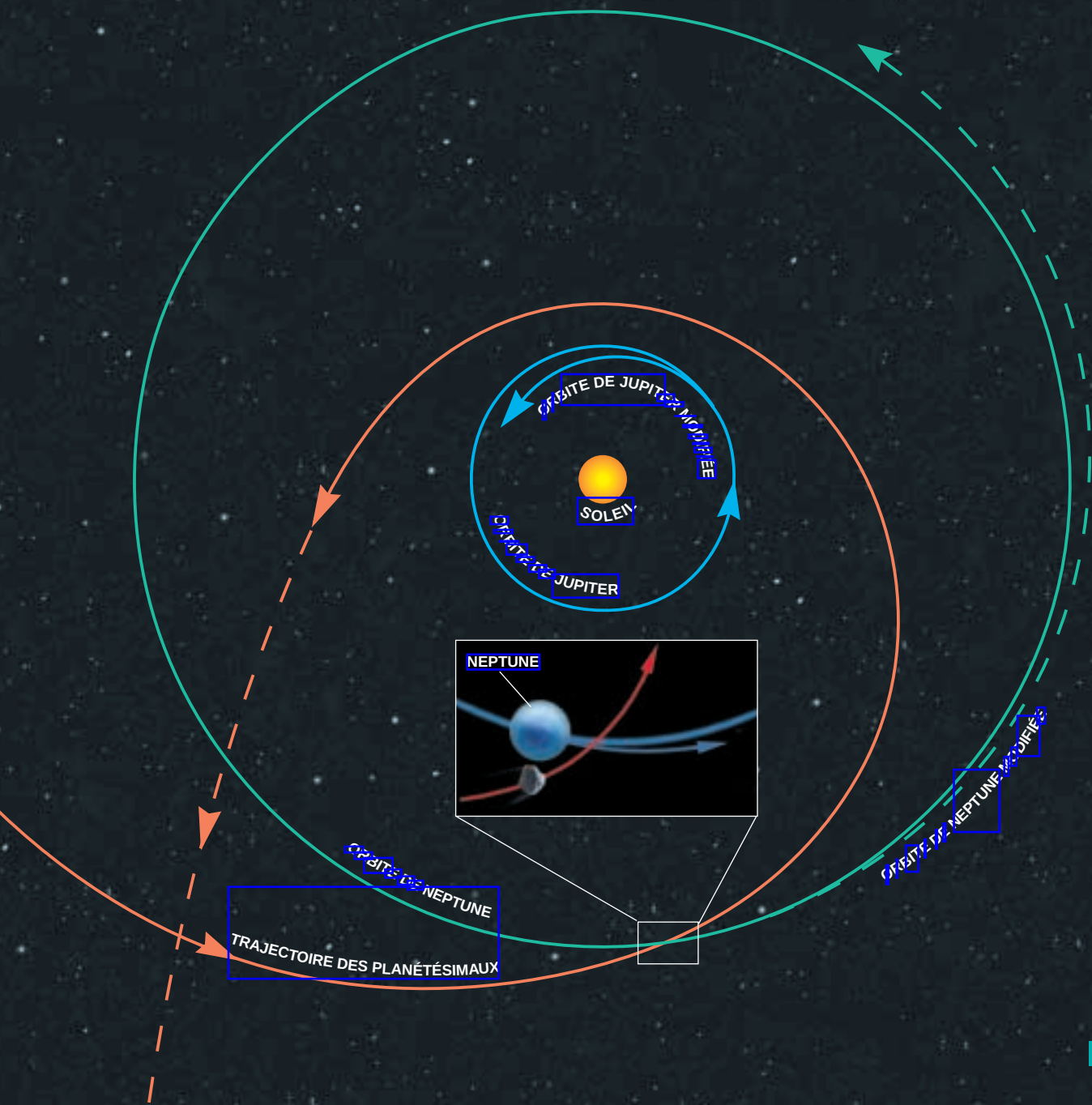
Plus précisément, les astronomes des dernières décennies ont souvent admis que la position des orbites planétaires correspondait à leur lieu de naissance dans la nébuleuse solaire,

le disque de gaz et de poussières à partir duquel s'est formé le Système solaire. Partant de cette hypothèse, on a utilisé les rayons orbitaux des planètes pour estimer la répartition de masse à l'intérieur de la nébuleuse solaire, pour étudier la formation du Système solaire et pour estimer les durées de formation des planètes.

Toutefois, les astronomes admettent aussi que de nombreux corps mineurs du Système solaire, tels les astéroïdes, les comètes ou les satellites des planètes, ont changé d'orbite au cours des derniers quatre milliards et demi d'années. Parfois, ces changements sont considérables : la chute de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter, en 1994, montra que le Système solaire n'est pas figé. D'autres

événements passent inaperçus : des objets plus petits, telles les poussières d'une taille de l'ordre du micromètre ou du millimètre, échappées des comètes et des astéroïdes, ont une trajectoire qui les font tomber en spirale sur le Soleil, arrosant d'une pluie de micrométéorites les planètes qui sont sur leur passage.

Dans le passé, l'orbite de nombreux satellites a considérablement varié. Par exemple, on pense que la Lune, qui gravite aujourd'hui à 384 000 kilomètres de la Terre, s'est formée à moins de 30 000 kilomètres. Au cours du dernier milliard d'années, la Lune s'est éloignée de près de 100 000 kilomètres, en raison de la dissipation des forces de marées exercées par le satellite sur notre planète (sous



l'effet des frottements dus aux marées, la Terre ralentit sa rotation, ce qui, en raison de la conservation de l'énergie, provoque l'éloignement de la Lune). De nombreux satellites des planètes extérieures ont également des mouvements synchronisés qui résultent des forces de marées : la période orbitale de Ganymède, le plus gros des satellites de Jupiter, est égale à deux fois celle d'Europe, qui, elle-même, est deux fois supérieure à celle de Io. Cette synchronisation découle vraisemblablement d'une évolution progressive des orbites de ces satellites, due aux forces de marées.

Et les planètes elles-mêmes ? Récemment encore, peu d'éléments laissaient croire que leur configuration orbitale avait changé depuis leur formation, mais les observations effectuées depuis cinq ans montrent que nous devons réviser nos théories. Tout d'abord, la découverte de la ceinture de Kuiper a montré que notre Système solaire s'étend bien au-delà de Pluton : environ 100 000 « planètes mineures » composées de glace (avec des diamètres compris entre 100 et 1 000 kilomètres) et un nombre encore supérieur de petits corps célestes occupent une région qui s'étend de l'orbite de Neptune (à environ 4,5 milliards de kilomètres du Soleil) jusqu'à au moins deux fois cette distance du Soleil. Ces objets sont répartis avec des caractéristiques que n'expliquent pas les théories actuelles. Les modèles théoriques qui décrivent cette répartition indiquent que la ceinture de Kuiper renferme des traces de l'histoire des planètes gazeuses géantes et, plus spécifiquement, des preuves d'un étalement progressif des orbites de ces planètes après leur formation.

De surcroît, la découverte de plusieurs planètes de la taille de Jupiter, en orbite très proche autour d'étoiles de type solaire, a fait penser que les planètes ne sont pas sur des orbites fixes. On comprend mal comment ces planètes se sont formées si près de leur étoile mère : se seraient-elles formées à des distances supérieures avant de migrer jusqu'à leurs positions actuelles ?

Pluton : exclu ou témoin ?

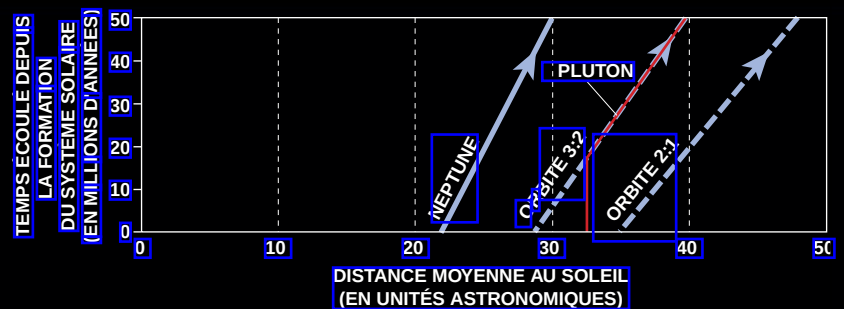
Jusqu'à ces dernières années, les seuls objets planétaires connus au-delà de Neptune étaient Pluton et son satellite, Charon. D'ailleurs, pour les théories dominantes de l'origine du Système

solaire, Pluton est une incohérence : cet objet, plusieurs milliers de fois moins massif que les quatre planètes gazeuses géantes, a une orbite très allongée et penchée sur l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre), alors que les huit autres planètes principales ont des orbites presque circulaires et coplanaires.

Pluton a une orbite très excentrique : au cours d'une révolution, sa distance au Soleil varie entre 30 et 50 unités astronomiques (l'unité astronomique est la distance moyenne de la Terre au Soleil, soit 150 millions de kilomètres). Elle est au maximum à 8 unités astronomiques au-dessus de

l'écliptique et à 13 unités astronomiques en dessous. Pendant approximativement 20 des 248 années qu'il compte sa période orbitale, Pluton est plus proche du Soleil que Neptune.

Dans les décennies qui ont suivi la découverte de Pluton, en 1930, des observations ont rendu cette planète plus mystérieuse encore : les astronomes ont découvert que la plupart des orbites qui croisent celle de Neptune sont instables. Un objet sur une telle orbite entre en collision avec Neptune ou est éjecté du Système solaire en un temps relativement court (moins de un pour cent de l'âge du Système solaire).



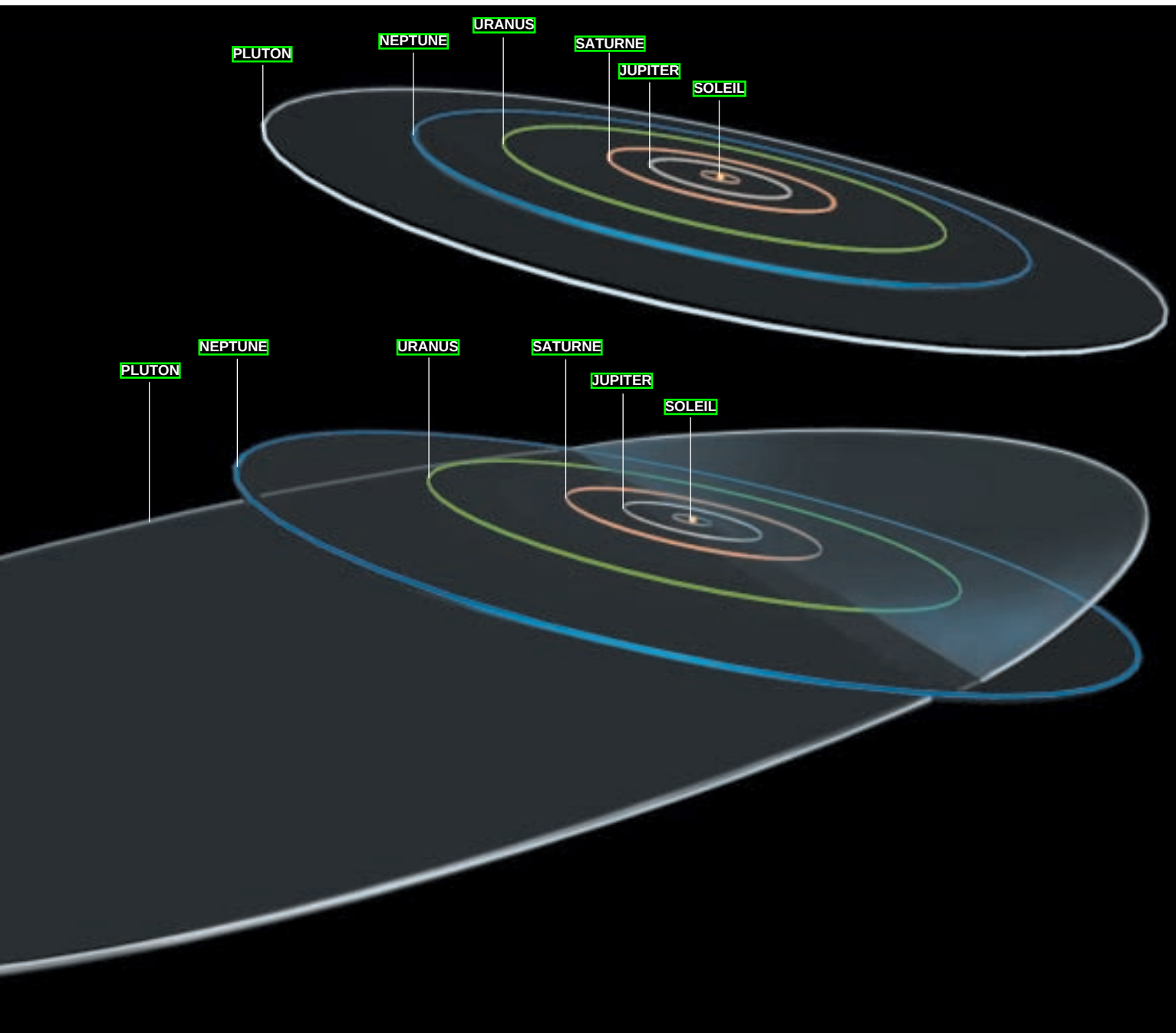
2. LA MIGRATION PLANÉTAIRE est illustrée par ces deux représentations du Système solaire, la première au moment de la formation des planètes (en haut, à droite), la seconde aujourd'hui (en bas à droite). On pense que l'orbite de Jupiter a légèrement rétréci, tandis que les orbites de Saturne, d'Uranus et de Neptune se sont agrandies (ces migrations n'ont pas eu de conséquences importantes sur la région planétaire centrale). Selon la théorie des migrations, Pluton était initialement sur une orbite circulaire. Lors de sa migration vers l'extérieur, Neptune a entraîné Pluton sur une orbite dont la période est exactement égale une fois et demie à celle de Neptune (ci-dessus). La gravité de Neptune a ainsi amené Pluton sur une orbite plus allongée, inclinée par rapport au plan orbital des autres planètes.

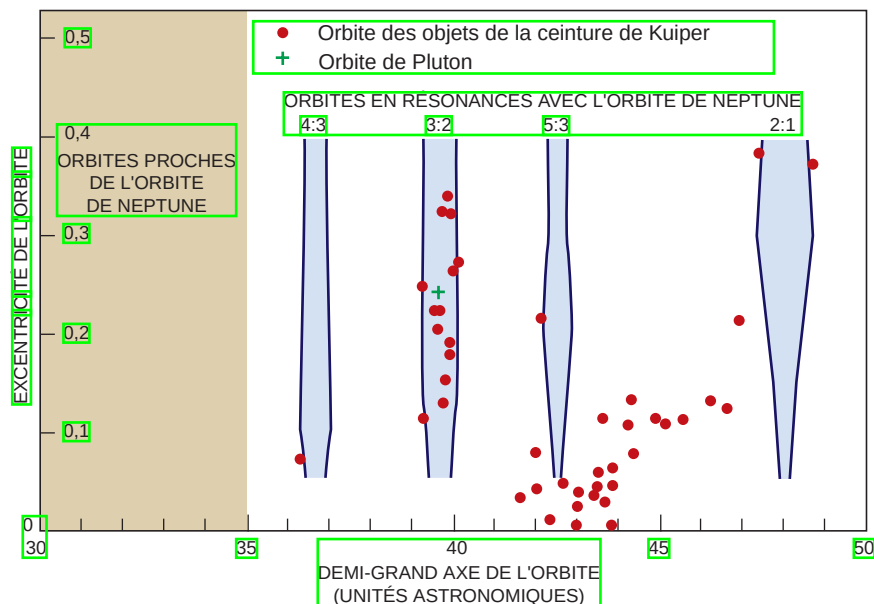
Or, l'orbite de Pluton, bien qu'elle croise celle de Neptune, est protégée d'un trop grand rapprochement avec la géante gazeuse par un mécanisme de résonance : Pluton effectue deux révolutions autour du Soleil quand Neptune en fait trois ; on dit que l'orbite de Pluton est en résonance 3:2 avec l'orbite de Neptune. En raison de ce mouvement relatif, lorsque Pluton traverse l'orbite de Neptune, cette dernière est très loin. De fait, la distance entre Pluton et Neptune n'est jamais inférieure à 17 unités astronomiques.

De plus, le périhélie de Pluton (le point de son orbite le plus proche

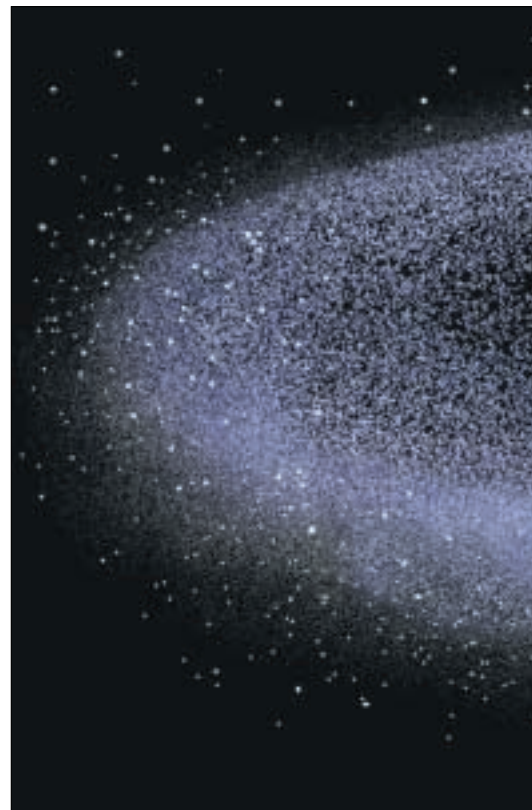
du Soleil) est toujours très au-dessus du plan de l'orbite de Neptune, ce qui garantit la stabilité orbitale à long terme de Pluton. Des simulations des mouvements orbitaux des planètes externes, tenant compte des effets de leurs perturbations mutuelles, indiquent que cette relation entre les orbites de Pluton et de Neptune existe depuis plusieurs milliards d'années et subsistera dans plusieurs milliards d'années. Pluton et Neptune font une danse cosmique bien réglée, la petite planète évitant toute collision avec la géante gazeuse depuis l'aube du Système solaire.

Comment Pluton est-elle arrivée sur une orbite aussi remarquable ? Par le passé, on invoquait des rencontres planétaires improbables, mais de nouvelles théories de la dynamique planétaire expliquent le rôle des résonances orbitales, sources à la fois de chaos et de stabilité. En 1993, j'ai utilisé ces résultats pour proposer un modèle de formation de Pluton : initialement, cette planète serait née un peu plus loin que Neptune, sur une orbite quasi circulaire, de faible inclinaison, analogue à celle des autres planètes ; puis des interactions gravitationnelles résonnantes avec Neptune l'auraient ensuite





3. LA CEINTURE DE KUIPER est une région en forme de tore, au-delà de l'orbite de Neptune, peuplée de très nombreux petits corps célestes (à droite). La théorie de la migration planétaire prédit des concentrations supérieures de ces objets sur les orbites en résonance avec celle de Neptune, c'est-à-dire celles dont la période est dans un rapport rationnel simple avec la période de Neptune (régions bleutées sur le diagramme ci-dessus). Les dernières observations montrent qu'un tiers des objets de la ceinture de Kuiper dont on connaît les orbites (points rouges) sont sur des orbites résonantes 3:2, du type de celle de Pluton (croix verte). On prévoit de trouver peu d'objets sur des orbites proches de celle de Neptune (zone marron).



déplacée sur son orbite actuelle. Cette théorie abandonne l'hypothèse selon laquelle les géantes gazeuses se seraient formées à la distance du Soleil où elles se trouvent aujourd'hui. Elle introduit également le concept d'une période de migration planétaire, au tout début de l'histoire du Système solaire, dont l'orbite singulière de Pluton serait la trace.

Tout commence lorsque les planètes sont presque constituées par accréation de «planétésimaux» (de petits corps composés de roches et de glaces, dont le rayon ne dépasse pas quelques dizaines de kilomètres pour la plupart). Autour des planètes géantes gazeuses quasi formées (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) demeure une population de ces petits corps. Par la suite, l'évolution du Système solaire ralentit, se limitant à la diffusion de ces planétésimaux ou à leur accréation sur les planètes principales (voir la figure 1). Comme la diffusion gravitationnelle éjecte la majeure partie de ces planétésimaux vers des orbites distantes ou non liées, les planètes perdent de l'énergie orbitale et du moment cinétique. Toutefois, en raison de leurs masses et de leurs distances au Soleil différentes, les quatre planètes géantes sont inégalement perturbées.

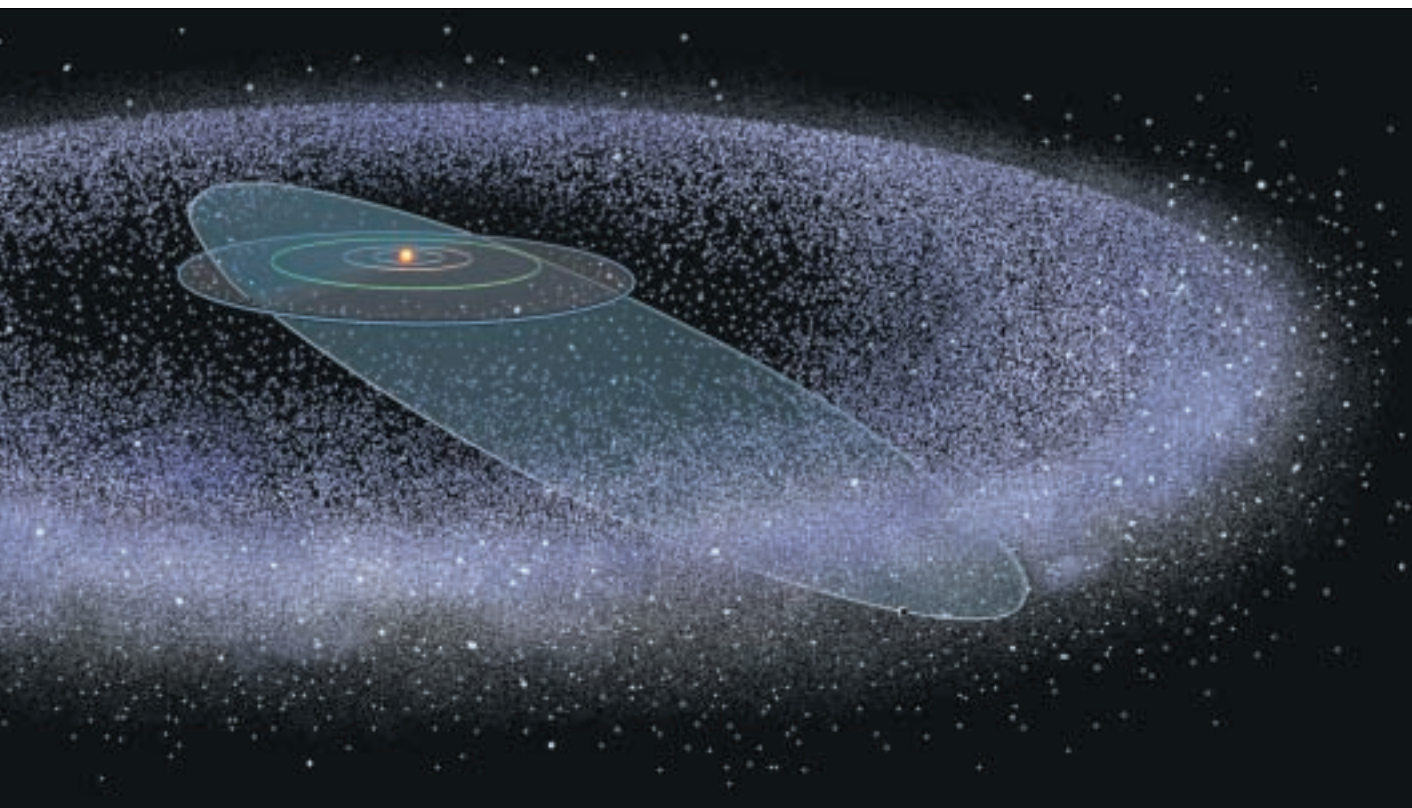
Considérons l'évolution orbitale de la planète géante la plus lointaine, Neptune, tandis qu'elle disperse la nuée de planétésimaux avoisinante. Initialement, l'énergie orbitale spécifique moyenne des planétésimaux (c'est-à-dire l'énergie orbitale par unité de masse) est égale à celle de Neptune, de sorte que les interactions gravitationnelles avec Neptune sont neutres : elles n'apportent pas d'énergie à Neptune et ne lui en prennent pas non plus. Après quelque millions d'années, le nuage de planétésimaux dans les parages de Neptune perd ses objets dont les énergies orbitales sont les plus faibles, car ils sont attirés par le champ gravitationnel des autres planètes géantes. La plupart de ces planétésimaux sont finalement éjectés hors du Système solaire par Jupiter, le poids lourd des planètes.

Ainsi, progressivement, l'énergie orbitale spécifique des planétésimaux rencontrés par Neptune devient supérieure à celle de Neptune. En raison des interactions gravitationnelles, l'énergie orbitale de Neptune augmente, et la planète s'éloigne du Soleil. Saturne et Uranus gagnent également de l'énergie orbitale et partent en spirale vers la périphérie, tandis que, en raison de la conservation de l'énergie totale du système, Jupiter perd de

l'énergie orbitale. Toutefois, Jupiter est si massif que son orbite change peu.

Dès 1984, à l'Institut Max Planck, Julio Fernandez et Wing-Huen Ip avaient déjà supposé de tels ajustements des orbites des planètes géantes. Faute d'observations et d'hypothèses directement testables, leurs travaux restèrent une curiosité.

En 1993, j'ai montré qu'à mesure que l'orbite de Neptune dérivait, elle entraînait les orbites qui sont en résonance avec son orbite. Pluton aurait été entraîné jusqu'à son orbite actuelle à partir d'une orbite initiale quasi circulaire, de faible inclinaison, extérieure à celle de Neptune. La probabilité que de tels objets soient captés et déportés vers l'extérieur avec les orbites résonantes pendant la migration de Neptune est très élevée (de la même façon, on augmente l'amplitude d'une balançoire au moyen de petites poussées, appliquées à la fréquence naturelle de la balançoire). L'excentricité finale mesurerait ainsi l'importance de la migration de Neptune. Selon cette théorie, l'excentricité orbitale de Pluton (0,25) indique que Neptune aurait migré vers l'extérieur d'au moins cinq unités astronomiques. À l'aide de simulations numériques, on estime aujourd'hui qu'une migration de huit unités astronomiques et une durée de



migration de quelques dizaines de millions d'années rendraient compte de l'inclinaison de l'orbite de Pluton.

Si Pluton était le seul objet situé au-delà de Neptune, cette explication resterait invérifiable, mais les calculs prédisent également la répartition orbitale des corps de la ceinture de Kuiper constituée des planétésimaux situés au-delà de Neptune, qui restent du disque primordial (voir *La ceinture de Kuiper*, de Jane Luu et David Jewitt, *Pour la Science*, juillet 1996). En supposant que les plus gros des corps de la ceinture de Kuiper étaient suffisamment petits pour que leur perturbation gravitationnelle sur les autres objets de la ceinture soient négligeables, le mécanisme dynamique de balayage résonant serait applicable non seulement à Pluton, mais également à tous les objets situés au-delà de Neptune, qui subiraient une déviation semblable de leur orbite d'origine. En conséquence, les objets sur des orbites excentriques devraient être plus nombreux aux deux plus fortes résonances de Neptune, la 3:2 et la 2:1. Les orbites correspondantes sont des ellipses de demi-grand axe respectivement égales à 39,5 et 47,8 unités astronomiques (le demi-grand axe est la distance moyenne entre l'objet et le Soleil.)

Aux autres résonances, telle la résonance 5:3, on trouverait également

des concentrations d'objets, mais moins denses. La région située entre Neptune et l'orbite 3:2 devrait être peu peuplée, en raison d'un important entraînement par résonance dans cette zone et parce que les perturbations engendrées par Neptune déstabiliseraient les orbites des éventuels objets restants. En revanche, les planétésimaux qui se sont formés à plus de 50 unités astronomiques du Soleil auraient été peu perturbés et auraient encore leur répartition initiale.

La découverte de nombreux objets dans la ceinture de Kuiper nous permet aujourd'hui de tester la théorie. Plus de 174 objets y ont déjà été découverts. La plupart d'entre eux ont des périodes de plus de 250 ans, et aucune orbite n'a été suivie sur plus de un pour cent de sa totalité. Néanmoins, on a déterminé avec une fiabilité raisonnable les paramètres orbitaux de 45 de ces objets (voir la figure 3). Ils ne sont pas répartis uniformément sur des orbites quasi circulaires et de faible inclinaison, comme cela serait le cas pour une population primordiale non perturbée de planétésimaux. Au contraire, on détecte des vides et des accumulations dans leur répartition. Une grande partie de ces objets de la ceinture de Kuiper se déplacent sur des orbites allongées de résonance 3:2, sem-

blables à celle de Pluton, et l'on ne compte presque aucun corps sur des orbites intérieures à l'orbite 3:2, ce qui est prédit par la théorie de l'entraînement par résonance.

Plusieurs questions demeurent néanmoins posées : le nombre d'objets en résonance 2:1 est-il du même ordre que celui des objets en résonance 3:2, conformément à la théorie de la migration planétaire? Quelle est la répartition des orbites à plus grande distance du Soleil? Le recensement de la population de la ceinture de Kuiper est encore trop incomplet pour que l'on réponde précisément à ces questions. En décembre 1998, une équipe du Centre pour les petites planètes, dans le Massachusetts, a annoncé l'identification du premier objet en résonance 2:1 avec Neptune. Deux jours plus tard, la même équipe révélait qu'un deuxième objet de Kuiper avait été découvert sur une orbite résonante 2:1. Ces objets sont tous deux sur des orbites très excentriques. Ils font peut-être partie d'une importante population d'objets situés sur des orbites de même type. On avait initialement cru que ces objets étaient respectivement sur des orbites 3:2 et 5:3, mais de nouvelles observations montrent que les identifications initiales étaient incorrectes. Cette révision souligne l'importance

d'un suivi des orbites des objets de Kuiper connus, en vue de mieux connaître leur répartition. Avec un ensemble de données restreint, le risque d'une conclusion incorrecte est élevé.

Bien qu'on ne puisse écarter d'autres explications, la répartition des objets de la ceinture de Kuiper renforce l'hypothèse de la migration des planètes. Neptune serait née à environ 3,3 milliards de kilomètres du Soleil et aurait ensuite fait un voyage d'environ 1,2 milliard de kilomètres vers la périphérie, couvrant une distance presque égale

au tiers du rayon de son orbite actuelle. Les migrations d'Uranus, de Saturne et de Jupiter auraient été plus limitées, respectivement de l'ordre de 15, 10 et 2 pour cent de leur rayon orbital actuel. Pour ces planètes, les estimations sont moins fiables, car, contrairement à Neptune, leurs migrations n'ont pas laissé de traces directes sur les objets de la ceinture de Kuiper.

L'essentiel de cette migration s'est opéré en moins de 100 millions d'années ; c'est long par rapport à la période de formation des planètes (moins de

10 millions d'années), mais c'est peu par rapport à l'âge du Système solaire (4,5 milliards d'années). Autrement dit, la migration planétaire a commencé au début du Système solaire, et elle a duré longtemps après que les planètes ont été formées. La masse totale des planétésimaux dispersés était d'environ trois fois la masse de Neptune. Des changements orbitaux encore plus spectaculaires se produisent précocement dans des systèmes planétaires, lorsque le disque primordial contient plus de matière, avec, peut-être, de

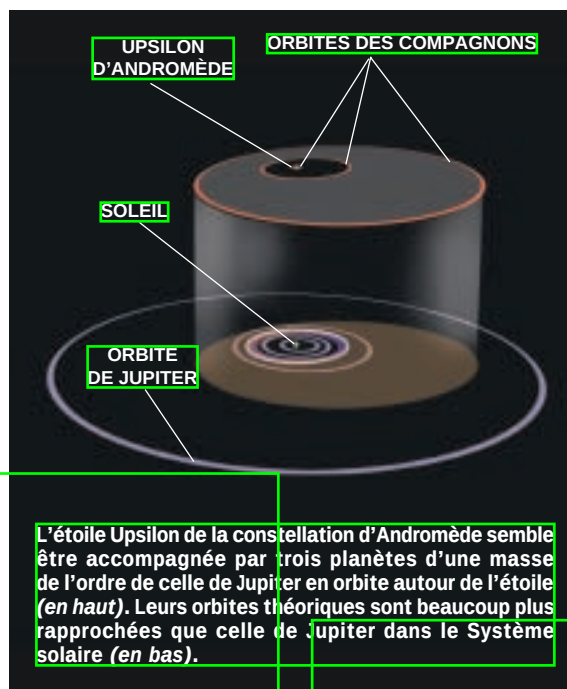
Un autre système planétaire ?

En avril 1999, Paul Butler et ses collègues de l'Observatoire anglo-australien ont annoncé la découverte de ce qui semble être le premier exemple de système planétaire comprenant plusieurs objets de masse équivalente à celle de Jupiter, en orbite autour d'une étoile de type solaire. Jusqu'alors, on ne connaissait que des systèmes à une planète. L'étoile étudiée par P. Butler, Upsilon de la constellation d'Andromède, est à 40 années-lumière du Système solaire ; elle est un peu plus massive que le Soleil et trois fois plus brillante.

Cette étoile semble posséder trois compagnons. L'objet le plus central a une masse au moins égale à 70 pour cent de la masse de Jupiter, et décrit une orbite circulaire à une distance de seulement 0,06 unité astronomique (soit environ neuf millions de kilomètres) de l'étoile. Le compagnon le plus externe est au moins quatre fois plus massif que Jupiter et se déplace sur une orbite très allongée, d'un rayon moyen de 2,5 unités astronomiques (la moitié du rayon de l'orbite de Jupiter). L'objet intermédiaire est au moins deux fois plus massif que Jupiter et parcourt une orbite moyennement excentrique, d'un rayon moyen de 0,8 unité astronomique.

Si elle est confirmée, cette découverte permettra de tester et de mettre au point de nouveaux modèles de formation et d'évolution des systèmes planétaires. Plusieurs théoriciens ont déjà déterminé que ce système est peu stable : la stabilité dynamique du système serait bien meilleure s'il n'y avait pas de planète intermédiaire. Ce résultat est intéressant, car le corps intermédiaire est celui pour lequel les données observationnelles sont le moins probantes.

Le système planétaire ne s'explique par aucun des mécanismes théoriques qui stipulent que les planètes géantes naissent sur des orbites distantes, avant de se rapprocher de l'étoile : si les interactions entre le disque et la protoplanète rétrécissaient les orbites, les planètes les plus massives, en principe les plus anciennes, devraient s'être le plus rapprochées de l'étoile, contrairement à ce



L'étoile Upsilon de la constellation d'Andromède semble être accompagnée par trois planètes d'une masse de l'ordre de celle de Jupiter en orbite autour de l'étoile (en haut). Leurs orbites théoriques sont beaucoup plus rapprochées que celle de Jupiter dans le Système solaire (en bas).

qui est observé dans le système Upsilon d'Andromède. Si seuls le corps le plus proche et le corps le plus éloigné de l'étoile existent vraiment, ce système corroborerait la théorie de diffusion planète-planète, où deux planètes massives migrent vers des orbites proches, puis s'éloignent en raison d'une diffusion mutuelle, avec pour résultat une planète sur une orbite rapprochée quasi circulaire, et l'autre sur une orbite lointaine et allongée. Cependant ce scénario n'explique pas tout : on s'attendrait à trouver le compagnon le plus massif sur l'orbite la plus proche de l'étoile, et le compagnon le moins massif sur l'orbite la plus lointaine, ce qui est l'inverse des caractéristiques du système Upsilon d'Andromède.

Les deux mécanismes auraient-ils agi simultanément ? Un rétrécissement orbital par des interactions disque-protoplanète pour l'objet le plus central aurait-il été suivi d'une diffusion gravitationnelle mutuelle des deux autres corps ? Il se peut également que des mécanismes de formation et d'évolution entièrement différents soient à l'œuvre, comme la fragmentation du nuage de gaz protostellaire, à laquelle on attribue la production de systèmes à étoiles multiples et les compagnons de naines brunes.

Si seuls le corps le plus rapproché et le corps le plus éloigné existent vraiment, le système aurait une architecture semblable à celle des systèmes stellaires triples classiques, constitués d'un système binaire serré et d'une étoile distante sur une orbite allongée. Davantage d'observations seront nécessaires pour confirmer le nombre de compagnons, leur masse et leurs paramètres orbitaux.

Les techniques utilisées jusqu'à présent ne permettent pas de détecter des systèmes planétaires semblables au nôtre, car les oscillations stellaires dues à des planètes de la taille de la Terre, en orbite rapprochée (ou à des planètes de la taille de Jupiter, en orbite plus lointaine), sont inférieures au seuil d'observation. Nous commençons seulement à découvrir des planètes autour d'étoiles de ce type. L'astronomie devra encore progresser beaucoup avant d'expliquer la formation de notre Système solaire.

nombreuses protoplanètes sur des orbites proches, en compétition dans le mécanisme d'accrétion.

D'autres systèmes planétaires ?

Au début des années 1980, à l'Institut de technologie de Californie, Peter Goldreich et Scott Tremaine calculèrent que les forces gravitationnelles entre une protoplanète et le disque de gaz environnant, ainsi que les pertes d'énergie engendrées par les forces de frottement visqueux dans le milieu gazeux, conduiraient à d'importants échanges d'énergie et de moment cinétique entre la protoplanète et le disque. Si les forces exercées sur la protoplanète par le disque de matière contenu dans l'orbite, d'une part, et par la matière se trouvant juste à l'extérieur, d'autre part, étaient légèrement déséquilibrées, l'orbite de la planète serait rapidement modifiée de manière draconienne. À l'époque, cette possibilité théorique avait peu retenu l'attention. N'ayant d'autre exemple que notre Système solaire, les théoriciens de la formation des planètes supposaient toujours que les planètes s'étaient formées sur leurs orbites actuelles.

Cependant, depuis cinq ans, la recherche de planètes extrasolaires a apporté quelques exemples possibles de migration planétaire. En mesurant les oscillations révélatrices des étoiles proches (situées à moins de 50 années-lumière du Système solaire), les astronomes ont découvert des preuves de la présence de compagnons de la taille de Jupiter autour d'étoiles analogues au Soleil. Le premier exemple, une planète en orbite autour de l'étoile 51 de la constellation de Pégase, a été découvert en 1995 par Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève. Aujourd'hui, une vingtaine de planètes extrasolaires ont été décelées. La technique utilisée pour ces recherches (la mesure du décalage Doppler des rayonnements des étoiles, pour déterminer les variations périodiques des vitesses stellaires orbitales) ne fournit qu'une limite inférieure pour la masse des compagnons des étoiles. La plupart des objets trouvés ont des masses supérieures à la masse de Jupiter et des rayons orbitaux inférieurs à 0,5 unité astronomique.

Que révèlent ces objets sur la constitution du Système solaire ? Selon le modèle classique de formation plané-

taire, les planètes géantes du Système solaire se sont formées en deux étapes. Au cours de la première étape, des planétésimaux solides se sont agglutinés et ont formé un noyau protoplanétaire. Lors de la seconde étape, ce noyau s'est entouré d'une enveloppe gazeuse massive, constituée d'éléments de la nébuleuse environnante attirés par la force gravitationnelle du noyau. La durée de vie des disques protoplanétaires autour des étoiles de type solaire montre que cette formation se termine moins de dix millions d'années après la formation de la nébuleuse solaire elle-même.

À moins de 0,5 unité astronomique d'une étoile, la masse du disque primordial est trop faible pour que des noyaux protoplanétaires solides se condensent. De surcroît, il est douteux qu'une protoplanète en orbite proche puisse attirer suffisamment de gaz pour se constituer une enveloppe aussi massive que celle de Jupiter. L'une des raisons en est géométrique : un objet en orbite rapprochée traverse un volume inférieur à celui d'un objet qui se déplace sur une orbite plus éloignée. En outre, le disque gazeux, plus chaud près de l'étoile, est moins susceptible de se condenser en un noyau protoplanétaire froid. Au total, la formation de planètes géantes sur des orbites très proches est peu plausible.

Plusieurs théoriciens ont donc supposé que les planètes géantes extrasolaires se seraient formées à plusieurs unités astronomiques de leur étoile et auraient ensuite migré vers l'intérieur. Trois mécanismes de migration orbitale planétaire sont à l'étude. Deux font intervenir des interactions disque-protoplanète par lesquelles les planètes migreraient loin de leur lieu de formation tant que subsiste un disque massif.

Selon la théorie de P. Goldreich et S. Tremaine, le mouvement de la planète serait couplé à celui du gaz qui vient s'ajouter à la protoétoile : la planète pourrait soit plonger dans l'étoile, soit se désolidariser du gaz au moment où il devient très proche de l'étoile. L'autre hypothèse envisagée est l'interaction avec un disque de planétésimaux plutôt qu'avec un disque gazeux : une planète géante initialement placée dans un disque très massif de planétésimaux échangerait de l'énergie et du moment cinétique par diffusion gravitationnelle et par des interactions résonantes ; son orbite se rétrécirait alors jusqu'à ce qu'elle

Des petits corps mal connus

Depuis 1992, les découvertes se succèdent à un rythme effréné : environ 200 objets transneptuniens ont déjà été observés depuis 1992. Cette moisson résulte de l'utilisation de caméras à capteurs CCD montées sur les grands télescopes internationaux. Cependant, la plupart de ces corps n'ont été observés qu'une fois et ils ne seront probablement jamais observés à nouveau. La détermination de leur orbite est compromise, car elle nécessiterait plusieurs années d'observation. En trois ans, de tels objets parcourent environ un centième d'orbite, soit le strict minimum pour la détermination d'une orbite approximative. De surcroît, il faut que l'objet soit observé chaque année lors de son passage à l'opposition (lorsque l'objet et le Soleil sont opposés dans le ciel), ce qui nécessite une coopération entre tous les groupes d'observateurs.

Brett Gladman, de l'Observatoire de la Côte d'Azur collabore avec des astronomes de l'Université de Toronto dans un programme de recherche et de suivi d'objets transneptuniens. De nouvelles techniques d'observation et de traitement des données leur ont permis de découvrir l'objet le plus lointain (62 unités astronomiques lors de son observation) et l'objet le plus petit (15 kilomètres de dimension).

Le nombre d'objets lointains bien connus étant très restreint, les conclusions sur le Système solaire externe restent spéculatives. Ainsi, plusieurs équipes travaillent sur des scénarios différents de celui présenté dans l'article de R. Malhotra. Sous l'impulsion d'Alessandro Morbidelli, le groupe de mécanique céleste de l'Observatoire de la Côte d'Azur a imaginé que de gros planétésimaux (certains d'une taille au moins équivalente à celle de Mars) se forment en même temps que les planètes géantes. À la fin de la formation des planètes géantes, le gaz qui était dans le Système solaire commence à se dissiper. La dynamique gravitationnelle n'est alors plus amortie par le gaz environnant et l'orbite des gros planétésimaux

est très perturbée par les planètes géantes : en quelques millions ou dizaines de millions d'années, ils auraient été éjectés du Système solaire. Au cours de cette éjection, les gros planétésimaux traversent les ceintures de petits corps et les perturbent. De nombreux petits corps sont éjectés du Système solaire ; les survivants sont sur des orbites excentriques et inclinées.

Un tel modèle explique d'une façon unifiée les caractéristiques dynamiques et physiques connues, pour la ceinture des astéroïdes, et supposées, pour la ceinture de Kuiper. Contrairement à celui de R. Malhotra, ce modèle prévoit que tous les petits corps au-delà de Neptune sont entraînés sur des orbites excentriques et inclinées, pas seulement ceux qui sont sur des orbites résonantes.

Le grand nombre d'objets sur des orbites résonantes, point clef du modèle de R. Malhotra, pourrait n'être qu'un effet de sélection des observations, qui sont le plus souvent effectuées dans des directions où les corps en résonances dominent ; de plus, les responsables du Centre pour les petites planètes de Cambridge, chargés de la détermination des orbites, ont la fâcheuse manie d'attribuer une orbite résonante à tout corps pour lequel les données orbitales manquent...

Le mécanisme de capture des orbites résonantes fonctionne uniquement lorsqu'il n'y a plus de gros planétésimaux dans le Système solaire. Aussi, l'évolution du Système solaire s'est probablement déroulée en deux phases : une perturbation des petits corps, due pour l'essentiel à la présence de planétésimaux massifs, puis, lorsque ces planétésimaux ont été éjectés, une période de migration de Neptune qui a capturé certains corps en résonance, enrichissant les orbites résonantes. Toutefois, comme les orbites initiales des objets transneptuniens n'étaient vraisemblablement par circulaires, leur excentricité actuelle ne permet pas de déduire la distance de migration.

Jean-Marc PETIT, Observatoire de la Côte d'Azur, Nice

atteigne le bord interne du disque, à quelques rayons stellaires seulement de l'étoile. Enfin, le troisième mécanisme est la diffusion des planètes, qui se seraient formées sur des orbites trop proches les unes des autres pour assurer une stabilité à long terme ou qui auraient migré vers de telles orbites. Si l'issue de ce scénario reste imprévisible, il devrait néanmoins conduire à des orbites très excentriques. Le hasard pourrait, dans certains cas, placer une des planètes dispersées sur une orbite excentrique, dont le point le plus proche de l'étoile serait si proche de cette dernière que les effets de marées finiraient par circulariser l'orbite ; l'autre planète serait déplacée vers une orbite excentrique éloignée. Chacun de ces mécanismes peut rendre compte de toute une variété de rayons orbitaux et d'excentricités orbitales pour les planètes survivantes.

Ces idées ne sont pas un simple ajustement de la théorie classique de formation des planètes. Elles remettent en cause l'opinion répandue qui voudrait que les disques protoplanétaires entourant des étoiles de type solaire évoluent en des systèmes planétaires semblables au nôtre. En réalité, la plupart des planètes pourraient naître dans des configurations instables, de sorte qu'une migration planétaire ultérieure donnerait des résultats très variés, selon les propriétés initiales du disque. Seules de nouvelles observations et des avancées théoriques permettront d'élucider la relation entre les planètes extrasolaires nouvellement découvertes et les planètes de notre Système solaire. Néanmoins, les astronomes sont maintenant convaincus que les planètes peuvent changer d'orbite de façon radicale.

Renu MALHOTRA travaille au Laboratoire Lunaire et planétaire de l'Université de l'Arizona.

Ivars PETERSON, *Le chaos dans le Système solaire*, Collection Sciences d'avenir, Pour la Science, 1995.

Geoffrey W. MARCY et R. Paul BUTLER, *Detection of Extrasolar Giant Planets*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 36, pp. 57-98, 1998.

Renu MALHOTRA et al., *Dynamics of the Kuiper Belt*, in *Protostars and Planets IV*, sous la direction de V. Mannings et al., University of Arizona Press (à paraître).

Le développement moral des enfants

WILLIAM DAMON

Les enfants ont un sens aigu du bien et du mal. Ils ont également besoin de s'engager pour leurs idéaux. Les parents peuvent les y aider.

Les journaux et les télévisions rapportent périodiquement des cas de saccages d'écoles, d'attaques d'enseignants ou d'élèves, de parricides, de persécutions, d'extorsions, de trafics de drogues, de jeux clandestins, de viols ou de fraudes perpétrés par des enfants. Aucun milieu social n'est épargné : des jeunes issus de la classe moyenne terrorisaient récemment un quartier fréquenté de Paris, s'attribuant des points pour chacune de leurs actions antisociales. Le roman de William Golding *Sa Majesté des Mouches*, où de jeunes écoliers, livrés à eux-mêmes sur une île déserte, retournent à la barbarie, semble être une prophétie inquiétante.

Pourtant, l'arbre ne doit pas cacher la forêt : la plupart des enfants se conforment aux règles de leur société, ils sont honnêtes, gentils, francs et respectueux. Beaucoup, même, se dévouent à des causes sociales et participent à des travaux d'intérêt public. Par exemple, les psychologues ont bien analysé le cas de Ruby, une fillette noire américaine qui abattit la barrière raciale, dans les années 1960 : chaque jour, elle entrait dans une école uniquement fréquentée par des Blancs et elle priait pour la rédemption de ceux qui l'insultaient. Dans son combat pour un monde plus juste, Ruby faisait preuve de volonté, de courage, d'honneur et de résistance morale.

Tous les enfants naissent avec des prédispositions morales : certaines réactions innées les prédisposent à agir selon des règles éthiques. Par exemple, les nourrissons pleurent lorsqu'ils entendent d'autres bébés pleurer, ils expriment des signes de

plaisir quand ils écoutent des sons joyeux, tels des gazouillis d'oiseaux ou des rires. Dès l'âge de deux ans, de nombreux enfants consolent les adultes qu'ils voient tristes, même si le réconfort n'est pas toujours adapté : un enfant de deux ou trois ans offrira son objet transitionnel à sa mère lorsqu'elle est contrariée.

Toutefois, la capacité pour ressentir les émotions des autres peut régesser au point que les enfants se livrent à des actes extrêmement cruels. À un policier qui lui demandait comment il avait pu blesser une femme de 83 ans pendant un vol, un adolescent a répondu : « Qu'est-ce que ça peut me faire ? Je ne suis pas elle. » Bien que la disposition émotionnelle à aider soit présente, les moyens d'aider les autres doivent être acquis et affinés à travers l'expérience sociale.

L'analyse scientifique du développement moral doit expliquer ces deux aspects : le bon comme le mauvais. Pourquoi la plupart des enfants se conduisent-ils de manière morale, parfois de façon exceptionnelle, même lorsque ce comportement nuit à leur intérêt immédiat ? Pourquoi certains enfants s'écartent-ils de la norme, mettant en danger les autres et eux-mêmes ? Comment un enfant devient-il moral et pourquoi le reste-t-il, ou non, toute sa vie ?

Parfois, les études des psychologues confirment simplement les observations et les intuitions des parents. Cependant, parfois aussi, ces derniers sont induits en erreur par leur subjectivité, par des informations partielles ou par le sensationnalisme des médias. Par exemple, certains blâment des événements triviaux, tel

un concert, parce qu'ils l'associent à des comportements dangereux, telle la toxicomanie. Ou encore, les parents compensent leurs propres problèmes, qu'ils attribuent à une éducation stricte, en élevant leurs enfants de façon excessivement permissive. Dans un domaine aussi contesté que celui de la morale des enfants, seule une démarche scientifique systématique peut éviter les analyses superficielles propices à la répétition des erreurs pédagogiques.

La généalogie de la morale

La recherche sur le développement moral, souvent très médiatisée, a proposé trois types de théories. Selon certaines, la biologie et l'hérédité sont principalement à l'origine des comportements moraux ; pour d'autres, l'expérience et l'influence sociale sont primordiales ; pour d'autres enfin, le développement intellectuel est essentiel. Ces différentes théories s'accordent toutefois sur l'absence d'un déterminisme unique au comportement moral ou immoral. Par exemple, les films violents ou les jeux de guerre sur ordinateur peuvent faire basculer certains enfants vers la délinquance, tandis que d'autres y restent insensibles. L'analyse scientifique doit prendre en compte la complexité et la diversité des vies des enfants.

1. LES ENFANTS, dès leur plus jeune âge, ont une vie morale très développée (entraide, partage, agressivité, compassion...). Les psychologues qui souhaitent comprendre un comportement doivent éviter de trop simplifier et ainsi de ne pas tenir compte de sa complexité.



Photo by Rick Orloff, The Image Works



Photo by Rick Orloff, The Image Works



Photo by Rick Orloff, The Image Works



Photo by Rick Orloff, The Image Works

Selon les théories biologiques dites nativistes, la moralité humaine résulte de dispositions émotionnelles innées de l'espèce humaine. Martin Hoffman, de l'Université de New York, Colwyn Trevarthen, de l'Université d'Édimbourg, et Nancy Eisenberg, de l'Université de l'Arizona, ont montré que les bébés ressentent les émotions des autres dès qu'ils reconnaissent leur existence ; on a observé de tels comportements dès la première semaine après la naissance. La honte, la culpabilité et l'indignation apparaissent également très tôt : les jeunes enfants sont souvent outrés par la violation des attentes sociales, telle une infraction aux règles de leur jeu favori.

Ces dispositions sont universelles : elles ont été retrouvées chez des nourrissons ougandais, américains, européens et israéliens. Partout dans le monde, les enfants naissent avec de l'affection pour leurs proches et de l'aversion envers les comportements inhumains ou injustes. Les différences dans le déclenchement et l'expression de ces réactions n'émergent que plus tard, lorsque les enfants ont été exposés aux systèmes de valeur particuliers de leur culture.

L'apprentissage intervient également : les normes et les valeurs comportementales s'acquièrent par l'observation, l'imitation et la récompense ; le comportement moral dépend

du contexte et varie indépendamment des croyances affichées. Dans les années 1920, Hugh Hartshorne et Mark May ont ainsi étudié les réactions des enfants qui ont l'occasion de tricher, et ils ont découvert que le comportement infantile est déterminé par leur estimation de la probabilité d'être pris. Ce comportement ne peut être déduit ni de leur conduite dans une situation antérieure, ni de leur connaissance de règles morales communes.

Une nouvelle analyse des données de Hartshorne et May a révélé que les plus jeunes trichaient plus souvent que les adolescents. Dans une faible proportion, la socialisation ou le développement mental restreignent peut-être la malhonnêteté.

Le développement intellectuel est au centre de la troisième théorie, qui indique que la vertu et le vice sont une question de choix conscient. Selon Jean Piaget et Lawrence Kohlberg, les auteurs de la théorie cognitive la plus connue, les croyances morales précoces des enfants sont orientées vers le pouvoir et l'autorité. Après un temps où la force prime sur le droit, les jeunes enfants découvrent que les règles sociales, définies par le groupe, sont renégociables, et que la réciprocité des relations est préférable à une soumission unilatérale. Kohlberg a proposé de décomposer la maturation du jugement moral en six étapes (voir l'encadré ci-contre).

La conscience contre le chocolat

Largement utilisée, l'échelle de Kohlberg souffre néanmoins de quelques défauts. La sixième étape, la plus évoluée, où la conception morale repose exclusivement sur des principes abstraits, est rarement atteinte. De surcroît, de nombreuses études (dont certaines ont été effectuées dans mon laboratoire) ont montré que les enfants sont bien plus moraux que ce qu'indiquent les premières étapes du modèle. Ils n'agissent pas simplement par peur de la punition : lorsqu'un camarade de jeu s'approprie une assiette de biscuits ou refuse de laisser la balançoire, on les entend souvent protester : «Ce n'est pas juste!» Parallèlement, les enfants partagent avec les autres, même quand leurs parents le leur interdisent. Les enfants de maternelle croient généralement au partage équitable des biens, et leurs

Les six étapes du discernement moral

En grandissant, les enfants et les jeunes adultes dépendent de moins en moins des influences extérieures et de plus en plus de croyances personnelles. Dans les années 1950, Lawrence Kohlberg a proposé un modèle de progression morale en six étapes, regroupées en trois niveaux. Ce modèle est fondé sur l'étude de 58 jeunes, interrogés régulièrement pendant 20 ans. On évaluait la maturité morale en analysant des justifications de leurs réponses (oui ou non)

à des dilemmes hypothétiques (par exemple, un époux a-t-il le droit de voler un médicament pour sa femme mourante?). À mesure que les jeunes grandissent, leur sens moral évolue. Aucun des jeunes étudiés n'a atteint la sixième étape. Malgré son efficacité, ce modèle reste insuffisant pour expliquer le comportement réel des individus : deux personnes au même stade de développement moral agissent parfois très différemment.

NIVEAU 1 : INTERET PERSONNEL

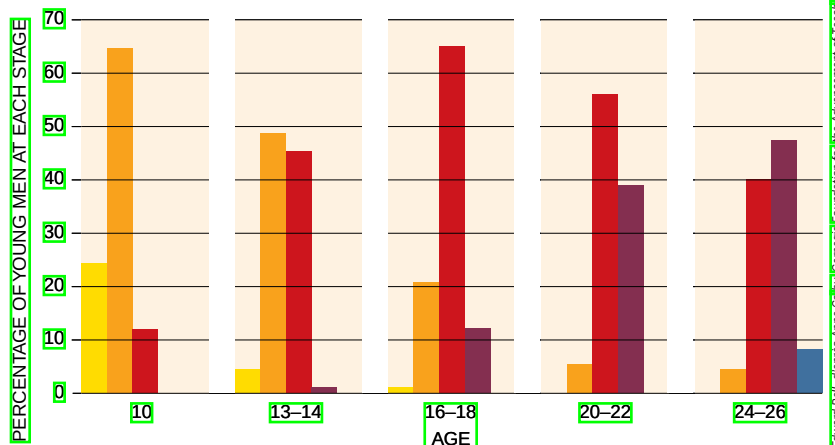
- PREMIERE ETAPE** PUNITION : "Je ne le fais pas, parce que je ne veux pas de punition."
- DEUXIEME ETAPE** RÉCOMPENSE : "Je ne le fais pas, parce que je veux une récompense."

NIVEAU 2 : APPROBATION SOCIALE

- TROISIEME ETAPE** RELATIONS INTERPERSONNELLES : "Je ne le fais pas, parce que je veux que les autres m'aiment."
- QUATRIEME ETAPE** ORDRE SOCIAL : "Je ne le fais pas, parce que c'est illégal."

NIVEAU 3 : IDEAUX ABSTRAITS

- CINQUIEME ETAPE** CONTRAT SOCIAL : "Je ne le fais pas, parce que j'ai l'obligation de ne pas le faire."
- SIXIEME ETAPE** DROITS UNIVERSELS : "Je ne le fais pas, parce que ce n'est pas juste, quoique les autres en disent."



comportements sont fondés sur les émotions des autres («Je veux que mon ami se sente bien»), la réciprocité («Elle me prête ses jouets») et l'égalité («On devrait tous avoir la même chose»). Ils découvrent ces notions à travers la confrontation avec leurs semblables au cours du jeu. Ils apprennent notamment que, sans justice, les jeux finissent toujours mal.

Aucune des trois théories classiques n'explique complètement le développement, ni le comportement moral, car elles négligent la personnalité et l'engagement de l'enfant. Aujourd'hui, les psychologues étudient comment les enfants vivent ou non à la hauteur de leurs idéaux.

Mes collègues et moi-même avons étudié comment les enfants luttent contre la tentation. Nous avons demandé à des groupes de quatre enfants de confectionner des bracelets et des colliers avec du fil et des perles. Après les avoir chaleureusement remerciés pour leur travail, nous avons récompensé chaque groupe avec dix bonbons au chocolat. Puis nous leur avons demandé de partager la récompense et nous avons quitté la pièce, les observant à travers un miroir sans tain.

Avant l'expérience, nous avions interrogé chaque enfant sur son idée de l'équité. Nous voulions vérifier si la perspective du vrai chocolat aurait raison de leur sens abstrait du bien et du mal. Nous avons également confronté un groupe contrôle malheureux à un problème identique, en utilisant des rectangles de carton au lieu de chocolat. Afin d'évaluer l'influence de l'âge sur les relations entre la moralité de situation et la moralité hypothétique, nous avons étudié des groupes d'enfants âgés de quatre, de six, de huit et de dix ans.

Les enfants récompensés par du carton ont été presque trois fois plus généreux les uns envers les autres que ceux qui ont reçu du chocolat. Nous en concluons que les idéaux des enfants ont une influence sur leur comportement, mais seulement dans les limites de leur intérêt personnel.

Néanmoins, les idées morales résistent en partie. Par exemple, les enfants qui avaient préconisé des solutions fondées sur le mérite («Celui qui a le mieux travaillé devrait avoir le plus de bonbons») furent ceux qui défendirent le plus souvent le mérite lorsqu'il fallut vraiment partager. Ils ont toutefois été



2. LA PLUPART DES ENFANTS apprennent qu'être honnête évite souvent (pas toujours) les bagarres. Ils grandissent ainsi avec un sens de la morale.

plus prompts à utiliser cet argument lorsqu'ils prétendaient eux-mêmes avoir travaillé plus que les autres. Quand ils ne pouvaient revendiquer un travail supérieur, ils abandonnaient la méritocratie pour l'égalité.

Les enfants ont pourtant rarement renoncé à l'équité. Même avec une conception variable de la justice, ils n'ont pas eu recours à des justifications égoïstes : «Je devrai en avoir plus parce que je suis grand» ou : «Les garçons aiment plus les bonbons que les filles, et je suis un garçon». De tels arguments ont généralement été ceux d'enfants qui avaient déclaré ne croire ni en l'égalité, ni en la méritocratie. Les enfants les plus âgés croyaient plus souvent en l'équité et se tenaient plus souvent à cette idée, même quand elle ne les avantagait pas : les idéaux ont une influence croissante sur la conduite des enfants à mesure qu'ils grandissent.

Faire et bien faire

Cependant, cette évolution n'est pas automatique : les idéaux doivent devenir un élément central de l'identité personnelle. Par exemple, lorsqu'une personne devient capable de vouloir être honnête (après avoir voulu que tout le monde soit honnête), la probabilité qu'elle soit

franche augmente. L'identité morale d'une personne correspond à son utilisation des principes moraux qu'elle invoque pour se définir. L'identité morale détermine non seulement la manière juste d'agir, mais aussi pourquoi agir ainsi. Cette distinction est indispensable à la compréhension de la diversité des comportements moraux. Les idéaux fondamentaux sont largement partagés, mais tous ne les appliquent pas.

La plupart des enfants et des adultes pensent qu'il est mauvais de faire souffrir autrui, mais quelques-uns seulement agissent, par exemple contre la discrimination ethnique au Kosovo en donnant de l'argent ou en prenant l'avion pour les Balkans. Leur inquiétude à propos de la souffrance humaine est centrale dans leur identité et dans les objectifs de leur vie : ils interviennent malgré les risques.

Chez des personnes avec une longue histoire publique de charité ou d'engagement pour les droits de l'homme, nous avons rencontré un haut niveau d'intégration entre l'identité personnelle et les soucis moraux : les individus qui se définissent par leurs objectifs moraux sont plus sensibles aux problèmes moraux dans les événements quotidiens, et ils se sentent plus impliqués dans ces problèmes. Cependant, ces personnalités

exemplaires ne font pas preuve d'un discernement particulier dans leur raisonnement moral : leurs idéaux et leur niveau dans l'échelle de Kohlberg sont identiques à ceux d'individus moins charitables.

La majorité des individus, bien qu'également consciente des problèmes moraux, les considèrent comme extérieurs à leur vie et à leur identité. Ils ne sont pas concernés par les catastrophes dans d'autres pays, tels le Kosovo ou le Rwanda, ni même par des injustices à leur porte. L'inaction n'interfère pas avec leur estime. Contrairement à une hypothèse répandue, leur connaissance morale n'est pas suffisante pour les pousser à l'action morale.

Le développement de l'identité morale prend généralement forme vers la fin de l'enfance, lorsque l'enfant

acquiert la capacité à analyser les personnes – et lui-même – en termes de traits de caractère stables. Pendant l'enfance, les caractères d'auto-identification sont généralement constitués de capacités et d'intérêts en relation avec les activités : «Je suis intelligent», «J'aime la musique». En grandissant, les enfants se définissent de plus en plus par des termes moraux, et ils invoquent souvent des adjectifs tels «équitable», «généreux» ou «honnête».

Certains adolescents se décrivent essentiellement en termes d'objectifs moraux. Selon eux, des buts nobles, tel que s'occuper des autres ou améliorer leur communauté, donnent du sens à leur vie. Daniel Hart et ses collègues de l'Université Rutgers ont montré qu'une forte proportion d'altruistes exemplaires, c'est-à-dire

des adolescents fortement engagés dans le bénévolat, ont une identité fondée sur des systèmes de croyance morale. Pourtant, leurs performances aux tests psychologiques de jugement moral ne sont pas supérieures à la moyenne. Notons que cette étude a été effectuée dans un environnement urbain économiquement défavorisé, chez une population d'adolescents souvent jugée à haut risque et encline à la criminalité.

Selon d'autres études, telle celle des psychologues Hazel Markus, de l'Université Stanford, et Daphné Oyserman, de l'Université du Michigan, l'identité morale est aussi impliquée dans des comportements antisociaux : les jeunes délinquants ont une évaluation d'eux-mêmes immature, particulièrement lorsqu'ils se projettent dans le futur. Ces jeunes ne s'imaginent pas dans des

Les valeurs morales sont-elles universelles?

L'importance des valeurs partagées pour le développement moral des enfants est au centre des débats actuels en philosophie et en sociologie. Ces valeurs varient-elles selon le lieu et l'époque? Ou bien existe-t-il des valeurs universelles qui guident le développement moral dans toutes les sociétés? Richard Shweder et ses collègues de l'Université de Chicago ont étudié des enfants hindous issus de milieux favorisés et des enfants américains.

Les enfants indiens apprennent, très jeunes, à maintenir la tradition, à respecter des règles définies de relations interpersonnelles et à aider les personnes dans le besoin. Pour eux, les manquements à la tradition, tels que manger du bœuf ou appeler son père par son prénom, sont particulièrement répréhensibles. Il leur semble normal qu'un homme fouette un fils dévoyé ou une épouse qui est allée au cinéma sans sa permission.

En revanche, les enfants américains sont orientés vers l'autonomie, la liberté et les droits individuels. Ils sont horrifiés par toute punition corporelle, mais indifférents à des infractions telles que la consommation d'un aliment interdit ou l'usage de mots incorrects.

Par ailleurs, les Indiens et les Américains se différencient de plus en plus à mesure qu'ils grandissent. Tandis que les enfants indiens limitent leurs jugements de valeur aux situations familiales, les adultes les généralisent à un large éventail de conditions sociales. Selon les enfants américains, les standards moraux doivent toujours s'appliquer à tout le monde, tandis que les adultes modifient leurs valeurs en fonction de la situation. Les Indiens naissent relativistes et grandissent universalistes, les Américains font l'inverse.

Les codes moraux des enfants de différentes cultures ont néanmoins des points communs. Les deux groupes d'enfants pensent que la tromperie ou les actes non charitables sont mauvais.



Ils ont également la même répugnance à l'égard du vol, du vandalisme, du mal fait à des victimes innocentes, avec toutefois quelques discordances sur la notion d'innocence. C'est dans le consensus que l'on peut trouver un sens moral universel qui refléterait des valeurs fondamentales communes, telles la bienveillance, l'équité, l'honnêteté, indispensables au maintien des relations humaines dans toutes les sociétés.

D'autres études, non confirmées et effectuées sans groupes témoins, ont indiqué des différences entre les sexes : les filles donneraient plus d'importance aux soins personnels, tandis que les garçons tendraient vers les règles et la justice. Cependant, les différences entre les idéaux masculins et féminins sont rarement détectées aussi bien chez les enfants que chez les adultes, quels que soient leur profession et leur milieu social. Il y a beaucoup plus de similarités entre les orientations morales masculines et féminines à l'intérieur de n'importe quelle culture qu'entre les orientations masculines ou féminines de cultures différentes.

Pour les différences de génération, des études montrent qu'aujourd'hui les jeunes ont une plus forte probabilité de s'engager dans des comportements antisociaux que ceux de la génération précédente. Selon une enquête de Thomas Achenbach et Catherine Howell, de l'Université du Vermont, les parents et les enseignants rapportent plus de problèmes comportementaux (mentir, tricher) et d'autres menaces à un développement sain (dépression, retrait sur soi) en 1989 qu'en 1976. Cependant, 13 ans ne représentent qu'une courte période (les chercheurs mettent à jour leur enquête) : les changements observés ne reflètent peut-être qu'un problème passager, par exemple une éducation trop permissive, plutôt qu'une tendance durable.

rôles sociaux nécessitant un engagement vers des valeurs positives, tel médecin, époux ou citoyen.

Bien éduquer ses enfants

Un jeune acquiert progressivement une identité morale à travers des milliers de petits événements, tels les commentaires des autres, l'observation de comportements qui l'inspirent ou le dégoûtent, la réflexion sur sa propre expérience, les influences familiales, scolaires ou des médias. L'importance relative de ces facteurs varie selon les enfants.

Pour la plupart des enfants, les parents sont les premiers guides. Des psychologues, telle Diana Baumrind de l'Université de Berkeley, ont montré qu'une éducation éclairée, donnant des références explicites, facilite le développement moral des enfants plus sûrement qu'une éducation permissive ou autoritaire. L'enfant semble avoir besoin de règles conséquentes et de limites rigoureuses, mais il a aussi besoin de discuter pour comprendre, et, lorsque c'est justifié, d'une révision des règles.

Or, les éducations permissives ne transmettent pas de règles, et l'autoritarisme applique des règles irrégulières, au bon vouloir des parents («C'est ainsi, parce que j'ai dit que c'était ainsi!»). Bien qu'apparemment opposées, ces deux éducations produisent chez les enfants des effets identiques : un manque de maîtrise de soi et une faible responsabilité sociale. Dans les deux cas, les enfants manquent du réalisme et des structures qui leur permettent d'élargir leur vision morale. Dans les deux cas, on encourage des habitudes (par exemple, la croyance que la morale est exclusivement imposée par la société) qui risquent de bloquer le développement de l'identité.

Plus les enfants grandissent, plus ils sont exposés aux influences extérieures à la famille. Cependant, dans la plupart des familles, la relation parents-enfant demeure essentielle aussi longtemps que l'enfant vit à la maison. Un commentaire parental sur des paroles de chanson obscènes ou sur un film violent restera longtemps dans la mémoire d'un enfant. Si les parents interviennent intelligemment alors que les enfants sont exposés à des films licencieux ou violents, le bien peut être supérieur au mal.

Les parents ont intérêt à encourager les bonnes relations des enfants avec leurs camarades, car ces interactions stimuleront le développement moral en confrontant leurs préjugés à la réalité sociale : lors de notre étude avec le partage du chocolat, certains enfants se sont fait de nouvelles idées, plus construites, sur la justice. Nous avons ensuite confirmé que les débats avaient augmenté le niveau de conscience du droit des autres. Les enfants qui ont le plus participé au débat, en exprimant leurs opinions et en écoutant le point de vue des autres, sont ceux qui ont le plus bénéficié de la situation.

Au cours de l'adolescence, les relations avec les jeunes du même âge sont également cruciales pour l'établissement de l'identité. Ce processus joue souvent un rôle important dans les comportements sociaux de bande : pour se définir, les enfants cherchent à former des groupes d'individus partageant des idées et rejettent ceux qui semblent différents. Contenu dans des limites raisonnables, le groupe évolue généralement vers une amitié plus mature. Cependant, quelquefois, des comportements violents apparaissent : les parents de ceux qui sont rejetés ont alors intérêt à expliquer à leurs enfants que les comportements violents sont plus révélateurs de l'identité morale de ceux qui s'en rendent coupables que de celle des victimes.

Certains psychologues ont évalué la cohérence des diverses influences morales, telles celles des parents, des enseignants, des médias... Francis Ianni, de l'Université Columbia, a remarqué un altruisme élevé et une faible sociabilité des jeunes dans des communautés où le sens moral est bien partagé (par exemple, les enseignants ne tolèrent pas la triche, les parents ne laissent pas le mensonge impuni, les entraîneurs n'encouragent pas les équipes à enfreindre les règles pour gagner, et les personnes de l'entourage attendent de la franchise).

Cependant, quand la communauté est divisée, lorsque les entraîneurs sont prêts à tout pour gagner ou que les parents protestent lorsqu'un enseignant punit leurs enfants en cas de fraude ou de travail bâclé, les enfants ne prennent pas les règles morales au sérieux.

F. Ianni a nommé charte de la jeunesse l'ensemble des valeurs partagées par des communautés harmonieuses,

L'élémentaire et le complexe



Mercredi 27 octobre 1999, de 9 à 18h
Collège de France, amphithéâtre Marguerite de Navarre
11, place Marcelin Berthelot, 75005 Paris

La physique a pour vocation de tendre vers l'universel. Ainsi en est-il de ses prédictions (ses lois) et des symétries qu'elle dévoile. Aller vers l'universel implique la recherche d'un dénominateur commun – les constituants élémentaires de la matière – et donc le réductionnisme. La physique cependant tente de plus en plus d'intégrer le singulier dans sa démarche à travers l'irruption du hasard, des symétries spontanément brisées, jusqu'à faire de ce hasard le fondement de l'émergence des structures et de la complexité.

Voici la troisième des rencontres consacrées à "l'universel et le singulier".

Ces rencontres visent à permettre aux physiciens de réfléchir à haute voix, de débattre entre eux et avec tous ceux (enseignants, chercheurs d'autres disciplines) qui peuvent s'intéresser à ce sujet. Chacun essayant de se mettre à la portée des autres, on peut espérer que cet échange puisse se poursuivre sur Internet après chacune des rencontres.

Programme

9h 00-9h 30	: Introduction
9h 30-10h 15	: Calcul infinitésimal et conceptualisation du mouvement (17/18 ^e siècles), par Michel Blay.
10h 15-11h 00	: Des infinis de la mécanique quantique relativiste au groupe de renormalisation, par Jean Zinn-Justin.
11h 00-11h 30	: Pause
11h 30-12h 15	: Comportement non linéaire des variations du système climatique dans le passé, par Jean-Claude Duplessy.
12h 15-13h 00	: De la formation des étoiles à l'évolution des galaxies, par Catherine Cesarsky
13h 00-14h 30	: Déjeuner
14h 30-15h 15	: Corrélations Einstein-Podolsky-Rosen et intrication quantique, par Alain Aspect
15h 15-16h 00	: De l'inanimé au vivant, par Pierre Tambourin
16h 15-17h 00	: Unité des représentations mentales et complexité neuronale en sciences cognitives, par Jean Petitot
17h 00-17h 45	: L'impact épistémologique de la complexité, par Maria Manuel Araújo Jorge
A partir de 17h 45: Débat, conclusion	

Renseignements :

Claudine Juillard, DSM/DAPNIA : CEA/Saclay – 91191 Gif-sur-Yvette Cedex. Tel : 01 69 08 22 60. Fax : 01 69 08 67 83
Emel : pif@dapnia.cea.fr
Catherine Prioul, IN2P3/CNRS : 3, rue Michel-Ange – 75016 Paris. Tel : 01 44 96 44 12. Fax : 01 44 96 50 04
Emel : prioul@admin.in2p3.fr

Inscriptions :

Libres, dans la limite des places disponibles, auprès de Claudine Juillard (Cf. ci-dessus) ou via le formulaire Web à l'adresse : <http://www.in2p3.fr/SFP/PIF/pif5.html>

Seules les personnes préalablement inscrites seront admises, dans la limite des places disponibles.

Comité d'organisation : Alain de Bellefon, Gilles Cohen-Tannoudji, Michel Crozon, Geneviève Edelhert, Yves Sacquin.

Avec le parrainage de
 POUR L'ÉTAT

SCIENCE



3. LES PARENTS peuvent éduquer leurs enfants par des expériences sociales, comme ici en emballant des repas pour une banque alimentaire.

quels que soient l'origine ethnique ou culturelle, le statut socio-économique, la localisation géographique et la taille de la population. Aujourd'hui, cette charte de la jeunesse est explorée dans les interventions sociales qui favorisent la communication entre enfants, parents, enseignants et autres adultes influents. Parallèlement, d'autres psychologues ont étudié l'influence de la culture, du sexe ou des générations précédentes sur les valeurs morales (voir l'encadré de la page 68).

Malheureusement, l'intervention des adultes est de moins en moins facile, et les sociétés occidentales s'écartent de la charte de la jeunesse. Les parents sont occupés et souvent déconnectés de la vie sociale de leurs enfants,

qui sont de plus en plus autonomes. Par ailleurs, les enseignants, qui risquent des blâmes ou des poursuites judiciaires, se détournent de la vie extra-scolaire des enfants. Les voisins partagent le même sentiment et ne se préoccupent pas des affaires d'une autre famille.

L'ensemble des travaux psychologiques indique que l'identité morale, et donc l'engagement moral durable, se nourrit des influences sociales qui guident un enfant. Le message doit être suffisamment répété pour que les enfants le fixent. Les sociétés polyculturelles doivent identifier une base suffisamment large pour transmettre les valeurs morales communes dont les jeunes ont besoin.

William Damon est directeur du Centre pour l'adolescence, à l'Université Stanford.

Jean PIAGET, *Le jugement moral chez l'enfant*, PUF, 1992.

Hans ZULLIGER, *La formation de la conscience morale chez l'enfant*, Éditions Salvator.

Raymond KOUDOU KESSIE, *Éducation et développement moral de l'enfant et de l'adolescent africains*, Éditions L'harmattan, 1996.

Lawrence KOHLBERG, *The Meaning and Measurement of Moral Development*, Clark University, Heinz Werner Institute, 1981.

The Emergence of Morality in Young Children, sous la direction de Jerome Kagan et Sharon Lamb, University of Chicago Press, 1987.

William DAMON, *The Moral Child : Nurturing Children's Natural Moral Growth*, Free Press, 1990.

Thomas M. ACHENBACH et Catherine T. HOWELL, *Are American Children's Problems Getting Worse? A 13-Year Comparison*, in *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, vol. 32, n° 6, pp. 1145-1154, novembre 1993.

Anne COLBY, *Some Do Care : Contemporary Lives of Moral Commitment*, Free Press, 1994.

Les jardins et les zoos dans l'Antiquité

KAREN POLINGER FOSTER

Il y a plus de 4 000 ans, les rois d'Égypte et de Mésopotamie commencèrent à collectionner des animaux exotiques et des plantes ornementales rares.

Les zoos et les parcs ont une longue histoire : ils sont apparus 700 ans seulement après les premières villes et après l'écriture, dont les plus anciennes traces, trouvées au Moyen-Orient, datent d'environ 5 000 ans. Les premiers parcs zoologiques et les premiers jardins botaniques furent créés par les puissants pharaons d'Égypte et par les empereurs de Mésopotamie.

Progressivement, les zoos s'enrichirent d'animaux de provenances lointaines : girafes, guépards et singes d'Afrique, phoques de la Méditerranée, ours et éléphants d'Asie... Dans ces parcs, on plantait des bosquets d'arbres rares ; on construisait des volières pour des oiseaux exotiques et des bassins pour des poissons exceptionnels.

Des œuvres picturales bien conservées, représentées ici, attestent l'existence de ces premiers zoos et jardins de l'Antiquité. Les peintures égyptiennes, les plus abondantes, proviennent de sites funéraires qui datent de -2500 à -1400. Le meilleur témoi-

gnage mésopotamien vient des restes d'un palais assyrien datant d'environ -880 à -627. En Égypte comme en Mésopotamie, de nombreux écrits (sur des tablettes d'argile, sur des papyrus, sur des murs de palais et de tombes) racontent comment les puissants ont créé des zoos et des jardins pour leur plaisir et leur prestige, et aussi pour satisfaire leur curiosité scientifique. Les souverains organisaient des expéditions pour chercher animaux, graines et plantes dans des pays lointains. Parfois, ils recevaient des animaux d'autres souverains ou des populations conquises. Fiers de leurs collections, ils prenaient soin de s'assurer que leurs animaux et leurs plantes se développaient bien et se reproduisaient. Ils employaient souvent une main-d'œuvre importante pour prendre soin des animaux fragiles et des plantes délicates ; des dispositifs novateurs d'arrosage ont été fabriqués pour ces occasions.

Les rois étaient fiers de leurs collections, comme en témoignent les textes et les bas-reliefs du complexe

1. CE JARDIN D'AGREMENT et son bassin ornaient la demeure d'un dirigeant égyptien, vers -1400. Cette peinture a été découverte dans une tombe aujourd'hui disparue, à Thèbes. Le bassin contenait des canards, des oies et des poissons nageant entre les lotus. Des papyrus, des pavots et d'autres plantes à fleurs bordaient le bassin. Deux variétés de sycamores, trois de palmiers et une vigne dense apportaient de l'ombre ; les mandragores étaient alors couvertes de fruits. La femme qui est présente dans un arbre (*en haut à droite*) et qui préside la table chargée de nourriture et de boissons est la déesse des sycamores. Selon les conventions artistiques égyptiennes, le peintre a combiné différentes perspectives pour transmettre le maximum d'informations. La vue de dessus donne une bonne image du plan du jardin et de la forme du bassin ; la vue latérale informe surtout sur les plantes et sur les animaux. Le bassin n'est entouré de végétation que sur trois côtés. Les artistes de cette époque peignaient souvent la rangée inférieure d'arbres à l'envers, mais cet artiste talentueux a préféré une orientation plus naturelle.







funéraire de l'impératrice Hatchepsout, à Thèbes. Vers -1460, Hatchepsout eut l'idée d'importer, de la corne de l'Afrique, de jeunes plants de balsamier, l'arbre dont on extrait la myrrhe, pour les replanter en Égypte. Auparavant, les Égyptiens devaient importer à grands frais la myrrhe, utilisée comme encens et pour la momification. Hatchepsout fit aussi rapporter des babouins pour la ménagerie impériale. D'autres textes mentionnent que le successeur d'Hatchepsout, Thoutmôsis III, était enchanté par son zoo, qui abritait notamment quatre oiseaux indiens, lesquels pondaient chaque jour.

Au IX^e siècle avant notre ère, le roi Assurnazirpal II d'Assyrie racontait avec fierté : «J'ai rassemblé des troupeaux qui se sont développés. J'ai rapporté des graines et des arbres de toutes les terres que j'ai traversées.» Un hymne du VI^e siècle avant notre ère, du Sud de la Mésopotamie, chante

les merveilles de la flore exotique qui «accroît la fierté de la ville».

Du VI^e au IV^e siècle avant notre ère, les Perses annexèrent l'Égypte et la Mésopotamie. Les souverains perses continuèrent à collectionner la faune et la flore étrangères, mais les plans des jardins évoluèrent. Les jardins perses, rectangulaires et entourés de hauts murs, étaient habituellement divisés en quatre parties égales, séparées par des canaux qui convergeaient vers un bassin central. Ces jardins raffinés étaient nommés *pairi-daeze* (c'est-à-dire «entouré de murs»), un terme que les Grecs traduiront par *paradeisos*. Au cours des siècles qui ont suivi, le «paradis» est devenu un concept essentiel de la pensée chrétienne et islamique. Les anciens jardins égyptiens et mésopotamiens sont devenus l'Éden de la Bible et du Coran, une image sur terre des splendeurs promises au Paradis.



Marianne Gauthier - Archives de la recherche

2. DES ANIMAUX EXOTIQUES paraden sur une peinture murale de la tombe du dignitaire Rekhmirê. Ce dignitaire, enterré à Thèbes, servit sous les empereurs égyptiens Thoutmôsis III et Amenothep II, à la fin du XV^e siècle avant notre ère. Au cours de leur règne, des expéditions militaires et commerciales régulières ont élargi la sphère d'influence de l'Égypte vers le Sud (en Nubie) et vers le Nord (en Syrie). Ces peintures représentent des animaux provenant des pays limitrophes. En haut, des Nubiens tiennent des chiens de chasse, du bétail à longues cornes et une jeune girafe avec un singe vert

agrippé à son cou. En bas, des Syriens arrivent avec un éléphant, un ours et des chevaux, ainsi qu'avec des lingots de cuivre, des défenses d'éléphant et divers récipients. La girafe est particulièrement réussie. Si l'on regarde attentivement, on observe que les taches de l'animal sont de petits ornements à quatre lobes (*voir le détail en haut*). En utilisant ce dessin géométrique, l'artiste transmettait un message politique : à l'image de cet étrange animal d'Afrique qui se conformait dès lors aux motifs égyptiens classiques, les Nubiens se soumettaient à la domination égyptienne.

A la cour du roi de Mésopotamie

Des singes tenus en laisse arrivent à la cour d'Assurnazirpal II, en Mésopotamie, avec d'autres animaux, notamment des éléphants, des ours, des cervidés rares et des « créatures marines » de la Méditerranée (probablement des dauphins et des phoques). En -879, le roi avait établi un nouveau palais et un centre administratif à Nimrud. Ce bas-relief a été retrouvé parmi les vestiges de la salle du trône. On y observe des personnages qui offrent des marchandises précieuses à la cour. Le texte cunéiforme qui court horizontalement est une inscription à la louange du roi. Ce site comportait des enclos pour les animaux, de vastes jardins et des espaces verts, mais on n'en a retrouvé aucune trace.

En ce qui concerne le style, les bas-reliefs d'Assurnazirpal témoignent d'une grande précision dans la composition et dans la juxtaposition des formes et des motifs. Le pelage tacheté des animaux contraste avec les franges striées des vêtements des personnages. La queue du singe inférieur effleure le pied de celui qui le mène, sans cacher le bout pointu de la chaussure. Ce singe se détache particulièrement bien, et son attitude lui confère une apparence humaine.



British Museum

Cette réception fut donnée par Assurbanipal, petit-fils de Sennachérib, qui régna jusqu'à -627. Assurbanipal conserva les créations de Sennachérib et leur ajouta ses propres jardins et zoos. Le bas-relief, de son palais Nord, à Ninive, représente Assurbanipal célébrant une victoire sur Élam, un royaume situé au Sud-Est. Assurbanipal, allongé sur un lit en marqueterie, un coude appuyé sur un coussin, lève sa coupe à la santé de son épouse. Les membres de la suite éventent le couple royal, apportent des rafraîchissements, et jouent de la harpe et d'autres instruments. L'ensemble de la

scène est bucolique, à l'exception d'un détail horrible : la tête du roi d'Élam pend, accrochée à un anneau sur une branche d'arbre (à gauche entre les deux palmiers). Son odeur expliquerait pourquoi Assurbanipal et la reine portent des bouquets de jasmin et pourquoi deux encensoirs brûlent à proximité. Assurbanipal ignorait alors que l'empire assyrien était menacé : en -612, ses ennemis orientaux, les Mèdes, saccagèrent sa capitale, mettant un terme à l'Empire. Les zoos et les jardins, fierté de générations de rois assyriens, tombèrent en ruine.



British Museum

Fragment d'un bas-relief

Ce fragment d'un bas-relief est la peinture la plus ancienne qui témoigne de l'intérêt des souverains du Moyen-Orient pour les animaux exotiques. On y voit des ours syriens, avec un collier et une laisse, qui furent pris par le pharaon Sahourê (qui a régné de -2447 à -2435) au cours d'une expédition le long de la côte Est de la Méditerranée. Ce fragment, provenant d'une pyramide royale, retrace un conte illustré qui ornait le temple mortuaire de Sahourê, la sépulture pharaonique célébrant le culte du souverain décédé. Les reliefs qui ornent le mur Nord montrent des voyageurs voguant vers le Levant ; sur le mur d'en face, les voyageurs accompagnés des ours rentrent de leur voyage. On ignore où les animaux furent ensuite conservés et si les ours étaient dressés. L'artiste avait certainement vu les ours de près, car leurs griffes, leur allure et leur expression sont très réalistes. Les voyageurs avaient également rapporté de grands récipients syriens à anse (*en bas à gauche*), remplis de produits du Levant, ainsi que des rondins de cèdre, très prisés en Égypte.



Ägyptisches Museum, Berlin. Photographie de Jürgen Lepoß



Maquette de jardin

Cette maquette de jardin a été retrouvée à Thèbes, dans la tombe d'un haut fonctionnaire égyptien, Mékétré, enterré vers -2100. Les sycomores (en bois et portant des feuilles) entourent un bassin rectangulaire tapissé de cuivre, qui devait autrefois être rempli d'eau. À l'arrière, une véranda est soutenue par des colonnes de bois peintes de motifs colorés inspirés des tiges de lotus et de papyrus. Trois petites gouttières dépassent du toit de la véranda. De telles maquettes ont été placées dans les tombes construites entre -2500 et -1900 environ ; elles révèlent des aspects variés de la vie quotidienne dans l'Égypte antique. Souvent, ces maquettes représentaient l'intérieur de divers bâtiments, tels des greniers et des abattoirs. D'autres maquettes représentaient, par exemple, des bateaux miniatures avec des voiles de tissu déployées et des filets pleins de tout petits poissons de bois. Le jardin de Mékétré ne contient aucun personnage, mais la plupart des maquettes renferment de nombreux personnages de bois occupés à leur tâche.



L'obélisque noir du palais de Salmanasar III, à Nimrud (voir la figure 3), relate, en 20 bas-reliefs et par des inscriptions à son sommet et à sa base, les nombreuses campagnes militaires du roi et les tributs reçus des différentes régions de son empire pendant son règne (–858 à –824). Sur une des faces, on observe des animaux rapportés au roi de l'Orient : deux «chameaux à deux dos», un éléphant d'Inde et deux singes. Sous le règne de Salmanasar III, le style des sculptures change : les



3. L'obélisque noir du palais de Salmanasar III.



4. Le zoo conçu par le roi Sennachérib.

détails sont bien plus nombreux que sous le règne d'Assurnazirpal II, où le style est plus figé.

On a retrouvé d'autres vestiges qui témoignent de l'attrait du roi assyrien Sennachérib pour ce qu'il appelait son «Palais sans rival», un zoo construit à Ninive vers –700. Sennachérib aimait créer des habitats naturels pour élever des animaux, tant étrangers qu'indigènes. D'après divers textes contemporains, «les plantations étaient très réussies ; les hérons qui venaient de très loin y nichaient, les cochons et divers animaux avaient de nombreux petits». Sur un des bas-reliefs (voir la figure 4), on observe une truie qui se promène avec ses jeunes. Au-dessus, presque caché par des roseaux entrelacés, un cerf se repose. Le roi surveillait avec la même attention ses jardins d'agrément. D'après une étude récente faite à l'Université d'Oxford, les légendaires jardins suspendus de Babylone ne seraient pas ceux de Nabuchodonosor, qui vécut au VI^e siècle avant notre ère, mais ceux de Sennachérib, situés plusieurs kilomètres au Nord.

Karen Polinger Foster étudie les langues et les civilisations du Moyen-Orient à l'Université Yale.

Julia S. BERRALL, *The Garden : An Illustrated History*, Viking Press, 1966.

Animals in Archaeology, sous la direction de A. Houghton Brodrick, Praeger, 1972.
John BAINES et Jaromir MÁLEK, *Atlas of Ancient Egypt*, Facts on File, 1980.

Michael ROAF, *Cultural Atlas of Mesopotamia and the Ancient Near East*, Facts on File, 1990.

Stephanie DALLEY, *Nineveh, Babylon and the Hanging Gardens : Cuneiform and Classical Sources Reconciled*, in *Iraq* (Journal of the British School of Archaeology in Iraq, Londres), vol. 56, pp. 45-58, 1994.

Patrick F. HOULIHAN, *The Animal World of the Pharaohs*, Thames and Hudson, 1996.

Vicki CROKE, *The Modern Ark : The Story of Zoos, Past, Present and Future*, Charles Scribner's Sons, 1997.

Le méthane dans les océans

ERWIN SUESS • GERHARD BOHRMANN • JENS GREINERT • ERWIN LAUSCH

Les hydrates de méthane présents dans les océans contiennent plus d'énergie que la totalité des réserves mondiales de combustibles fossiles. Toutefois, si le réchauffement global les décomposait, le méthane libéré aggraverait l'effet de serre.



1. LE NAVIRE DE RECHERCHE SONNE a remonté du plancher océanique de grandes quantités d'hydrate de méthane, une sorte de glace où le méthane est piégé. En fondant, les hydrates de méthane libèrent ce dernier, que l'on peut brûler (à droite).



Ce fut un moment fascinant lorsque l'énorme grappin télécommandé s'ouvrit et déversa son contenu sur le pont du bateau. Dans la boue sombre remontée du fond du Pacifique brillait et moussait une substance blanche qui ressemblait à de la neige effervescente. En la voyant fondre sous nos yeux, nous savions que notre mission était un succès.

C'était le 12 juillet 1996, et nous étions à bord du navire de recherche *Sonne*, qui effectuait sa 110^e croisière pour le Centre de recherche en géosciences marines de l'Université de Kiel. Depuis quelque temps, nous utilisions une caméra vidéo traînée par le navire pour explorer les fonds océaniques, à 100 kilomètres des côtes de l'Oregon. Soudain, à une profondeur de 785 mètres, nous avons vu plusieurs étranges taches claires (voir la figure 8) : s'agissait-il d'hydrate de méthane, une glace composée d'eau et de méthane? Stable aux fortes pressions qui règnent au fond de l'océan, la substance se décompose rapidement à l'air libre. Des études sismiques et des forages

C'était le 12 juillet 1996, et nous étions à bord du navire de recherche *Sonne*, qui effectuait sa 110^e croisière pour le Centre de recherche en géosciences marines de l'Université de Kiel. Depuis quelque temps, nous utilisions une caméra vidéo traînée par le navire pour explorer les fonds océaniques, à 100 kilomètres des côtes de l'Oregon. Soudain, à une profondeur de 785 mètres, nous avons vu plusieurs étranges taches claires (*voir la figure 8*) : s'agissait-il d'hydrate de méthane, une glace composée d'eau et de méthane ? Stable aux fortes pressions qui règnent au fond de l'océan, la substance se décompose rapidement à l'air libre. Des études sismiques et des forages

Nous avons récupéré 500 kilogrammes de blocs effervescents, que nous avons placés dans des conteneurs réfrigérés à l'azote liquide afin de les conserver. Il y en avait tant que nous avons utilisé quelques fragments afin de nous amuser avec : en approchant une flamme d'un des morceaux, nous avons obtenu la combustion du méthane, ce qui n'a laissé qu'une flaque d'eau.

Le succès de l'opération a deux causes : la commande du gros grappin, grâce à un système vidéo, nous a permis de creuser le fond juste au bon endroit, et sa remontée rapide, à partir d'une faible profondeur, a évité la décomposition du bloc prélevé. Une équipe de l'Université du Texas avait



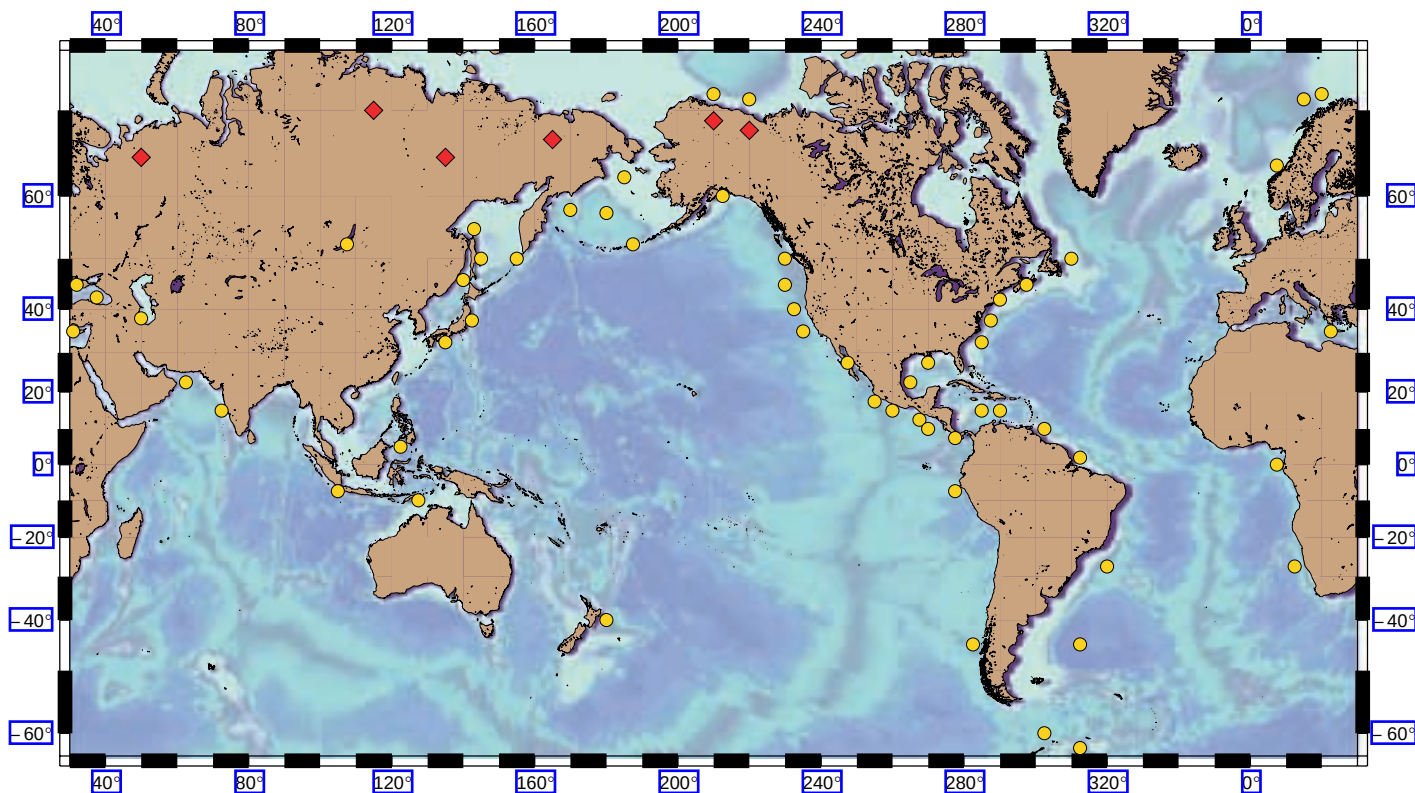
précédemment observé de l'hydrate de méthane dans le golfe du Mexique, mais elle n'en avait remonté que très peu. En d'autres occasions, des forages avaient également remonté quelques petits fragments.

Pourtant les hydrates de gaz ne sont pas rares : depuis quelques années, les océanographes en trouvent des

quantités considérables, dans le monde entier (voir la figure 2). Aujourd'hui, on estime que les hydrates de méthane présents au fond des océans contiennent, au total, deux fois plus de carbone que la totalité des gisements connus de gaz naturel, de pétrole et de charbon.

En 1997, Gerald Dickens et ses collègues de l'Université d'Ann Arbor ont

précisé les estimations en analysant des carottes prélevées dans le plancher océanique et placées dans des récipients sous pression : une zone de 26 000 kilomètres carrés, au large de la côte Sud-Est des États-Unis, contient 35 milliards de tonnes de carbone, soit 105 fois la consommation de gaz naturel des États-Unis en 1996.



2. RÉPARTITION DES GISEMENTS D'HYDRATE DE METHANE dans le monde. Ils sont généralement présents sur les talus et sur les

plateaux continentaux (points jaunes), et dans les régions où le sol est gelé en permanence (losanges rouges).



3. UN GRAPPIN TELECOMMANDE et équipé d'un système vidéo (à gauche) a remonté un échantillon de sédiment qu'il a prélevé dans un champ d'hydrate de méthane, au large de l'Oregon. Les morceaux (à droite) sont composés d'une alternance de couches



d'hydrate pur (blanc), de sédiments et de calcaire. En plus du méthane, l'hydrate remonté contenait du sulfure d'hydrogène, nauséabond et toxique, dont les océanographes ont dû se protéger à l'aide de masques.

Toutefois, ce trésor difficile à récupérer est aussi un danger pour l'environnement : si une infime partie seulement de ces hydrates se décomposait, elle libérerait des quantités considérables de méthane, qui exerceraient un effet de serre 30 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère. Bien que le méthane subsiste peu de temps dans l'atmosphère (dix ans en moyenne), son oxydation libère du dioxyde de carbone. La décomposition des hydrates de gaz dans les fonds océaniques présente également un autre risque : elle peut provoquer des glissements de sédiments sur les talus continentaux (un tel phénomène semble s'être produit il y a environ 8 000 ans au large des côtes norvégiennes).

Des cages à gaz

Les hydrates de gaz sont connus depuis 1811 : le physico-chimiste britannique Humphry Davy décrit un hydrate composé d'eau et de chlore. Toutefois ces corps restèrent longtemps incompris : quelle était leur composition ? Et leur structure physique ? Depuis le milieu du XX^e siècle, on sait que les molécules de gaz sont piégées dans la glace, comme si elles étaient emprisonnées dans de minuscules cages (voir la figure 5) : les composés-cages sont nommés clathrates (du latin *clatratus*, «encapsulé»).

Le réseau cristallin des hydrates est généralement cubique, mais sa structure exacte dépend du type de molécules piégées : l'un des réseaux, à petites cavités, piège les petites molécules telles que le méthane (CH_4), le dioxyde de carbone (CO_2) ou le sulfure d'hydrogène (H_2S) ; l'autre réseau, à cavités plus grosses, peut emprisonner des hydrocarbures variés.

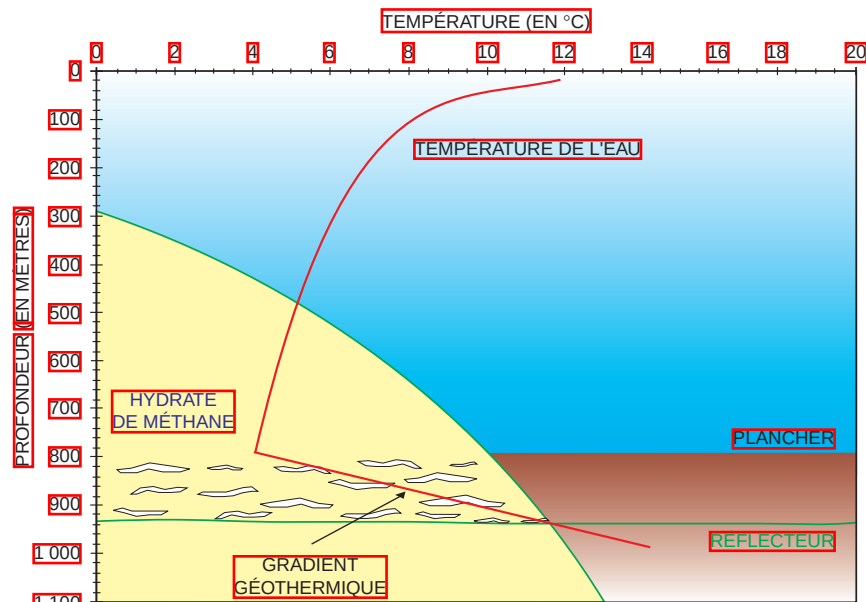
Ces cages cristallines peuvent stocker des quantités étonnantes de gaz : la fonte de un centimètre cube d'hydrate de méthane libère jusqu'à 164 centimètres cubes de méthane. En outre, les diverses cages d'un hydrate peuvent contenir des molécules différentes : l'hydrate que nous avons récupéré en 1996 contenait un à deux pour cent de sulfure d'hydrogène, composé toxique et nauséabond qui nous força à porter des masques de protection (voir la figure 3).

Les géologues ne s'intéressèrent aux hydrates de gaz que dans les années 1930, quand ils apprirent que ces substances gênaient le transport du gaz dans les gazoducs. Puis, dans les années 1960,

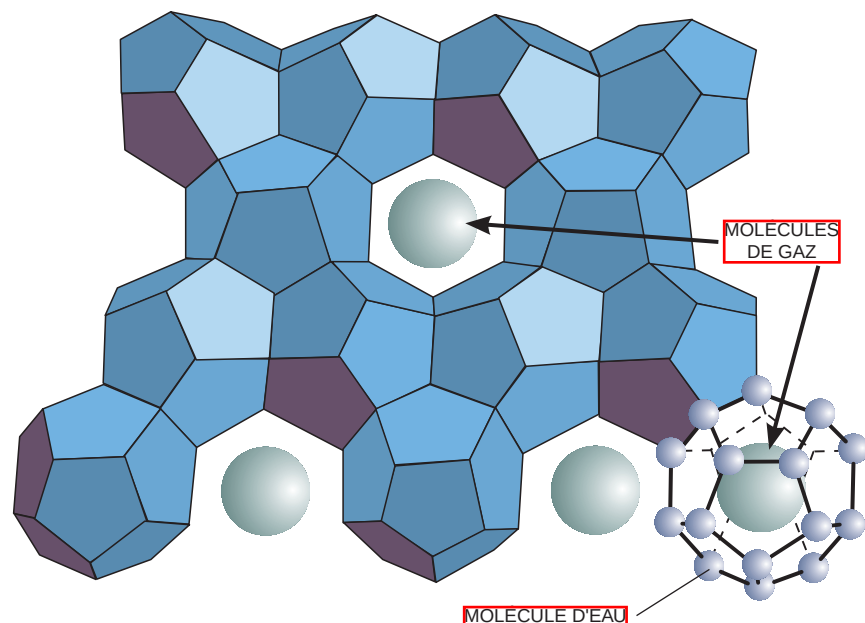
on découvrit les premiers gisements naturels d'hydrates de gaz dans les sols gelés de Sibérie et d'Amérique du Nord. Vers 1970, les géophysiciens américains George Bryan et John Ewing commencèrent à supposer que les fonds océaniques renfermaient également de l'hydrate de méthane : au cours d'études sismologiques de la rive Blake, ils observèrent un réflecteur d'ondes sismiques inhabituel. Situé à quelque 600 mètres

sous le fond océanique, ce réflecteur avait une forme identique à celle du contour de la ride. Ils en conclurent que les réflexions étaient dues à l'interface d'une couche d'hydrate de méthane et d'une couche de gaz libre, en dessous.

Les océanographes ont ensuite retrouvé ce type de réflecteur dans les bassins océaniques du monde entier : les forages ont confirmé que le réflecteur est particulièrement net



4. LE DOMAINE DE STABILITÉ de l'hydrate de méthane sous sa forme naturelle, c'est-à-dire associé à du sulfure d'hydrogène (2,6 pour cent), est représenté en jaune sur ce diagramme de phase. La limite inférieure de la couche d'hydrate, dans le plancher océanique, est située au point où le gradient géothermique (qui indique l'augmentation de la température en fonction de la profondeur) atteint le bord de la zone. Cette limite inférieure apparaît, dans les études sismiques, par un réflecteur qui ressemble à celui du fond.



5. DES MOLECULES D'EAU forment des cages dodécaédriques (en bas à droite) dans les hydrates de gaz. Ces cages piègent des molécules de gaz variés, tels le méthane ou le sulfure d'hydrogène.

quand du méthane gazeux s'accumule sous une couche de sédiments que l'hydrate a cimentée. Cependant, les navires de forage recueillaient rarement l'hydrate dans les échantillons prélevés ; on n'observait sa présence qu'indirectement, par une concentration élevée en méthane gazeux et par une diminution de la concentration en ions chlorure dans l'eau interstitielle.

Pour que de l'hydrate de méthane se forme dans l'océan, quatre conditions doivent être réunies : du méthane doit être présent (il est généralement formé par décomposition de matière organique) ; la concentration en gaz doit être supérieure à la concentration maximale du gaz dissous ; la température doit être très peu inférieure à la température de congélation ; et la pression doit être de l'ordre de celle qui s'exerce à 500 mètres de profondeur.

Ces quatre conditions sont souvent réunies sur les talus continentaux, où le fond océanique plonge d'un plateau peu profond vers une plaine abyssale. Dans la plupart des bassins océaniques, ces talus portent une couche d'hydrate de méthane, qui s'enfonce, sous le fond de l'océan, jusqu'à plusieurs centaines de mètres dans le sédiment. À sa base, cette couche est fondue par la chaleur provenant de l'intérieur du Globe, et le méthane gazeux s'accumule. Quand des sédiments se déposent, la position de la poche d'hydrate de méthane migre, parce que les parties inférieures fondent ; la couche d'hydrate monte à travers les couches de sédiments nouvellement déposés, laissant des traces de son passage.

Loin des talus continentaux, on trouve rarement de l'hydrate de méthane, parce que la matière organique qui engendrerait du méthane s'y dépose peu. De même, on trouve peu d'hydrates sur les plateaux continentaux, parce que la profondeur est faible : la pression est insuffisante et la température excessive. On connaît des exceptions : des hydrates de gaz sont présents dans des eaux peu profondes des régions polaires, parce que la pression relativement

faible est compensée par des températures très basses, et dans quelques mers très profondes où se déposent en abondance des sédiments riches en matière organique.

Les océanographes cherchent de l'hydrate de méthane dans toutes ces régions océaniques. La zone de subduction Cascadia, au large de l'Oregon, semble être un site particulièrement propice : par endroits, le plancher océanique y est pavé d'hydrates. Ces zones, qui mesurent parfois plusieurs centaines de mètres carrés, sont souvent tapissées d'épaisses couches de dépôts bactériens. Le long de cette marge continentale, la plaque Juan de Fuca, dont la surface forme une petite partie du plancher océanique du Pacifique du Nord-Est, glisse sous la plaque Nord-américaine à une vitesse de 4,5 centimètres par an. Lors de cette subduction, les sédiments que porte la plaque qui s'enfonce sont raclés par la plaque supérieure et plissés ou empilés en plu-

sieurs couches, telles des écailles géantes. Les matériaux déformés forment un prisme d'accrétion qui s'entasse contre la plaque Nord-américaine. Dans la région étudiée, plusieurs rides ont été formées, presque parallèlement à la côte.

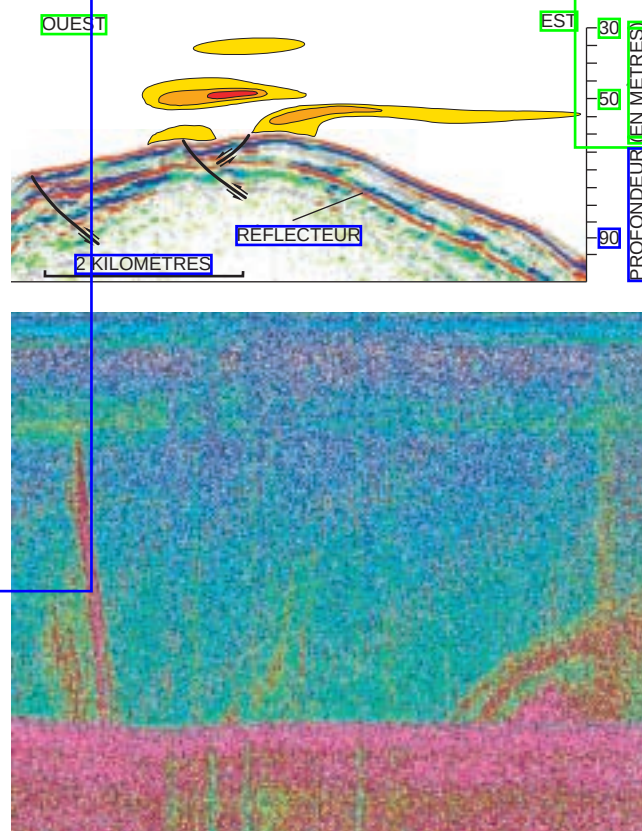
La zone de subduction Cascadia est l'une des régions où les géologues étudient les marges continentales actives : la subduction provoque des séismes, un volcanisme actif et la formation de chaînes de montagnes. L'étude des hydrates de gaz a éclairé la compréhension des rides d'accrétion, au point que les États-Unis ont renommé la ride d'accrétion numéro 2 : depuis janvier 1988, c'est la ride des hydrates.

Au cours de la subduction, la pression comprime les sédiments et en exprime l'eau et les gaz. Ces derniers sont expulsés du plancher océanique par des sources froides. En 1984, l'un de nous (E. Suess) découvrit ces sources sous-marines froides dans la zone de subduction Cascadia, à l'aide du submersible américain *Alvin* de l'Institut océanographique de Woods Hole. On considère aujourd'hui que ces sources sont caractéristiques des zones de subduction.

Les sources froides et leurs occupants

Les analyses chimiques de ces sources ont montré qu'elles ne libèrent pas simplement de l'eau interstitielle, directement issue du sédiment : la concentration en sel est trop faible. On suppose donc que de l'eau provenant de la fonte d'hydrates (les hydrates sont composés d'eau douce) s'est mélangée à l'eau interstitielle.

D'où vient cette eau ? La pression permanente de la plaque qui s'enfonce plisse les couches sédimentaires. Le long des limites de plis, qui s'ouvrent à travers les strates du sédiment rempli d'hydrates de gaz, les fluides et les gaz remontent des profondeurs, chauffant les couches solides et déstabilisant les hydrates. Ainsi du sulfure d'hydrogène et de l'ammoniac sont libérés en même temps que le méthane.



6. ON A DETECTÉ des panaches de méthane dans l'eau de mer au-dessus de failles (lignes noires avec flèches dans le schéma supérieur). Dans le profil sismique du plancher océanique, la limite inférieure de la couche d'hydrates de gaz est clairement visible sous forme d'un réflecteur. Les zones jaunes, orange et rouges, dans l'image supérieure, indiquent des concentrations respectivement égales à 5, 10 et 50 nanolitres par litre. Un sonar utilisé pour la détection des bancs de poissons a identifié des panaches de méthane qui s'élevaient du plancher océanique dans la mer d'Okhotsk (en bas).



7. LA STRUCTURE VESICULAIRE des hydrates de gaz prélevés au large de l'Oregon, en 1996, donne des indices sur leur formation. L'échantillon de gauche s'est formé quelques mètres au-dessous du plancher océanique. À cet endroit, du méthane s'échappant sous forme gazeuse a été piégé dans des couches de sédiments plus denses. Au cours du processus, le méthane a réagi avec l'eau pour former de l'hydrate de méthane dans les interstices des sédiments. Les «lentilles» d'hydrate sont clairement visibles dans la coupe polie d'environ deux millimètres d'épaisseur représentée ci-dessus.

L'oxydation des composés libérés sous forme du dioxyde de carbone, des sulfates et des nitrates, qui nourrissent une abondante communauté de bactéries. Ces micro-organismes produisent à leur tour des nutriments essentiels pour des coquillages et pour des vers avec lesquels ils vivent en symbiose. Les bactéries occupent des tissus spéciaux des branchies des coquillages ou le trophosome (une adaptation de l'intestin) des vers. Elles bénéficient de l'oxygène que brassent les coquillages et les vers. Des colonies de cette faune particulière sont l'une des caractéristiques des sources froides, qui sont des oasis de vie dans le fond océanique.

Certains vers vivent même directement dans l'hydrate de méthane. À une profondeur de 700 mètres, dans le golfe du Mexique, on a observé des vers roses de deux à cinq centimètres de long qui avaient creusé leurs terriers, serrés les uns contre les autres, en fondant l'hydrate (voir la figure 9). Cette espèce jusqu'alors inconnue, *Hesiocaeca methanolica*, coopère également avec des bactéries pour profiter de la présence de méthane.

Nos études de sources froides ont également montré que les gaz libérés en ces endroits modifient activement les fonds. Quand l'hydrate de méthane devient instable, l'oxydation du méthane libéré, en formant du dioxyde de carbone, provoque la formation de bicarbonate de sodium, qui se combine aux ions calcium présents dans l'eau de mer pour former du calcaire.

Ce dernier est alors sous une forme solide, stable, tandis que les sédiments sont entraînés par l'érosion, qui dénuie d'immenses blocs. Le long de la dorsale des hydrates, le calcaire forme ainsi une croûte et des concrétions, il tapisse les sources et compose le corps des cheminées. On trouve des exemples de ce phénomène sur des centaines de mètres carrés.

Les structures calcaires qui indiquent la présence antérieure d'une couche d'hydrate peuvent également constituer des structures fossiles dans d'anciennes strates géologiques. On les nommait des biothermes, en reprenant le nom qui est utilisé pour décrire des structures créées par les coraux, les éponges ou certaines algues. Toutefois, bien qu'il y ait également des coquillages dans le calcaire formé à partir des hydrates, ce dernier est essentiellement d'origine inorganique : on a récemment proposé de les nommer plutôt des chimiothermes.

L'instabilité des fonds océaniques

Malgré l'activité des organismes vivants dans les sources froides et malgré la formation de calcaire, des quantités notables de méthane s'échappent dans l'océan : dans les panaches de gaz que nous avons analysés, nous avons trouvé jusqu'à 74 microlitres de méthane par litre d'eau de mer (1 300 fois la concentration normale).

Le méthane des hydrates constitue une gigantesque source de carbone et d'énergie, dans un environnement unique. On ignore encore combien de méthane est oxydé dans l'eau et combien de méthane est libéré, mais on sait qu'une forte remontée tectonique pourrait libérer des quantités considérables de ce gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Notre abondante récolte d'hydrate de méthane, en 1996, a procuré des échantillons en nombre suffisant pour des analyses détaillées. Une première étude des blocs d'hydrate, à bord du navire *Sonne*, avait révélé que la structure différait notablement de celle d'échantillons qui avaient été récupérés au cours de forages, à des profondeurs supérieures. Dans ce dernier cas, l'hydrate remplit les interstices entre les grains de sable et les particules d'argile et les ciments. En revanche, près de la surface du plancher océanique, des couches d'hydrate de plusieurs millimètres ou centimètres d'épaisseur courent quasi parallèlement aux strates, les coupant parfois, ou formant des veines dans le sédiment.

Puis, de retour de mission, les chimistes de l'Institut Alfred Wegener de Bremerhaven ont réalisé des coupes minces, en travaillant à la température de -23 °C : ils y ont trouvé des bulles de diamètre atteignant un centimètre (voir la figure 7). Peter Brewer et ses collègues de l'Aquarium de Moss Landing ont récemment réalisé une synthèse

expérimentale d'hydrate de méthane dans les conditions naturelles. À une profondeur de 910 mètres, dans l'océan, ils ont fait passer du méthane gazeux à travers des couches de sable plongées dans l'eau : en quelques minutes, parfois en quelques secondes, ils ont obtenu des hydrates dont la texture ressemblait à celle du matériau naturel que nous avions prélevé.

L'hydrate prélevé au large de l'Oregon contient non seulement du méthane, mais également de 1,5 à 3 pour cent de

sulfure d'hydrogène, et des traces d'éthane, de propane et de dioxyde de carbone. Les analyses chimiques et la détermination des divers isotopes du carbone (le noyau de ces atomes contient toujours six protons, mais le nombre de neutrons varie selon les isotopes) ont confirmé que le méthane se forme par décomposition microbienne de matière organique dans le sédiment.

Contrairement au Pacifique, qui est entouré de nombreuses zones de subduction, l'Atlantique est ceint de

marges continentales passives, éloignées de toute limite de plaque. Malgré leur faible activité tectonique, ces talus sont pourtant dynamiques : les sédiments apportés du continent déstabilisent parfois les pentes et provoquent des glissements de terrains sous-marins ou d'importants effondrements. L'un des glissements les plus spectaculaires a eu lieu au large de la côte norvégienne, à la latitude de Trondheim, il y a quelque 8 000 ans : 5 600 mètres cubes de sédiments ont glissé sur une

La Méditerranée et le golfe de Guinée

Longtemps ignorée, la présence massive d'hydrates de gaz dans certaines régions sous-marines du Globe a des conséquences importantes, tant pour la compréhension de la Terre que pour l'industrie. L'*Ifremer* et, plus généralement, l'océanographie française possèdent des compétences de tout premier plan dans les domaines de l'imagerie acoustique des grands fonds marins et de l'observation directe des fonds au moyen des submersibles. Aussi, la contribution française à l'effort de recherche international sur les hydrates s'est tout naturellement développée autour de la mise en œuvre de ces moyens d'exploration.

Alors que les hydrates ont été principalement découverts dans les eaux les plus froides, des équipes françaises et hollandaises ont observé des accumulations d'hydrates de gaz dans les bassins méditerranéens : plusieurs équipes scientifiques, sous l'impulsion de l'*Ifremer* (Institut français de recherches pour l'exploitation de la mer) et de l'institution correspondante aux Pays-Bas, ont entrepris, ensemble, l'exploration des volcans de boue du fond de la Méditerranée. Particulièrement nombreux au Sud de la Crète, ces volcans de boue sont des cônes d'éjection de sédiments fluidisés, observés en fond de mer. Ces sédiments pourraient provenir de plusieurs kilomètres sous le fond de la mer, où des conditions de surpression des fluides interstitiels prévalent.

Les scientifiques français et hollandais qui ont utilisé le sous-marin *Nautilus* de l'*Ifremer*, lors de la mission MEDINAUT, réalisée en novembre 1998, ont observé de nombreux suintements de fluides froids et une intense activité biologique à la surface des volcans de boue, au Sud de la Crète et de la Turquie, ainsi que de fortes concentrations en méthane dans l'eau de mer à leur voisinage. Ils ont relié ces observations à la présence d'accumulations d'hydrates de gaz au sein des volcans de boue. La prochaine étape sera de mieux évaluer l'importance de ces accumulations.

Les hydrates de gaz déterminent les propriétés physiques des sédiments qui les renferment : réduisant la perméabilité des sédiments, ils facilitent le piégeage des hydrocarbures dans les niveaux sédimentaires sous-jacents (en particulier des gaz) ; d'autre part, une possible fragi-

lisation mécanique des terrains induit des risques de glissement sous-marin. Dans les provinces pétrolières où l'exploration se situe par des profondeurs d'eau supérieures à 500 mètres (golfe de Guinée, golfe du Mexique, Brésil, mer du Nord), les hydrates de gaz constituent donc un facteur de risque industriel important.

C'est pourquoi, il n'est pas étonnant que les hydrates de gaz constituent un des quatre thèmes de recherche du programme scientifique de recherche *ZaiAngo*, commencé en 1998 par *Ifremer* et par *Elf-ep* sur la marge Gabon-Congo-Angola. Ce programme est fondé sur plusieurs campagnes océanographiques, de 1998 à 2001. L'étude des hydrates de gaz et, plus largement, de la circulation des fluides dans cette zone comporte quatre volets : la reconnaissance acoustique des zones actives, l'étude sismique détaillée des formations à hydrates, l'étude du champ de températures à l'interface eau-sédiment, l'étude des échanges à l'interface eau-sédiment et dans la colonne d'eau. En décembre 1999, à l'aide du système sismique remorqué près du fond *Pasisar* et à l'aide d'un réseau de capteurs, posé sur le fond, on déterminera les propriétés mécaniques du milieu, ainsi que les quantités de gaz libre et d'hydrates présents. Pour connaître la stabilité des hydrates à court terme, on mesurera la température au fond et dans le sous-sol. Deux sondes resteront plantées dans le fond pendant près d'une année, afin d'enregistrer d'éventuelles modifications du champ de températures au cours des saisons. Pour mieux comprendre la genèse des hydrates de gaz et leur évolution, les échanges à l'interface eau-sédiment et dans la colonne d'eau seront analysés fin 2000, dans le cadre d'un programme d'observation du fond conduit avec l'engin de reconnaissance d'*Ifremer* : le ROV *Victor 6000*.

Si une multitude de questions subsistent aussi bien sur le plan géologique, biologique, physique ou chimique concernant les hydrates de gaz, les efforts de recherche importants qui sont entrepris par les différents pays devraient donner des résultats dans les années à venir et démontrer toute l'importance de ce phénomène sur l'évolution des marges et du système Terre en général.

Bruno SAVOYE et Jean-Paul FOUCHER
Ifremer Brest



8. LES HYDRATES DE GAZ apparaissent sous la forme de zones blanches sur les images du plancher océanique qui ont été filmées par un traîneau équipé d'une caméra vidéo au large de l'Oregon (l'objet suspendu au bout de la corde est un lest). Des bivalves ont colonisé les zones extérieures aux champs d'hydrates.

distance de 800 kilomètres, du bord supérieur du talus continental jusqu'au bassin norvégien.

Ce glissement, qui a dû provoquer des raz de marée dévastateurs, a probablement été déclenché par des hydrates de gaz accumulés à des profondeurs comprises entre 400 et 1 500 mètres. L'instabilité des hydrates semble avoir été déclenchée par le réchauffement correspondant à la dernière glaciation. Un phénomène de ce genre peut-il se reproduire ? Le problème de la stabilité du talus continental se pose aujourd'hui, en raison du réchauffement du climat terrestre. Un réchauffement de l'atmosphère inférieure de seulement un ou deux degrés risque de perturber l'hydrate de méthane qui cimente aujourd'hui les particules des sédiments.

Au Sud de la Norvège, le risque de nouveaux glissements paraît faible, car les champs d'hydrate se sont déjà largement décomposés. En revanche, au Nord du glissement Storrega, on a détecté des structures qui pourraient glisser, ainsi que des champs d'hydrates en mouvement. Au cours de l'été 1998, des océanographes les ont explorés à l'aide de deux submersibles, *Mir I* et *Mir II*, du navire de recherche *Mstislav Keldysh* de l'Institut russe d'océanologie de Moscou.

Au cours de l'expédition, les océanographes ont également étudié le volcan de boue situé plus au Nord et qui pourrait être alimenté par la décomposition d'hydrates. Large de trois kilomètres et haute de 20 mètres, cette structure, aujourd'hui inactive, fut

découverte en 1995, au cours d'une étude des fonds marins par sonar. Elle est à une profondeur de 1 250 mètres, près du site d'un ancien glissement ; des traces d'émission de méthane ont été trouvées parmi des tapis de bactéries ; une faune caractéristique des sources froides est présente, mais il n'y a pas encore de preuve que les hydrates sont la cause de l'éjection de la boue.

Enfin, J. Mienert et son collègue Jörg Posewang ont récemment analysé les résultats d'études sismiques et les mesures de vitesse des ondes de compression dans les sédiments renfermant des hydrates de gaz. Apparemment, la partie qui surmonte le réflecteur n'est pas composée d'une couche continue d'hydrate. Notamment, ils ont mis en évidence deux couches de sédiments cimentées par de l'hydrate de gaz, superposées comme deux étages d'un immeuble. La couche intermédiaire contient du gaz libre dans les espaces interstitiels des sédiments. Les deux couches d'hydrate, épaisses chacune de 60 mètres, sont interrompues par des zones verticales où le gaz remonte vers le plancher océanique, d'où une présence de gaz libre à l'intérieur d'une zone censée contenir de l'hydrate stable. Le plancher océanique glacé semble ainsi étonnamment dynamique.

Les hydrates de gaz sont instables dans d'autres régions. Par exemple, on a observé des champs d'hydrates analogues dans la mer de Barents, un vaste plateau continental au Nord du cercle polaire, dans le golfe du Mexique ou dans la région de la ride Blake. William

Comment optimiser la fabrication de vos produits émulsionnés ?

Séminaire à Paris, les mercredi 24 et jeudi 25 novembre 1999

Du laboratoire à la production, la méthodologie pour améliorer la qualité de vos produits

- ▼ Quelles sont les notions essentielles
pour comprendre les émulsions ?
- ▼ La formulation, la stabilité du mélange, ...
- ▼ Quelles sont les différentes
technologies utilisées à connaître ?
- ▼ Quels sont les éléments à maîtriser
pour optimiser le transfert d'échelle
du laboratoire au centre de production ?
- ▼ Comment rédiger son cahier des charges
pour retenir le meilleur équipement ?
- ▼ Quels sont les enseignements à retenir
de différents secteurs industriels :
le médical, l'alimentaire, la pharmacie,
la cosmétique, ... ?

Pour plus de renseignements :

M/Mme, Prénom, Nom	-----
Fonction	----- Service
Société	-----
Tél. direct	----- Fax direct
E-mail	-----
Adresse	-----
Code postal, ville	-----

☐ Je souhaite recevoir le programme de ce séminaire de formation.

La demande est à adresser à Euroforum, 35 rue Greneta,
75002 PARIS, ou par fax au 01 44 88 14 99,
ou par E-mail : fma@euroforum.fr

Dillon, de l'Observatoire géologique de Woods Hole, a repéré des failles, des effondrements et des affaissements au large des côtes Sud-Est des États-Unis, liés à la décomposition de l'hydrate et à la libération de méthane, tandis qu'un projet de recherche germano-russe (Komex) explore la mer d'Okhotsk.

Cette mer marginale, presque aussi grande que la mer du Nord et la mer Baltique réunies, est délimitée par la péninsule du Kamtchatka et l'arc insulaire des Kouriles. On connaît mal son origine et sa structure géologique. Comme ses eaux abritent d'énormes masses de plancton, elle joue un rôle clé dans le cycle global du carbone. D'autre part, avec des températures de surface de -2 °C, elle est l'une des rares régions où l'eau de surface chargée d'oxygène s'enfonce vers les abysses pour se répandre ensuite vers le Sud et vers l'Est, assurant la ventilation de grandes parties du Pacifique Nord : la mer d'Okhotsk est considérée comme le « poumon septentrional » de l'océan Pacifique.

Les panaches de méthane

Les expéditions Komex ont découvert des hydrates de méthane à l'Est de l'île Sakhaline et à l'Ouest de la chaîne des îles Kouriles. Notre traîneau équipé d'une caméra vidéo a montré des sources froides et leurs communautés caractéristiques. À l'aide d'un sonar de recherche de bancs de poissons, nous avons identifié des panaches de méthane, tandis que des analyses de l'eau montraient une sursaturation de l'eau en gaz d'un facteur 10 000. Au Nord-Est de l'île Sakhaline, par des profondeurs de 1 700 mètres environ, le traîneau vidéo a montré un paysage étrange, avec des cheminées de barytine (sulfate de baryum) de dix mètres de haut, qui caractérisent des sources froides.

La mer d'Okhotsk est couverte de glace jusqu'au 45° parallèle environ (la latitude de Bordeaux), pendant sept mois par an. D'énormes quantités de méthane qui sont libérées des hydrates et des sources froides s'accumulent sous cette couverture de glace. Durant les premières expéditions Komex, au cours de l'hiver 1991, on a mesuré une concentration de 6,5 millilitres de méthane par litre d'eau sous la couche de glace. Pendant l'été suivant, lorsque la mer fut libérée des glaces, la concentration en méthane avait chuté à 0,13 millilitre par litre : le méthane piégé

par les glaces d'hiver avait été libéré dans l'atmosphère. Bien qu'isolée, cette mesure montre que la mer d'Okhotsk est une importante source de méthane atmosphérique. Ces mesures pourraient également expliquer les fluctuations saisonnières de la concentration en méthane atmosphérique enregistrées par la station de mesure de l'île Shemya, à l'extrémité Sud-Ouest des îles Aléoutiennes.

Les climatologues admettent aujourd'hui que le méthane libéré à partir des hydrates a eu, dans le passé, de profonds effets sur le climat global. À la fin du Paléocène (il y a environ 55 millions d'années), par exemple, les températures de la terre et de l'océan semblent avoir augmenté brusquement : de nombreuses espèces de foraminifères se sont éteintes, ainsi que d'autres organismes unicellulaires qui vivaient à la surface de l'océan et dans les eaux profondes. L'abondance de l'isotope léger du carbone (le carbone 12) a augmenté dans les coquilles et dans la matière organique de l'époque : manifestement, de grandes quantités de carbone sont apparues dans la biosphère. Cette dernière observation explique l'augmentation de température : les bactéries qui décomposent la matière organique enrichissent le méthane en carbone 12. De ce fait, elles enrichissent aussi les hydrates, de sorte que si ces derniers se décomposent, on retrouve un excès de carbone 12 dans le dioxyde de carbone. La décomposition des hydrates pourrait avoir résulté d'une modification de la circulation océanique, telle qu'il semble y en avoir eu à cette époque.

Gerald Dickens et ses collègues, à Woods Hole, ont utilisé un modèle informatique pour tester cette hypothèse. Ils ont supposé qu'une quantité d'hydrate correspondant à environ huit pour cent des réserves mondiales actuelles s'est décomposée, que le méthane libéré a aussitôt (à l'échelle des temps géologiques) été transformé en dioxyde de carbone. Sur un intervalle simulé de 10 000 ans, ils ont ajouté chaque année à leur atmosphère modélisée 160 kilomètres cubes de dioxyde de carbone renfermant du carbone 12. Les calculs montrent que l'ajout de dioxyde de carbone a provoqué un réchauffement de l'atmosphère inférieure de deux degrés ; simultanément, l'abondance des divers isotopes du carbone s'est établie aux valeurs observées dans les fossiles. Puis, comme



9. DES EXPLORATIONS effectuées à l'aide d'un sous-marin ont montré des vers de couleur rose, mesurant deux à cinq centimètres de long, qui avaient établi leurs galeries dans des hydrates de gaz qu'ils avaient fondus (en bas). Une espèce inconnue jusqu'ici, *Hesioeca methanolica* (en haut) vit en symbiose avec des bactéries qui se nourrissent du méthane de l'hydrate.

pour les données réelles, cette abondance s'est progressivement normalisée en l'espace de 200 000 ans.

Malgré les risques, les réserves estimées d'hydrate de méthane sont si considérables que de nombreuses sociétés pétrolières s'y intéressent. Des équipes de recherche, notamment en France et au Japon, prévoient leur récupération et leur utilisation, mais l'exploitation de cette prodigieuse source d'énergie à des coûts raisonnables présente des difficultés considérables.

Tout d'abord, les hydrates sont en profondeur et, souvent, sous le fond océanique. Ils sont très instables, voire explosifs. Même si l'on disposait d'un

système de convoyage jusqu'en surface, que faire ensuite des grandes quantités de boue et de calcaire auxquelles l'hydrate est mélangé ? Le gaz libre présent sous la couche d'hydrate n'est pas non plus facile à exploiter : la pression est trop faible pour faire jaillir le méthane à une vitesse suffisante pour le rendre exploitable.

On pourrait améliorer le rendement grâce à des techniques similaires à celles qui servent à récupérer le pétrole, lorsque les puits sont épuisés (on injecterait de la vapeur ou de l'eau chaude afin de fondre l'hydrate et de libérer davantage de méthane, puis ce dernier serait pompé à travers un autre trou de forage), mais, là encore, les coûts seraient élevés. Enfin, comment ramener le combustible à terre ? Les pipelines sous-marins sont très coûteux et exposés, sur le talus continental, aux glissements de terrain. Ce risque serait encore accru par l'extraction de l'hydrate qui stabilise les talus.

Pour éviter ces difficultés, certains ont proposé d'économiser le prix des pipelines en liquéfiant le gaz sur des navires ou sur des plates-formes de forage : le méthane serait d'abord transformé en hydrogène et en monoxyde de carbone ; puis, à l'aide d'un catalyseur, on synthétiserait des hydrocarbures liquides à longue chaîne que l'on pourrait facilement transporter par bateau. Ce type de solution a ses défauts : il fait perdre 35 pour cent de l'énergie. D'autres envisagent une installation de production installée sur le plancher océanique, où le méthane se combinerait avec l'eau pour former de l'hydrate pur. Celui-ci serait alors remorqué dans des réservoirs de stockage en forme de zeppelins. Quels que soient les résultats des recherches dans le domaine des hydrates, le futur sera certainement riche en découvertes et en innovations.

Erwin SUESS, Gerhard BOHRMANN et Jens GREINERT travaillent au Département de géologie de l'environnement marin du Centre de recherche GEOMAR, à Kiel. Erwin LAUSCH est membre du conseil d'administration de GEOMAR.

K. KVENVOLDEN et al., *Worldwide Distribution of Subaquatic Gas Hydrates*, in *Geo-Marine Letters*, vol. 13, pp. 32-40, 1993.

E. SUESS et al., *Methanhydratfund von FS Sonne vor der Westküste Nordamerikas*, in *Geowissenschaften*, vol. 15, pp. 194-199, juin 1997.

E. SUESS et al., *Fluid Venting in the Eastern Aleutian Subduction Zone*, in *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, n° 2, pp. 2597-2614, 10 février 1998.

J.-P. HENRIET et J. MIENERT, *Gas Hydrates : Relevance to World Margin Stability and Climatic Change*, in *Geological Society Special Publication*, vol. 137, 1998.

G. BOHRMANN et al., *Authigenic Carbonates from the Cascadia Subduction Zone and their Relation to Gas Hydrate Stability*, in *Geology*, vol. 26, pp. 647-650, 1998.

Le vrai et le faux en peinture de chevalet

PATRICK LE CHANU

À l'aide de techniques d'examen et d'analyse, le scientifique peut discerner les indices d'une falsification artistique. Pour d'autres questions, telle l'attribution d'une œuvre, les progrès sont plus lents

Qui êtes-vous pour prétendre posséder un Picasso?
Richard Weiss, 1998.

Pourquoi les débats sur les faux sont-ils aussi passionnés? Essentiellement en raison d'une récupération commerciale, préjudiciable à l'étude sereine d'une œuvre. Au-delà de ces débats, le statut du chercheur qui étudie les peintures en laboratoire reste de définition délicate: les historiens de l'art et les conservateurs de musée doivent guider son travail, mais le scientifique doit respecter la méthodologie des sciences exactes. De quels outils disposent le scientifique pour étudier une œuvre?

Les méthodes d'examen consistent à réaliser des images des œuvres à l'aide de divers rayonnements. Les images dans l'infrarouge, par exemple, révèlent le dessin sous-jacent, tandis que les images dans l'ultraviolet font ressortir des repeints récents. Les méthodes d'analyse physico-chimique quant à elles, visent plutôt à l'identification des matériaux constitutifs, indices précieux pour reconstituer l'histoire de la création d'un tableau.

À partir de quelques exemples, nous verrons comment ces méthodes sont utilisées et quelles sont

leurs limites. Le plus souvent, ce n'est pas l'authenticité qui pose problème, mais l'attribution. Là, le laboratoire reste encore assez démuné.

Qu'est-ce qu'un faux?

Les médias relatent régulièrement des affaires de falsifications artistiques. Sous cette rubrique, on trouve en fait des cas de nature très diverse, dont certains n'ont rien à voir avec le faux. D'ailleurs, qu'est-ce qu'un faux? C'est un objet créé d'emblée pour tromper

et passer pour ce qu'il n'est pas, du point de vue de son auteur ou de l'époque de sa création.

L'efficacité et l'intérêt des méthodes de laboratoire diffèrent selon les questions que l'on se pose. Première question: à qui est attribué le tableau? Cette question porte exclusivement sur la paternité d'une œuvre créée en toute sincérité par un artiste, mais dont le lien avec celui-ci n'a pas été scellé par une signature ou par un monogramme. Ces cas de tableaux anonymes sont très nombreux dans la peinture antérieure au XIX^e siècle.

Vient ensuite la question des copies. Souvent peintes à des fins pédagogiques par des artistes en cours de formation, elles sont innombrables, et leur quantité dépasse de beaucoup celle des faux avérés. Ainsi, lors de son séjour en Italie, Pierre Paul Rubens (1577-1640) copia les grands maîtres italiens. En raison de la célébrité de leurs auteurs, les copies peintes par des maîtres lors de leur apprentissage sont aujourd'hui bien plus recherchées que bien des œuvres originales. Lorsqu'elles ne portent pas la signature de leur auteur, les copies peuvent être ensuite frauduleusement présentées comme des œuvres de celui ou de celle qu'elles imitent.



1. CETTE PIETA que l'on prit d'abord pour un tableau de l'école rhénane du XV^e siècle serait un faux. Le tableau aurait été peint au début du XX^e siècle par le «Fausssaire pathétique» qui a été trahi par l'utilisation d'un style différent de celui du XV^e siècle.



2. TÊTE DE CHRIST (La sainte face) censée provenir de l'école espagnole du ^{xv}^e siècle (à gauche). La radiographie du tableau (à droite) est transparente aux rayons X, car les pigments de blanc de

plomb, habituellement utilisés au ^{xv}^e siècle pour peindre les carnations sont absents : une sérieuse présomption contre l'authenticité complète de ce tableau conservé au Louvre.

Viennent enfin les faux proprement dits, peu nombreux en regard des œuvres originales et des copies. Ces tableaux sont d'époques variées, et d'une qualité artistique inégale. À titre d'exemple, on retiendra les tableaux de van Meergen, jugés aujourd'hui de qualité médiocre. Ce faussaire, actif au Pays-Bas avant et pendant la Seconde Guerre mondiale peignit notamment plusieurs scènes religieuses censées être de Vermeer de Delft (1632-1675). Ces peintures venaient habilement combler un vide frustrant pour les historiens d'art : celui des œuvres de jeunesse de Vermeer, dont très peu sont conservées. L'analyse des liants de ces peintures montra qu'ils étaient à base de résines synthétiques, inconnues au ^{xvii}^e siècle.

La confusion des genres

Toute œuvre à laquelle le nom d'un artiste n'est pas associé avec certitude est trop souvent qualifiée de faux. Pourquoi cette confusion ? Elle résulte

d'une conception exclusivement commerciale de l'authenticité. C'est le commerce de l'art qui, dans son état actuel, a besoin d'un label sans ambiguïté. C'est pourquoi les marchands d'arts attribuent certains tableaux aux plus grands maîtres de manière parfois excessivement optimiste. Cette omniprésente arrière-pensée commerciale dans l'image de l'art, telle qu'on la retrouve dans l'esprit de la majeure partie de la population, résulte essentiellement de l'absence d'enseignement scolaire de l'histoire de l'art. Pourtant, l'enseignement de l'histoire de l'art en tant que discipline humaniste autonome relativiserait la valeur des œuvres. On serait amené à voir les œuvres d'art non plus à travers leur commerce, mais comme une partie importante de notre patrimoine.

Les textes régissant le commerce et les litiges en matière d'œuvres d'art sont pourtant clairs et parfois pleins d'enseignements pour la réflexion scientifique. Le décret de 3 mars 1981 relatif à la répression des fraudes en matière d'œuvres d'art et d'objets de

collection réglemente le vocabulaire qui établit les relations réelles ou supposées entre une œuvre et l'auteur auquel elle est associée. Ainsi, l'utilisation du terme « attribué à » suivi d'un nom d'artiste correspond à une situation où « l'œuvre ou l'objet a été exécuté pendant la période de production de l'artiste mentionné et que des présomptions sérieuses désignent celui-ci comme l'auteur vraisemblable ».

L'emploi des termes « de » ou « par » tel ou tel artiste vaut de la part de celui qui les emploie une garantie d'authenticité équivalente à celle fournie par la présence d'une signature originale. Avant l'apparition de ce texte, en l'absence de définition claire, ces derniers termes ont souvent été employés avec une désinvolture qui n'a d'ailleurs pas disparu.

Comment l'étude des peintures au laboratoire se positionne-t-elle face à ce problème ? L'étude des œuvres d'art au laboratoire se situe à la croisée de plusieurs disciplines. L'une d'elles, l'histoire de l'art, fait appel à

la fois à l'histoire et à des domaines connexes, telle l'archivistique, mais aussi à une connaissance et à une interprétation sensibles, affinées par la culture visuelle. Cette spécificité, qui lui confère son intérêt et sa richesse, n'est pas sans danger.

Ainsi, l'art du «connaisseur» a été décrit notamment par Lionello Venturi, historien d'art italien du début du siècle. C'est «une pratique née de l'habitude qu'il a de regarder à maintes et maintes reprises les œuvres d'une certaine période». L'examen scientifique se doit de commencer par cette approche sensible, à l'œil nu et en lumière naturelle. Sur cette approche se fondent certaines intuitions qui seront ensuite étayées ou non au laboratoire.

C'est grâce à sa grande familiarité avec les œuvres du XV^e siècle

que Charles Sterling, ancien conservateur au Louvre, avait identifié et même commencé à cataloguer l'œuvre de certains faussaires, tel celui qu'il nomme le «Faussaire pathétique», dont nous présentons ici ce que nous pensons être une œuvre inédite (voir la figure 1). Cet artiste du début du siècle créait des scènes s'inspirant des peintres des anciens Pays-Bas et allemands des XV^e et XVI^e siècles. Toutefois, ses peintures n'étaient pas des tableaux du XV^e siècle, mais reflétaient l'idée qu'il s'en faisait, nécessairement empreinte de l'expressionnisme en vigueur à son époque ; c'est ce qui l'a trahi. Cependant, les intuitions visuelles de Charles Sterling demandent encore à être confirmées par une étude au laboratoire.

Le dialogue du conservateur ou de l'historien d'art avec les ingénieurs

et avec les techniciens du laboratoire est un élément clé de l'étude d'une œuvre. Toutefois, le chercheur ne doit en rien se laisser «influencer» par l'historien. Une fois informé des données stylistiques et sensibles, il doit faire comme s'il les oubliait, dans un processus que l'on pourrait comparer à la phase préparatoire du *cogito* cartésien. De même, les conclusions que présente le laboratoire doivent être fondées sur des observations et sur des comparaisons, sans extrapolations abusives.

Images révélées

Les images révèlent les étapes de la vie d'un tableau. Les résultats diffèrent selon le type de rayonnement. Les rayons X, par exemple, pénètrent en profondeur. Ils donnent des indications sur la nature du support, sur les coutures d'une toile ou sur le mode d'assemblage des planches d'un panneau peint sur bois. En outre, sur les radiographies, on décèle l'emplacement des altérations, on observe la densité et l'on a des indices sur la composition de la couche de préparation et des couches de pigment. Ainsi, le blanc de plomb, de forte densité atomique, a une image très blanche sur les radiographies. Son absence complète des carnations d'un visage censé avoir été peint au XV^e siècle fait douter de son authenticité (voir la figure 2).

L'examen des œuvres dans le proche infrarouge donne accès au dessin sous-jacent (voir l'encadré ci-contre). Tracé aux XV^e et XVI^e siècles sur la couche de préparation, celui-ci est une ébauche plus ou moins achevée de la composition finale qui viendra le recouvrir.

L'absence complète de dessin sous-jacent ne prouve pourtant pas qu'une peinture ancienne n'est pas authentique : certains matériaux tels que les pointes d'argent ou de plomb, aussi utilisés pour le dessin sous-jacent, ne sont pas détectés dans le proche infrarouge. À cette longueur d'onde également, les lacunes et les repeints anciens sont souvent bien mis en valeur, ce qui permet l'évaluation de l'état de conservation d'une œuvre.

Enfin, grâce aux photographies sous rayonnement ultraviolet, le scientifique détecte les repeints les plus récents sur une œuvre. Ces derniers

La réflectographie infrarouge

En réflectographie infrarouge, on éclaire le tableau à examiner avec une lumière contenant de l'infrarouge et on enregistre, à l'aide d'une caméra sensible à ces longueurs d'onde, la lumière réfléchie. Comme les couches de pigments sont plus ou moins transparentes à ces longueurs d'onde, l'analyse de la lumière réfléchie donne accès à des couches profondes du tableau. À l'inverse, les matériaux carbonés, utilisés pour le tracé préliminaire de l'œuvre (le dessin sous-jacent) absorbent bien l'infrarouge.

Ces matériaux carbonés sont d'autant mieux mis en évidence que le fond de la préparation est claire, comme c'est souvent le cas dans la peinture de chevalet occidentale du XV^e et du XVI^e siècle. À partir du XVII^e siècle, l'utilisation de préparations colorées et de substances fluides non carbonées limitent la détection du dessin sous-jacent. Bon nombre de peintres du XIX^e siècle préféreront à nouveau les préparations blanches, plus lumineuses.

La longueur d'onde optimale pour la détection du dessin au carbone est de 1,8 micromètre environ, longueur d'onde à laquelle les caméras infrarouge sont sensibles. En analysant des tableaux à ces longueurs d'onde, on a montré que certains dessins, à peine visible en photographie infrarouge (qui opère vers 0,8 micromètre), apparaissaient bien plus nettement en réflectographie.



Portrait de Jean Marses



Portrait de Jean Marses

Sur ce *Portrait d'homme*, peint sur chêne (musée Bertrand, Châteauroux), la réflectographie infrarouge révèle le dessin sous-jacent, notamment à la base du cou où il a été réalisé avec une substance fluide, encre ou pigment. La densité des hachures augmente dans les régions les plus sombres.



3. LE FIFRE, peint par Édouard Manet en 1866 (musée d'Orsay, Paris). La lumière ultraviolette (à droite) révèle des repeints. La signature visible à la hauteur de la cheville apparaît sombre sous éclairage ultraviolet : c'est un repeint réalisé tardivement sur le



verniss. Ce tableau a subi une restauration durant laquelle la signature originale, dans le coin inférieur droit, a été recouverte d'un repeint, puis une signature apocryphe a été apposée, un peu au-dessus de la première signature masquée.

ont été posés sur les vernis qui fluorescent dans l'ultraviolet, recouvrant le tableau d'un voile bleuâtre. Sur ce voile, les repeints apparaissent sous forme de taches sombres. Sur le *Fifre*, d'Édouard Manet, des repeints masquent ainsi une signature ancienne (voir la figure 3). Le fait qu'une restauration très étendue ne soit pas signalée au public ou à un acheteur potentiel peut être, nous le verrons, considéré comme une falsification.

Seconde catégorie de travaux au laboratoire, les méthodes d'analyse. Leur mise en œuvre nécessite parfois un microprélèvement, comme c'est le cas des études sur des échantillons de matière picturale qui révèlent la stratigraphie des peintures. Ces derniers sont examinés au microscope optique ou au microscope électronique à balayage. Cependant, certaines mé-

thodes d'analyse sont non destructives. C'est le cas de la microfluorescence X directe ou de l'analyse pixe.

Dans la microfluorescence X, une source de rayons X (tube à rayons X) excite les atomes des pigments. La fluorescence de ces atomes est enregistrée, puis analysée. Le spectre qui en résulte possède des raies, caractéristiques des atomes qui ont émis la fluorescence. Grâce à ce spectre, on connaît la composition de la surface analysée. La méthode PIXE est similaire, excepté la source d'excitation qui n'est pas un tube de rayons X, mais un faisceau de particules créé à l'aide d'un accélérateur.

Le but essentiel de l'analyse est ainsi l'identification des matériaux constitutifs d'un tableau, ceux de son support, de sa préparation, de ses couches colorées et de leur liant, mais

aussi de sa ou de ses couches de vernis et des repeints consécutifs à d'éventuelles restaurations. Cette identification permet de confronter la liste des constituants découverts et la littérature technique contemporaine de l'œuvre : traités, documents d'archives, tels les statuts des guildes des peintres. Cette littérature est très réduite pour les époques les plus anciennes, mais les travaux de laboratoire ont considérablement enrichi notre connaissance des matériaux, et les données acquises depuis des décennies constituent une ressource précieuse.

Grâce à ces analyses, on a établi une table qui indique approximativement la chronologie et la géographie de l'apparition et de l'utilisation des pigments. Pour le jaune de plomb et d'étain, par exemple, nous avons

établi des esquisses de cartes de répartition des éléments constitutifs de ce pigment sur une centaine d'échantillons de jaune provenant de tableaux italiens des XIV^e et XV^e siècles.

Deux variétés de jaune de plomb et d'étain ont été mises en évidence. La première, constituée essentiellement de plomb et d'étain, la seconde de plomb, d'étain et de silicium. On a constaté que la seconde variété de ce pigment avait été remplacée par la première dans les années 1430-1440. La première variété est, par exemple, présente sur la palette du peintre Piero della Francesca dont le portrait de Sigismond Malatesta est conservé au Louvre (voir la figure 6).

D'autres pigments synthétisés au XIX^e siècle, tels le blanc de zinc et le sulfate de baryum, ou au XX^e siècle, tel le blanc de titane, fournissent, si leur présence comme élément constitutif originel de la couche picturale d'une peinture est avérée, de bons repères pour la date de réalisation de certains faux.

Typologie des faux

Toute typologie du faux prend non seulement en compte les caractéristiques techniques d'une œuvre, mais aussi son contexte d'apparition. Certaines falsifications profitent habilement d'une situation où la demande d'une image se fait ressentir. Ce fut probablement le cas pour le portrait présumé de Bernard Palissy, céramiste de la Renaissance. La publication, en 1855, de l'essai biographique *La vie des grands hommes*, par Alphonse de Lamartine, où le céramiste figure en bonne place, joua un rôle considérable dans le parachèvement d'une réhabilitation entamée au XVIII^e siècle. Dès lors, sa gloire n'allait cesser de croître.

Cependant, l'existence légendaire de cet artiste se devait d'être associée à une effigie qui faisait alors défaut. En 1864, le musée de Cluny faisait l'acquisition d'un portrait peint sur vélin portant une inscription en lettres dorées : B. Palissy (voir la figure 4).



4. CE PORTRAIT REPRÉSENTE-T-IL VRAIMENT BERNARD PALISSY ?
L'analyse a montré que ce tableau contenait un pigment vert inventé en 1838 : l'identification du personnage avec le céramiste de la Renaissance est aujourd'hui douteuse (Écouen, musée national de la Renaissance).

Très vite, cette œuvre fut reproduite à satiété dans l'abondante littérature consacrée à ce maître-céramiste.

Ce n'est qu'en 1990 que des doutes sur l'authenticité de ce portrait furent exprimés. L'auteur de la notice du portrait dans le catalogue de l'exposition *Bernard Palissy, mythe et réalité*, alors tenue à Sainte, fait remarquer que «cette inscription semble avoir été apposée après l'exécution du portrait, et l'on peut constater que les trois dernières lettres du nom de l'artiste sont moins régulièrement disposées que les autres». Si ce dernier argument paraît peu convaincant, l'intuition initiale s'est trouvée confortée par l'analyse de l'œuvre à l'aide de la méthode PIXE. Cette analyse révéla que l'ensemble du fond vert de l'œuvre, y compris sous les lettres de l'inscription, était constitué d'un pigment contenant du chrome. Ce pigment vert est très probablement du vert émeraude (oxyde de chrome hydraté), le tout premier des pigments verts au chrome inventé au XIX^e siècle, en 1838. À lui seul, ce résultat disqualifie

presque entièrement l'identification du personnage avec Bernard Palissy.

Par ailleurs, sur l'habit du modèle, la matière grise du col contient du jaune de Naples, un antimoniate de plomb. Apparu en France sur les palettes des peintres dans la seconde moitié du XVII^e siècle, ce pigment était encore en usage à la fin du XIX^e siècle. Cet indice est cependant moins probant que pour le matériau présent sous l'inscription : il pourrait s'agir d'un matériau de restauration, présent seulement localement.

En l'attente d'avis plus informés, fondés notamment sur une étude stylistique comparative d'œuvres équivalentes attestées du XVI^e siècle, bornons-nous à constater la falsification suivante : la réalisation, au XIX^e siècle, d'un fond et d'une inscription qui confère à une œuvre, dont l'auteur est resté très sagement anonyme, le grand intérêt d'être la prétendue effigie princeps de l'un des héros de l'Histoire de France.

Plus récemment, nous avons détecté ce qui est sans doute, à l'instar de l'exemple précédent, un cas de falsification partielle portant cette fois sur une signature. En 1998, le musée Saint-Denis, à Reims, a confié au laboratoire une série de peintures cataloguées sous le nom de Camille Corot, peintre français précurseur de l'impressionnisme (1796-1875).

L'une d'elles présentait d'emblée des différences stylistiques importantes avec l'œuvre de ce peintre. Le *Sous-bois* (voir la figure 5), œuvre d'ailleurs d'une bonne qualité picturale, s'apparente plus à l'art des peintres de Barbizon qu'à celui de Corot. L'œuvre a initialement été peinte sur une feuille de papier, puis, à une date indéterminée, elle a été légèrement agrandie : la feuille a été fixée sur une toile plus grande, montée sur un châssis rigide, opération nommée marouflage. Un détail de la signature en photographie infrarouge montre que celle-ci est à cheval sur le bord irrégulièrement découpé du support de papier original et la toile

un peu plus grande sur laquelle ce dernier a été marouflé.

L'apposition de la signature est donc postérieure à l'opération de marouflage, qui elle-même n'est probablement pas consécutive à la création de l'œuvre, en raison de l'aspect irrégulier, et donc déjà un peu altéré, des bords du papier. Ces constatations ne prouvent rien *stricto sensu*, mais, dans le contexte, elles jettent la suspicion sur la signature qui pourrait être une falsification à visée commerciale.

Quand le faux recouvre le vrai

La part de la falsification peut bien sûr aller au-delà de l'ajout d'une inscription ou d'une signature apocryphe. Nous avons étudié un cas fort intéressant de récupération d'un panneau comportant non seulement un support ancien, mais aussi un fragment de composition peinte sous-jacente. La *Dame en prière* (voir la figure 7), conservée au Louvre, a été étudiée au laboratoire en 1995 dans le cadre de la préparation du catalogue des peintures espagnoles.

Cette peinture était jusqu'alors cataloguée comme étant celle d'un artiste espagnol de la fin du XVI^e siècle. La radiographie de ce panneau de chêne révéla la présence, à droite, d'une bande verticale de six centimètres de large sur laquelle la densité de matière picturale est très inférieure à ce qu'elle est ailleurs. Grâce à cette radiographie, nous avons également découvert une composition sous-jacente constituée de fragments de personnages féminins en prière, tournés vers la gauche. Dans les triptyques, c'est en effet le volet de droite qui accueillait traditionnellement les personnages féminins tournés vers le panneau central, une scène sacrée, objet de leur dévotion. C'est donc très probablement un fragment de volet droit de triptyque. La moitié d'un visage se voit à gauche du personnage visible aujourd'hui en surface.

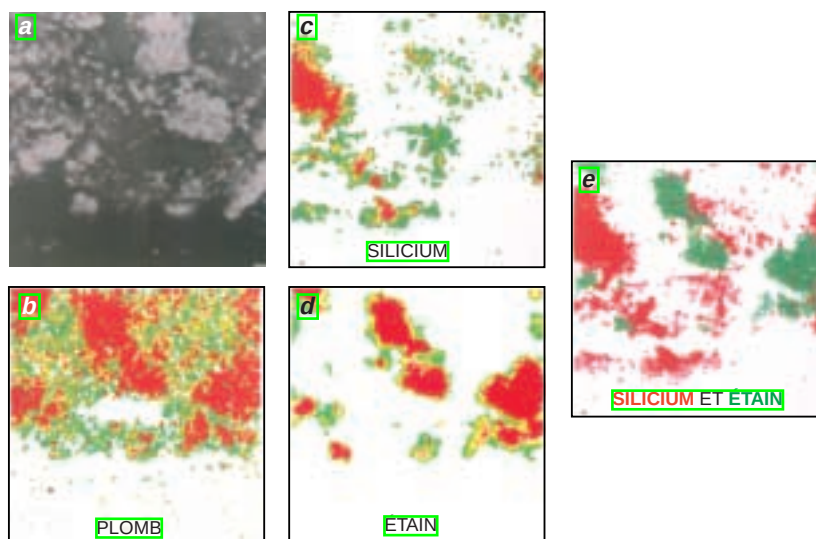
Le long du bord supérieur du panneau, on aperçoit les mains et le col blanc d'une femme qui, de par son costume, devait être une religieuse. L'analyse d'un prélèvement de matière picturale au microscope électronique à balayage et celle de l'œuvre en microfluorescence X ont révélé que la couche de préparation originale

était probablement constituée de carbonate de calcium. C'est le type de préparation qui prédomine dans le Nord de l'Europe à cette époque, l'Espagne étant alors, comme l'Italie, plutôt coutumière des préparations au sulfate de calcium, elles aussi de couleur claire.

D'autre part, l'ensemble du fond vert sombre de la composition, tant sur la bande verticale déjà signalée à droite que sur le reste du fond, est constitué de vert au cuivre et à l'arsenic, dit vert Véronèse, et localement de grains de jaune de chrome. Ces pigments ont été découverts au XIX^e siècle. L'examen



5. LE *SOUS-BOIS*, ANCIENNEMENT ATTRIBUE À CAMILLE COROT porterait une fausse signature. Son style s'apparente plus à celui de l'école de Barbizon qu'à celui de Corot. De surcroît, l'éclairage infrarouge montre que la signature de Corot, en bas à droite, est à cheval sur le papier de l'œuvre originale et sur la toile avec laquelle le tableau a été légèrement agrandi. Il s'agirait donc de la récupération de l'œuvre d'un artiste anonyme à des fins commerciales (musée Saint-Denis, Reims).



6. FRAGMENT DU *PORTAIT DE SIGISMOND MALATESTA*, de Piero della Francesca (musée du Louvre), observé au microscope électronique (a). Sur cet échantillon d'une dizaine de micromètres de côté, l'analyse révèle la densité de différents éléments (b, c, d), la densité croissant du vert au rouge. Quelle variété de pigment jaune a été utilisée? Celle constituée essentiellement de plomb et d'étain, ou celle qui contient en plus du silicium? Le fragment contient effectivement du silicium, mais sa répartition n'est pas corrélée avec celle de l'étain (e) : ils n'appartiennent donc pas au même pigment. C'est la première variété qui a été utilisée et le silicium provient ici d'un pigment ocre.

attentif de la radiographie indique que certains éléments sous-jacents du personnage aujourd'hui en surface diffèrent de ce que nous voyons à l'œil nu.

Fort de ces observations, nous pouvons formuler une hypothèse : comme l'atteste la nature de la préparation, un fragment endommagé du volet droit d'un triptyque dû probablement à un artiste du Nord de l'Europe a servi de support. Par le style, l'auteur de cette œuvre semble proche de Frans Pourbus, un peintre flamand du milieu du XVI^e siècle, dont il était peut-être contemporain (voir la figure 8). Cette datation n'est pas contredite par la nature des pigments de la composition sous-jacente, ni par la mode vestimentaire des personnages. S'étant procuré ce fragment de panneau, un faussaire actif au XIX^e ou au XX^e siècle a entièrement repeint l'image d'une donatrice censée être un tableau complet.

Contrairement à certaines suggestions, nous ne pensons pas que les légères

modifications du personnage principal qui apparaissent sur la radiographie du tableau soient des repentirs, c'est-à-dire des modifications de l'artiste initial lui-même lors de l'élaboration de son œuvre. Pour nous, ces modifications résultent du décalage entre les restes d'un personnage qui appartenait à la composition originelle et le nouveau personnage, presque entièrement réinventé par le faussaire. Les contours des restes, très endommagés, ont servi de canevas au faussaire qui s'est comporté en restaurateur plus que zélé.

Quand le faux amène à repenser le vrai

Aidés de ces quelques exemples, nous pouvons identifier quelques pistes de réflexion. À nouveau, c'est un texte juridique qui nous guidera. Inclus dans l'article 1110 du Code civil, ce texte porte sur la validité des conventions et concerne l'erreur sur la substance :

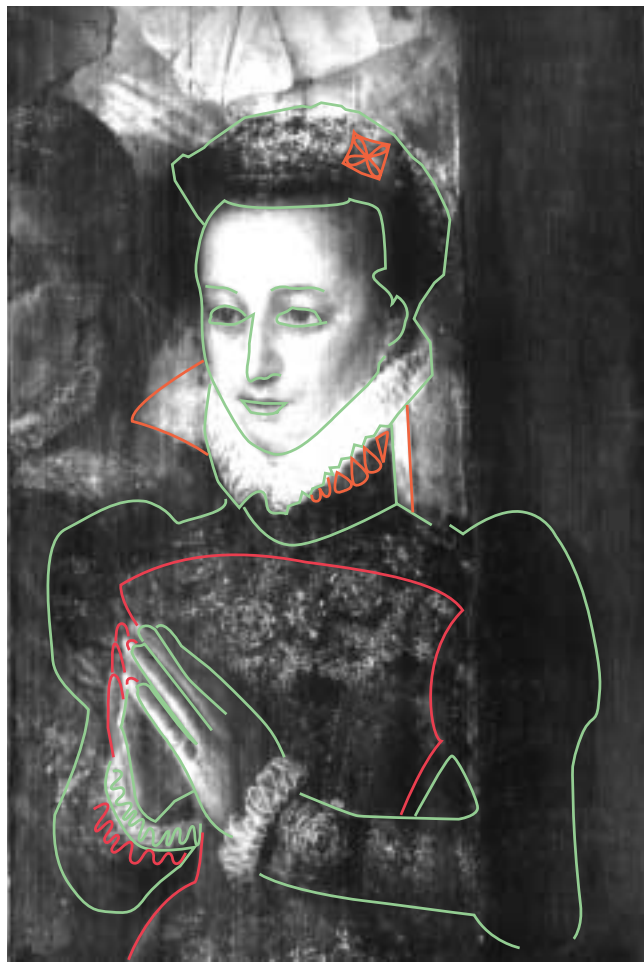
«L'erreur sur la substance s'entend non seulement de celle qui porte sur la matière même dont la chose est composée, mais aussi, et plus généralement, de celle qui a trait aux qualités substantielles en considération desquelles les parties ont contracté.» «L'authenticité d'une œuvre d'art est généralement une qualité substantielle.»

Ce texte résume les problèmes majeurs de l'étude des questions d'authenticité des œuvres d'art au laboratoire. Néanmoins, par sa relative imprécision, il peut être la source de confusions. Le plus souvent, ce n'est en effet pas l'authenticité qui pose problème, mais bien l'attribution.

Si les instruments dont on dispose aujourd'hui permettent de s'attacher à «la matière même dont la chose est composée», le chercheur est également concerné, mais souvent embarrassé, par cette substance impalpable et difficilement définissable qu'est l'attribution à tel ou tel peintre



7. LA DAME EN PRIERE, tableau initialement attribué à un peintre espagnol du XVI^e siècle, a été modifié tardivement. La radiographie du tableau (à droite) révèle des personnages sous-jacents (sur la couverture de la revue, un montage met en



vis-à-vis la photographie et la radiographie). Sur la radiographie, on a figuré les contours du personnage sous-jacent qui date du XVI^e siècle (en rouge) et les contours du personnage visible aujourd'hui, probablement peint au XIX^e siècle (en vert).



S. 1717, Musée Bruges

8. LE VOLET DROIT D'UN TRYPTIQUE de Frans Pourbus est contemporain et proche par le style du tableau sous-jacent de la Dame en prière (figure 7). Ce tableau, Johanna Voet et ses filles, est signé par un monogramme et daté de 1573 en bas à droite (Bruges, cathédrale Notre-Dame).

d'une œuvre non munie d'une signature. La présence d'une signature reconnue comme authentique ne prouve d'ailleurs pas de manière irréfutable qu'un tableau est l'œuvre d'un seul artiste. Au Moyen Âge, à la Renaissance, mais aussi à l'époque classique ou baroque, les peintres envisagent souvent le tableau comme une œuvre collective de l'atelier. L'originalité et l'authenticité résident alors plus dans l'invention d'une composition, qu'il faut entendre au sens de la mise en scène d'un thème, que dans l'exécution intégrale d'une œuvre par une seule main. Ce dessein se cantonne parfois au dessin, qu'il soit

dessin préparatoire sur feuille ou dessin sous-jacent à la composition peinte.

C'est souvent ce dessin qui fournit des indices de l'intervention d'aides dans l'élaboration d'une œuvre, car il comporte parfois des inscriptions sous-jacentes : mots désignant des couleurs et dont des exemples sont présents dans l'ensemble de la peinture européenne des XV^e et XVI^e siècles.

L'affirmation que la substance d'une œuvre d'art réside uniquement dans le nom de celui ou de celle auquel elle est attribuée est également infondée. L'authenticité est elle-même une notion complexe et relative. Une copie fidèle, réalisée avec talent, conserve une grande part de la substance originale de son modèle. Le Cavalier Bernin, architecte et sculpteur italien du XVII^e siècle, ne s'y trompait pas lorsque, examinant à Paris, en 1665, la collection de Paul Fréart de Chantelou, il s'arrêtait non seulement devant les œuvres originales de Nicolas Poussin, mais aussi devant les copies d'après ce dernier, en les commentant longuement, comme si elles avaient conservé l'essentiel de l'invention et du coloris du maître.

Peut-être est-il temps, dans les musées, mais aussi sur le marché de l'art, de réhabiliter les copies, exercice de peinture, plein, entier et louable. Quant aux faux, on pourrait aussi en saisir l'intérêt artistique, variable avec le talent de ceux qui les ont peints. Ils sont, qu'on le veuille ou non, un chapitre certes marginal, mais néanmoins intéressant de l'histoire de l'art et de son commerce.

Patrick LE CHANU dirige le groupe d'étude des peintures de chevalet au laboratoire du Centre de recherche et de restauration des Musées de France.

Patrick LE CHANU, *The Contribution and Limitations of Scientific Examination and Analysis in the Detection of Old Master's Paintings*, in *Scientific Detection of Fakery*, Conference IS&T / SPIE, janvier 1998, vol. 3315, pp. 62-73.

Mauro NATALE et Claude RITSCHARD, *L'art d'imiter, Images de la Renaissance italienne au musée d'art et d'histoire, exposition*, Genève, musée d'art et d'histoire, 1997.

Vrai ou faux ? Copier, imiter, falsifier, catalogue d'exposition, Bibliothèque nationale, 6 mai-29 octobre 1988.

Otto KURZ, *Faux et faussaires*, Éditions Flammarion, 1983.

Copies, répliques, pastiches, faux, in *Revue de l'art* (CNRS), n° 21, 1973.



L'épopée du nickel

ROLAND LEHOUCQ • ROBERT MOCHKOVITCH

Les tribulations d'un atome de nickel à travers l'espace et le temps : de l'étoile à la pièce de un franc.

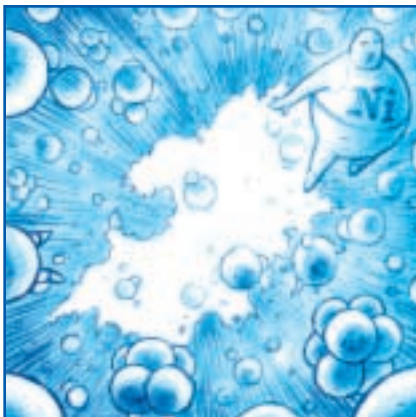
Le héros de cette aventure est un atome de nickel. Remonté des profondeurs de la Terre à la faveur de grands mouvements tectoniques, il était déjà présent il y a 4,5 milliards d'années dans la nébuleuse dont est issu le Système solaire. Bien avant, il a longtemps dérivé dans notre Galaxie, initialement mû par la formidable impulsion communiquée lors de l'explosion d'une supernova. Finalement, comme tous les autres éléments, c'est dans les étoiles que le nickel a été créé.

Quelques minutes après le Big Bang, il y a 15 milliards d'années.

Il fait effroyablement chaud, si chaud que les briques élémentaires des noyaux atomiques, protons et neutrons, ne peuvent s'assembler. Cependant, l'expansion de l'Univers refroidit la soupe cosmique. Pendant environ trois minutes, de petites constructions à deux protons et deux neutrons apparaissent. Ce sont des noyaux d'hélium. À mesure du refroidissement, les réactions nucléaires entre protons et neutrons deviennent impossibles. Aucun noyau plus lourd ne peut se former. L'Univers n'est alors composé que d'hydrogène (un proton) et d'hélium. Il est vide de nickel, mais aussi de tous les autres éléments.

Formation de notre Galaxie, il y a 13 milliards d'années.

Dans notre Galaxie, formée à partir d'un gigantesque nuage d'hydrogène et d'hélium, les premières étoiles s'allument.



1. Supernova.

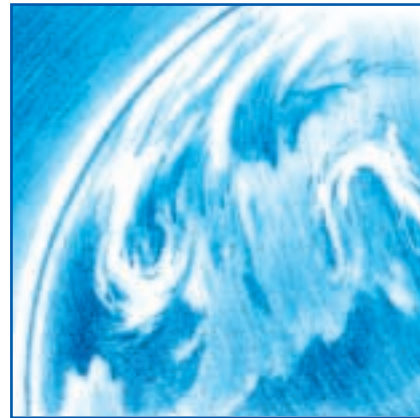
Leur propre gravité engendre en leur centre des températures capables de faire fusionner les éléments primordiaux, hydrogène et hélium. Ces réactions nucléaires produisent des éléments plus lourds et l'énergie qui fera briller les étoiles légères plusieurs milliards d'années durant. La genèse des éléments, qui s'était arrêtée trois minutes après le Big Bang, reprend dans le cœur des étoiles. L'hélium est synthétisé à partir de quatre noyaux d'hydrogène. La fusion crée également de nouveaux noyaux plus lourds, comme le carbone, l'azote et l'oxygène. Les étoiles les plus massives vivront moins longtemps que les plus légères et finiront leur vie en une gigantesque explosion : une supernova.



2. Formation du Système solaire.

Quelque part dans la Galaxie, il y a dix milliards d'années.

Une étoile quinze fois plus massive que le Soleil termine son évolution. Lors des étapes de fusion thermonucléaire, qui produisent de l'énergie, tous les éléments plus légers que le fer ont été créés. Le cœur de l'étoile est en fer, le plus stable des éléments : la fusion ou la fission du fer requiert de l'énergie et les réactions nucléaires s'arrêtent. Incapable de fusionner plus avant, le cœur de fer se contracte. La contraction chauffe le cœur qui atteint une température telle que l'énergie des photons environnants est suffisante pour briser les noyaux de fer en éléments

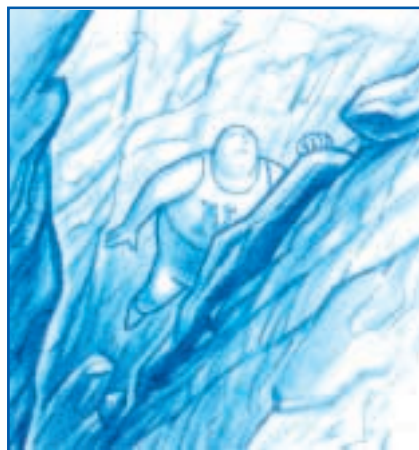


3. Le nickel est dans le manteau terrestre...

plus légers, ce qui coûte de l'énergie. Cette déperdition d'énergie précipite la contraction. Au sein des noyaux légers, les protons capturent des électrons et se transforment en neutrons. Ces réactions s'accompagnent d'une importante émission de neutrinos lesquels emportent plus de 99 pour cent de l'énergie gravitationnelle disponible.

Cette formidable hémorragie d'énergie précipite l'implosion gravitationnelle du cœur. En quelques dizaines de millisecondes, le cœur stellaire devient un gigantesque amas de neutrons, prémices d'une étoile à neutrons. Le reste de l'étoile en effondrement s'écrase sur la surface rigide de neutrons. La compression violente qui en résulte inverse le mouvement de chute : une onde de choc se propage de l'intérieur de l'étoile et la fait exploser.

Cet instant marque la mort d'une étoile massive sous la forme d'une supernova. Une partie des noyaux synthétisés par l'étoile au cours de sa vie sont éjectés dans l'espace, enrichissant le milieu interstellaire en éléments nouveaux. L'onde de choc chauffe tant l'enveloppe de l'étoile (plusieurs milliards de degrés) que de nouvelles réactions thermonucléaires se déclenchent. C'est ainsi que naquit le nickel, synthétisé uniquement lors de ces épisodes dramatiques de nucléosynthèse explosive. Le nickel créé est ensuite emporté avec les gaz éjectés par l'explosion.



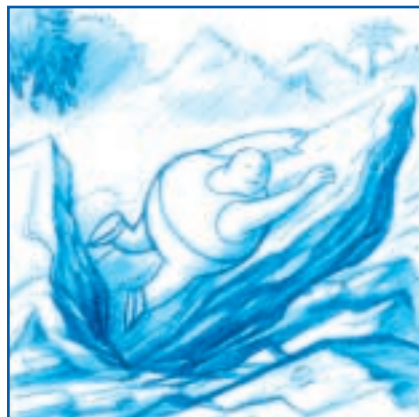
4. ... Il remonte vers la surface.

À mesure de l'expansion, les gaz éjectés se refroidissent. Le nickel se fixe, sous forme d'oxydes, sur des grains de poussières condensés. Ces poussières dérivent longtemps dans la Galaxie. Perdues entre les étoiles, leur température descend jusqu'à une trentaine de kelvins (-243 degrés Celsius environ).

Système solaire, il y a 4,5 milliards d'années

Sous l'effet de sa propre gravité, un nuage de gaz et de poussières interstellaires se condense et s'effondre sur lui-même. Presque toute la matière s'accumule au centre : l'embryon du Soleil est né. La contraction chauffe les régions centrales jusqu'à ce que les réactions nucléaires s'y déclenchent. La contraction est alors stoppée puisque l'énergie dégagée par les réactions de fusion compense l'énergie rayonnée. Tout autour du Soleil, le reste de gaz et de poussières s'organise, sous l'effet de sa rotation, en un disque plat.

Le nickel est là, fixé sur les poussières. En quelques centaines de millions d'années, le disque se refroidit et les grains des matériaux les plus réfractaires se condensent. En s'agglutinant, ils forment des corps de

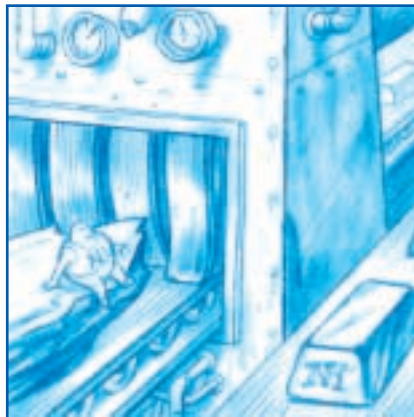


5. Nouvelle Calédonie.

plus en plus gros, qui donnent naissance aux planètes.

Planète Terre, il y a 3,8 milliards d'années

La Terre termine sa formation en capturant des milliers de corps de taille diverses qui tombent à sa surface. Dans le même temps, les éléments chimiques les plus lourds, dont le nickel, s'enfoncent lentement sous la surface. En quelques centaines de millions d'années, l'essentiel du nickel est concentré au cœur de la Terre. Il en reste un peu dans le manteau externe, mais quasiment plus dans la croûte terrestre.



6. Transformation en lingot.

Terre, il y a 40 millions d'années

La superposition de deux plaques tectoniques engendre la remontée en surface de matériaux du manteau terrestre. Dans certaines régions, telle la Nouvelle-Calédonie, de gigantesques poches de péridotites, riches en fer et en magnésium mais contenant assez peu de nickel, affluent.

Sous l'action du climat tropical humide, les minéraux sont attaqués. Comme le nickel est moins soluble que le magnésium, il reste dans les minéraux, tandis que le magnésium est dissous. Cet enrichissement relatif aboutit à des minéraux argileux qui contiennent jusqu'à vingt pour cent de nickel. Ce mécanisme a donné naissance au gisement exploité aujourd'hui en Nouvelle-Calédonie.

Montagnes de Saxe, il y a 300 ans

Des mineurs saxons, déçus de ne rien pouvoir tirer d'un minerai rougeâtre qu'ils viennent d'extraire le baptisent «Kupfer-nickel», le cuivre du Diable. Le nickel métal est isolé de ce minerai (la pentlandite) en 1751 par le chimiste suédois Axel Cronstedt. Il est obtenu sous une forme plus pure en 1804 et ses propriétés physiques sont alors déterminées.

Nouvelle-Calédonie, il y a 136 ans.

En 1863, en Nouvelle-Calédonie, l'ingénieur français Jules Garnier découvre des minéraux d'une belle couleur tur-

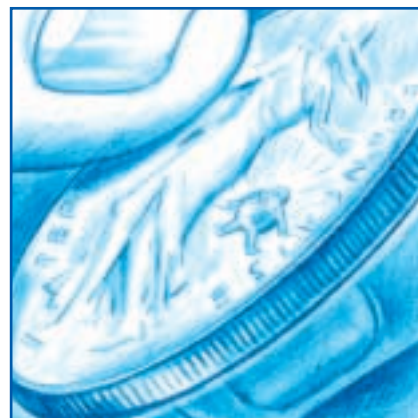
quoise, que l'on nomma garniérite. La garniérite peut être constituée de différents minéraux argileux contenant du nickel, tel le talc. Quinze ans plus tard, il fonde, avec l'anglais John Higginson, la Société le nickel pour exploiter ce gisement.

Mine de Nouvelle-Calédonie, il y a 3 ans

Une pelleteuse prélève par tonnes le minerai du sol. Celui-ci rejoint Doniambo, dans la rade de Nouméa, où il subit une première transformation en mattes qui contiennent 75 pour cent de sulfure de nickel et 25 pour cent de nickel pur. Embarquées sur un cargo, les mattes partent pour Le Havre où elles sont raffinées.

Pessac, il y a 2 ans

Le nickel pur à 99 pour cent arrive à l'usine de Pessac, en Gironde, en provenance de la raffinerie du Havre. Fondu, laminé, découpé puis enfin frappé il devient pièce de un franc au rythme de 250 pièces par minute.



7. Pièce de un franc.

Votre poche, maintenant

La pièce de un franc, faite de nickel pur, s'use peu. Elle a longtemps voyagé, de main en main, de poche en poche pour finalement se retrouver dans la vôtre. Sur près de deux milliards de pièces de un franc frappées depuis l'avènement du nouveau franc, cinq cent millions de pièces seulement seraient en circulation, le reste étant perdu ou oublié au fond d'un tiroir...

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. **Robert MOCHKOVITCH** est astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris.

J. AUDOUZE et **J.-P. CHIÈZE**, *Enquête sur l'Univers*, Nathan, 1990.

Ph. SCHAFF et **L. CHEVALIER**, *L'or vert*, Éditions de La Martinière, 1996.



Graphes et chorégraphes

IAN STEWART

Construire des polyèdres avec de la ficelle.

Le jeu de la ficelle intéresse les amateurs de jeux mathématiques, parce qu'il conduit à de remarquables figures géométriques : on passe autour des poignets une boucle de ficelle qu'on manipule ensuite avec les poignets, les doigts ou les dents, afin de reproduire un motif ; parfois on raconte une histoire dont les épisodes sont illustrés par les motifs de la ficelle.

Une théorie mathématique de ces figures est-elle possible ? Plusieurs formalisations des figures réalisées ont été proposées, mais des chorégraphes américains ont fait mieux : ils ont trouvé une relation inattendue entre figures de ficelle, mathématiques et... danse.

Les arts ont souvent recours, implicitement ou explicitement, aux mathématiques : la perspective, en peinture, n'est autre que de la géométrie, tout comme la réalisation de pavages ; la sculpture a

fait usage de rapports entre nombres ; les gammes musicales résultent de divisions astucieuses des intervalles sonores, et les sonneries de cloches font usage des mathématiques combinatoires. Toutefois, à ma connaissance, les mathématiques n'avaient été appliquées à la danse que par mon collègue Christopher Budd, de l'Université de Bath, pour analyser les danses folkloriques anglaises.

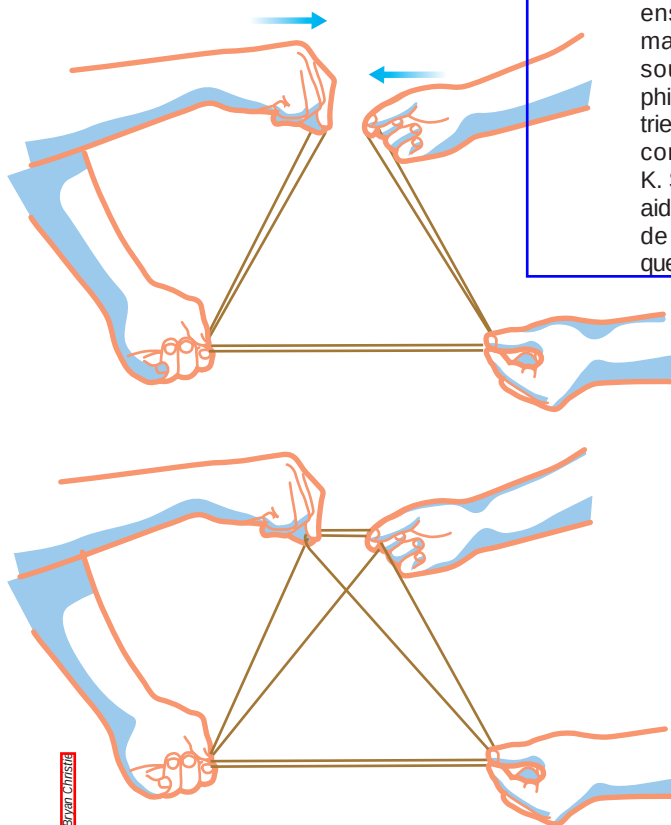
Karl Schaffer, cofondateur d'un ensemble chorégraphique de Santa Cruz, utilise les mathématiques pour créer des danses. Plusieurs de ses spectacles sont fondés sur l'utilisation de boucles de ficelle, avec lesquelles il organise la construction des polyèdres réguliers et d'autres figures mathématiques.

Avec son ami Scott Kim, il s'est initialement intéressé aux figures de ficelle polyédriques, alors qu'ils concevaient un spectacle nommé *Dans la boucle*, à la quête du carré parfait. Cet ensemble de cinq « danses mathématiques » présente, sous une forme chorégraphique, des idées de géométrie et de symétrie. Lors de la conception du spectacle, K. Schaffer et S. Kim se firent aider d'un amateur des figures de ficelle qui leur enseigna quelques danses traditionnelles

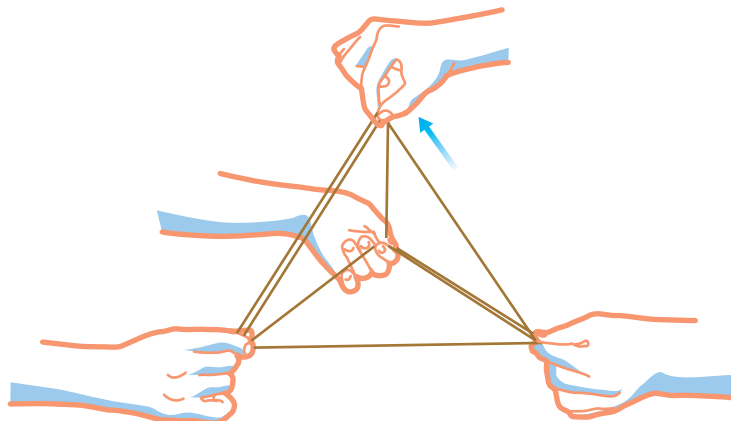
avec figures de ficelle pour deux danseurs. Puis K. Schaffer et S. Kim inventèrent de nouvelles danses fondées sur des structures à trois dimensions, tels les polyèdres.

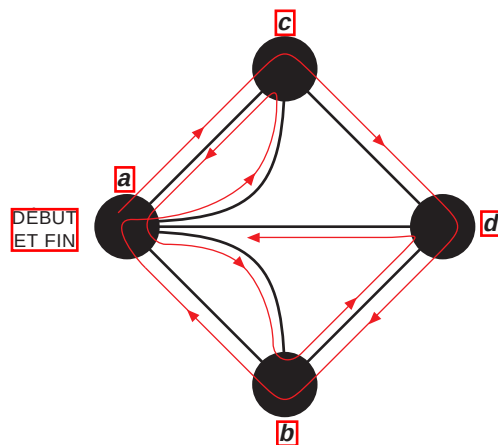
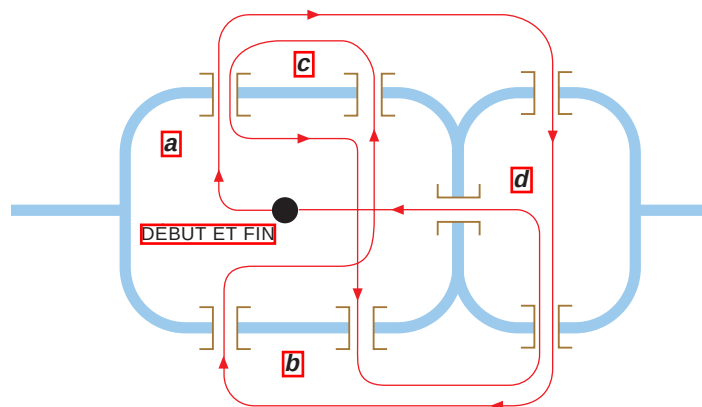
La figure 1 montre comment deux danseurs peuvent réaliser un tétraèdre, à partir d'une seule boucle de ficelle. Le danseur 1, à gauche, et le danseur 2, à droite, tiennent initialement chacun la boucle en un point, de la main droite, de sorte que leurs mains droites soient reliées par deux brins parallèles. De la main gauche, ils prennent alors les deux brins à une vingtaine de centimètres de la main droite. Simultanément le danseur 1 avance la main droite vers le danseur 2, en la remontant, et le danseur 2 fait un mouvement symétrique. Puis les deux danseurs rassemblent leurs mains droites jusqu'à ce qu'elles se touchent. Chacun utilise alors sa main droite pour prendre un brin de la partie tenue par l'autre danseur, tout en conservant un brin. Le danseur 1 fait alors glisser sa main selon le double brin qu'il tient, prenant la position de la troisième image, et le danseur 2 lève la main droite. Ils obtiennent ainsi un tétraèdre régulier, avec deux arêtes composées de deux brins de ficelle.

De même, six danseurs tenant six boucles de ficelle ou de caoutchouc peuvent former le cubo-octaèdre, un polyèdre semi-régulier à six faces carrées et



1. La construction à quatre mains d'un tétraèdre de ficelle.





BRUNO CHASSE

2. Le problème des sept ponts de Königsberg et son graphe : les points noirs représentent les masses terrestres, et les arêtes noires, les ponts.

huit faces triangulaires. Une danse encore plus complexe commence avec une seule longue boucle tenue par trois personnes : la boucle a d'abord une forme de triangle, mais elle est ensuite transformée en tétraèdre, puis en octaèdre (un solide à huit faces triangulaires). Puis un quatrième danseur se joint au groupe et participe à la transformation de l'octaèdre en cube. Enfin six danseurs viennent déformer le cube pour obtenir un dodécaèdre (à 12 faces pentagonales), puis un icosaèdre (20 faces triangulaires). Les cinq solides platoniciens (les polyèdres réguliers que sont le tétraèdre, le cube, l'octaèdre, le dodécaèdre et l'icosaèdre) sont ainsi tous représentés.

Ces danses avec des figures de ficelle posent des problèmes qui se rapprochent de ceux qui ont engendré la topologie. Quelles arêtes des polyèdres réalisés doivent-elles être doublées, par exemple ? Ce type de question s'analyse en termes de «cycles eulériens» dans les graphes. Un graphe est un ensemble de points, ou sommets, reliés par des segments, ou arêtes. Un cycle eulérien est un chemin fermé, ou circuit, qui passe une fois et une seule par toutes les arêtes du graphe (on ne le confondra pas avec un circuit hamiltonien, qui passe une fois et une seule par chaque sommet). On peut représenter une danse par un graphe si l'on fait correspondre des sommets aux mains des participants, et des arêtes aux parties de ficelle qui forment les polyèdres. Certaines des arêtes de polyèdres sont composées de plusieurs brins de ficelle. Pourquoi ? Les danseurs peuvent-ils former les polyèdres avec seulement un brin de ficelle par arête ?

Généralement non. Supposons que l'on forme un polyèdre en n'utilisant qu'une boucle de ficelle. Celle-ci forme un cycle qui passe par tous les sommets du polyèdre. Or, en 1735, le mathématicien suisse Leonhard Euler rencontra une structure

analogue quand il étudia le problème des sept ponts de Königsberg : la ville de Königsberg (aujourd'hui Kaliningrad, en Russie) est construite sur une rivière, la Pregel, et comprend deux îles. À l'époque d'Euler, sept ponts reliaient les îles aux rives ou entre elles (voir la figure 2). On raconte que les habitants avaient cherché pendant longtemps un circuit passant sur chacun de ces ponts une fois et une seule. Euler démontra qu'un tel circuit n'existait pas.

Comment obtint-il ce résultat ? Il considéra d'abord les quatre masses terrestres – les deux îles (a et d) et les deux rives (b et c) –, qu'il associa aux sommets d'un graphe ; puis il associa les sept ponts à des arêtes entre ces sommets. Ayant ainsi transformé le problème en un problème de théorie des graphes, Euler montra que si une boucle passe une fois et une seule par chaque arête, alors un nombre pair d'arêtes arrive à chaque sommet. En effet, comme le chemin considéré est un cycle, chaque fois que la boucle arrive à un sommet par une arête, elle doit le quitter par une autre arête. Les arêtes sont ainsi appariées, et le nombre total d'arêtes reliées à chaque sommet est pair. Cette condition de parité n'est pas vérifiée à Königsberg où, à chaque «sommet»,

arrivent des arêtes en nombre impair (trois ou cinq, selon les sommets).

Euler fit mieux, en démontrant le résultat réciproque : dans tout graphe connexe (c'est-à-dire d'un seul tenant) où chaque sommet est relié à un nombre pair d'arêtes, il existe un circuit qui passe par chaque arête une fois et une seule. Ce théorème explique les arêtes doublées dans les danses avec de la ficelle.

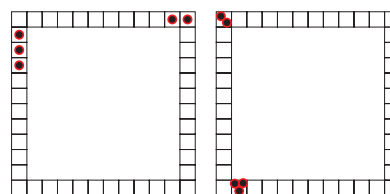
Considérons, par exemple, le dodécaèdre, à 20 sommets reliés par 30 arêtes. Comme trois arêtes (un nombre impair) arrivent à chaque sommet, il n'existe pas de circuit qui passe par chaque arête une fois et une seule. En revanche, quand une de ces trois arêtes est «doublée», quatre arêtes (un nombre pair) arrivent à chaque sommet. Pouvez-vous identifier dix arêtes telles que, si on les double, quatre arêtes arrivent à chaque sommet ? Sinon, vous pourriez les doubler toutes : six arêtes arriveraient alors à chaque sommet. Mais un si grand nombre est-il nécessaire ?

Comme cet exemple le montre, les danses avec des figures de ficelle peuvent constituer d'instructives introductions à la géométrie dans l'espace à trois dimensions. Ce sont aussi des jeux très amusants : essayez-les la prochaine fois que vous serez dans une réunion ennuyeuse.

Réactions

Dans mon article intitulé *Chœurs lumineux* (Pour la Science, mai 1999), je demandais si, dans le jeu du flash, on pourrait trouver des configurations qui, au lieu d'évoluer vers un synchronisme des lucioles, aboutiraient à des cycles, les jetons étant répartis sur plusieurs cases. Cette situation n'a pas lieu dans le modèle mathématique de la synchronisation des lucioles, mais elle se rencontre dans le Jeu du flash, qui est discontinu. William Evans, d'Irvine, a découvert que si le damier a douze

cases de côté, avec cinq lucioles, une position initiale (ci-dessous à gauche) évolue, après 27 coups, vers une seconde configuration (à droite) qui se répète avec une période égale à 38 coups.





Un nombre premier à 50 000 \$

JEAN-PAUL DELAHAYE

En utilisant des milliers d'ordinateurs oisifs, vous avez gratuitement une énorme puissance de calcul.

Nayan Hajratwala, de Plymouth (Michigan), vient de prouver avec son ordinateur personnel que $2^{8972593} - 1$ est un nombre premier (c'est-à-dire n'est divisible que par un et par lui-même). C'est le plus grand nombre premier connu, et nous sommes sûr du résultat, car la preuve a été refaite sur un autre ordinateur indépendant.

Le nombre $2^{8972593} - 1$ est un nombre premier de Mersenne, c'est-à-dire de la forme $2^p - 1$. Ces nombres intéressent les mathématiciens depuis longtemps, et celui-ci est le 38^e nombre premier de Mersenne. Il a 2 098 960 chiffres : l'écrire

occuperait, en petits caractères, un numéro complet de *Pour la Science*. Il permet à N. Hajratwala de remporter les 50 000 \$ du prix créé il y a quelques mois pour récompenser la première personne ou équipe proposant un nombre premier de plus de un million de chiffres.

L'ordinateur utilisé pour prouver que ce nombre est premier est un micro-ordinateur banal comme vous en possédez peut-être un. C'est un IBM-Aptiva équipé d'un processeur Pentium II fonctionnant à la vitesse d'horloge de 350 Mhz. L'ordinateur a calculé pendant 111 jours (trois semaines auraient suffi s'il avait calculé

sans s'arrêter). Le calcul n'a pas dérangé son propriétaire, car le programme ne fonctionnait que pendant les périodes où N. Hajratwala laissait sa machine inoccupée (mais branchée!).

N. Hajratwala n'est pas un mathématicien de génie, et il n'est même pas certain qu'il sache précisément ce que fait le programme qui lui a permis de gagner et qu'il a téléchargé sur le site Internet du projet GIMPS : *Great Internet Mersenne Prime Search*.

LA LOTERIE DU CALCUL

Le projet GIMPS a été fondé en janvier 1996 par George Woltman, un informaticien à la retraite qui vit à Orlando, en Floride. Il concentre et organise la puissance de calcul gisant inexploitée dans les milliers d'ordinateurs personnels répartis dans le monde pour améliorer notre connaissance des nombres premiers.

N. Hajratwala a eu de la chance, car il n'était pas le seul à essayer de trouver un nombre premier de plus de un million de chiffres. Les organisateurs du projet GIMPS ont confié des calculs à plus de 21 000 ordinateurs. Chaque participant essayait son propre nombre de Mersenne, lequel, le plus souvent, n'est pas premier : aussi n'avait-il qu'une chance sur 30 000 environ de tomber sur un nombre premier. Ainsi, participer au projet GIMPS avec sa machine revenait à jouer à la loterie : contre le prix de l'électricité nécessaire au fonctionnement de la machine et l'usure que le calcul ininterrompu peut provoquer (tout cela constituant l'équivalent du coût du billet de loterie), vous aviez droit à un exposant (l'équivalent d'un numéro de loterie) qui vous permettait d'espérer le prix.

Le prochain prix sera donné pour un nombre premier de dix millions de chiffres, mais les organisateurs souhaitent d'abord explorer tous les exposants n assez petits pour connaître parfaitement et définitivement quels sont, parmi les nombres

1. MARIN MERSENNE (OIZE 1588 - PARIS 1648)

Après des études chez les oratoriens du Mans, puis chez les jésuites à La Flèche, il prend l'habit des minimes (ordre qui doit son nom au désir que les moines avaient d'être les plus humbles des serviteurs de Dieu). Il enseigne la philosophie à Nevers, puis s'établit à Paris. Il publie divers ouvrages de sciences et de philosophie, dont, en 1624, un livre au titre charmant : *L'impie des déistes, athées et libertins, renversée et confondue*. Il défend la théorie de Galilée contre les critiques des théologiens et s'oppose à l'alchimie et à l'astrologie qu'il dénonce comme pseudo-sciences. Le père Mersenne



entretient une correspondance avec les plus grands savants de son époque : Descartes, Pascal, Torricelli, Gassendi, Hobbes, Huygens, Roberval. Après sa mort, on trouvera dans ses affaires des lettres de 78 savants différents. Il rend visite à Fermat à Toulouse et c'est le premier physicien à utiliser le pendule pour mesurer l'intensité de la pesanteur. Il conçoit un hygromètre et un télescope à miroir parabolique, il découvre la loi des tuyaux sonores et des cordes vibrantes, ce qui lui permet de comprendre le rapport entre la hauteur des notes de la gamme musicale et la fréquence, il mesure aussi la vitesse du son.

Mersenne affirme en 1644 que $M_p = 2^p - 1$ est un nombre premier pour p égal à 2, 3, 5, 7, 13, 17, 19, 31, 67, 127, 257, et composé, pour les autres exposants, jusqu'à 257. Persuvin et Seelhoff relèvent, en 1886, une première erreur dans la liste de Mersenne : ils prouvent que M_{61} est premier. Quatre autres erreurs sont découvertes par la suite : M_{67} et M_{257} ne sont pas premiers, alors que M_{89} et M_{107} le sont. On ignore encore si, parmi les nombres de la forme $M_p = 2^p - 1$ avec p premier (les nombres de Mersenne), il y en a une infinité de premiers. On ignore aussi s'il y a une infinité de nombres de Mersenne composés. Bien sûr, l'une au moins des affirmations est vraie, probablement les deux.

de la forme $2^n - 1$, ceux qui sont premiers. Ils souhaitent savoir si le nombre trouvé par N. Hajratwala n'est pas précédé par d'autres nombres de Mersenne premiers.

La puissance de calcul obtenue par le système de répartition des tâches de GIMPS via l'Internet est impressionnante. On l'évalue à 700 milliards d'opérations en virgule flottante par seconde, soit l'équivalent des plus puissants ordinateurs vectoriels actuels, tel le CRAY T932.

Les machines utilisées aujourd'hui pour la prévision météorologique et le calcul scientifique coûtent des fortunes, et il est hors de question de les faire travailler à la recherche de nombres premiers pendant des mois d'affilée! Sans le calcul réparti, ce calcul de nombres

de Mersenne n'aurait sans doute pas abouti avant une dizaine d'années.

Si les organisateurs du projet GIMPS devaient acheter leurs calculs auprès de grands centres informatiques, cela leur coûterait environ 200 000 \$ par jour. Il est heureux que ce calcul ait été gratuit, sinon les organisateurs auraient dépensé plus que les 50 000 \$ du prix.

Certains algorithmes au cœur du programme que chaque participant au projet GIMPS installe sur sa machine et fait fonctionner quand il ne s'en sert pas sont assez anciens, d'autres ont été récemment perfectionnés. On évalue qu'avec les algorithmes actuels le prochain prix (pour un nombre premier de dix millions de chiffres) demandera 125 fois plus de calculs. On disposera de cette ressource de calculs grâce à la puissance accrue

des prochains microprocesseurs et par l'augmentation de leur nombre. Si l'on attend les progrès des microprocesseurs, il faudra sept doublings de puissance, soit, à raison d'un doublement tous les 18 mois (loi de Moore), environ dix ans. Si l'on incitait tous les possesseurs de micro-ordinateurs de la Terre à participer au projet, alors l'affaire pourrait être réglée en quelques semaines. Le prochain prix tombera, par une combinaison des deux méthodes, dans trois à quatre ans.

LES NOMBRES PARFAITS

A chaque nombre premier de Mersenne correspond un nombre parfait, un nombre égal à la somme de ses diviseurs (autres que lui-même) : au nombre premier de Mersenne $2^n - 1$ correspond le nombre

2. LES NOMBRES PREMIERS DE MERSENNE

Les nombres premiers $M_p = 2^p - 1$, dénommés nombres premiers de Mersenne, connus aujourd'hui sont :

n	p	année du calcul	auteur du calcul
1	2		
2	3		
3	5		
4	7		
5	13		
6	17	1588	P. Cataldi
7	19	1588	P. Cataldi
8	31	1750	L. Euler
9	61	1883	I. Pervushin
10	89	1911	R. Powers
11	107	1913	E. Fauquembergue
12	127	1876	E. Lucas
13	521	1952	R. Robinson
14	607	1952	R. Robinson
15	1279	1952	R. Robinson
16	2203	1952	R. Robinson
17	2281	1952	R. Robinson
18	3217	1957	H. Riesel
19	4253	1961	A. Hurwitz
20	4423	1961	A. Hurwitz
21	9689	1963	D. Gillies
22	9941	1963	D. Gillies
23	11213	1963	D. Gillies
24	19937	1971	B. Tuckerman
25	21701	1978	L. Noll et L. Nickel
26	23209	1979	L. Noll
27	44497	1979	H. Nelson et D. Slowinski
28	86243	1982	D. Slowinski
29	110503	1988	W. Colquitt et L. Welsh
30	132049	1983	D. Slowinski
31	216091	1988	D. Slowinski
32	756839	1992	D. Slowinski
33	859433	1994	D. Slowinski et Gage
34	1257787	1996	D. Slowinski et Gage
35	1398269	1996	Woltman, Armengaud (GIMPS)
36	2976221	1997	Woltman, Spence (GIMPS)
37	3021377	1998	Woltman et al. (GIMPS)
38	8972593	1999	Woltman et al. (GIMPS)

3. NOMBRES PREMIERS RECORDS

Le plus grand nombre premier obtenu avec et sans ordinateurs (d'après C. Caldwell)

nombre de chiffres	nombre	année	auteur	méthode
$2^{17} - 1$	6	1588?	Cataldi	Division
$2^{19} - 1$	6	1588?	Cataldi	Division
$2^{31} - 1$	10	1772?	Euler	Division et raisonnement
$(2^{59} - 1)/179951$	13	1867	Landry	Division et raisonnement
$2^{127} - 1$	39	1876	Lucas	Suite de Lucas
$(2^{148} + 1)/17$	44	1951	Ferrier	Théorème de Proth
		ordinateurs	auteur ou équipe	
$180(M_{127})^2 + 1$	79	1951	EDSAC1	Miller & Wheeler
M_{521}	157	1952	SWAC	Robinson (30 janv.)
M_{607}	183	1952	SWAC	Robinson (30 janv.)
M_{1279}	386	1952	SWAC	Robinson (25 juin)
M_{2203}	664	1952	SWAC	Robinson (7 oct.)
M_{2281}	687	1952	SWAC	Robinson (9 oct.)
M_{3217}	969	1957	BESK	Riesel
M_{4253}	1281	1961	IBM7090	Hurwitz
M_{4423}	1332	1961	IBM7090	Hurwitz
M_{9689}	2917	1963	ILLIAC 2	Gillies
M_{9941}	2993	1963	ILLIAC 2	Gillies
M_{11213}	3376	1963	ILLIAC 2	Gillies
M_{19937}	6002	1971	IBM360/91	Tuckerman
M_{21701}	6533	1978	Cyber 174	Noll et Nickel
M_{23209}	6987	1979	Cyber 174	Noll
M_{44497}	13395	1979	Cray 1	Nelson et Slowinski
M_{86243}	25962	1982	Cray 1	Slowinski
M_{132049}	39751	1983	Cray X-MP	Slowinski
M_{216091}	65050	1985	Cray X-MP	Slowinski
$391581 \cdot 2^{216193} + 1$	65087	1989	Amdahl	Brown et al
M_{756839}	227832	1992	Cray-2	Slowinski et Gage
M_{859433}	258716	1994	Cray C90	Slowinski et Gage
$M_{1257787}$	378632	1996	Cray T94	Slowinski et Gage
$M_{1398269}$	420921	1996	Pentium	GIMPS
$M_{2976221}$	895932	1997	Pentium	GIMPS
$M_{3021377}$	909526	1998	Pentium	GIMPS
$M_{8972593}$	2098960	1999	Pentium II	GIMPS

4. POUR QUE M_p SOIT PREMIER, IL FAUT QUE p SOIT PREMIER

Pour qu'un nombre de la forme $2^p - 1 = M_p$ soit un nombre premier, il faut que p soit un nombre premier (cette condition n'est pas suffisante).

En effet, si p est composé, $p = a.b$ avec $a > 1$ $b > 1$, alors on utilise l'identité :

$$X^n - 1 = (X - 1)(X^{n-1} + X^{n-2} + \dots + X^2 + X + 1)$$

qui, en prenant $X = 2^a$ et $n = b$, donne :

$$2^p - 1 = 2^{ab} - 1 = (2^a)^b - 1 = (2^a - 1)((2^a)^{b-1} + (2^a)^{b-2} + \dots + (2^a) + 1).$$

Si la condition était suffisante, on aurait une formule simple donnant une infinité de nombres premiers.

parfait $2^{n-1}(2^n - 1)$. On montre que, réciproquement, tout nombre parfait pair s'obtient à partir d'un nombre premier de Mersenne. Pour n égal à 2, $2^n - 1 = 3$ est premier et donc $2^{n-1}(2^n - 1) = 6$ est un nombre parfait pair ($6 = 1 + 2 + 3$). Pour n égal à 3, $2^n - 1 = 7$ est un nombre premier et $2^{n-1}(2^n - 1) = 28$ est un nombre parfait ($28 = 1 + 2 + 4 + 7 + 14$).

Le nombre parfait pair associé au nouveau nombre premier de Mersenne possède 4 197 919 chiffres. C'est bien sûr le plus grand nombre parfait connu. On ignore s'il existe une infinité de nombres parfaits pairs. Plus amusant, bien que le problème soit connu depuis plus de 2 500 ans, on ne sait pas s'il existe des nombres parfaits impairs. Personne n'en a jamais trouvé, personne n'a démontré qu'il n'en existait pas !

L'HISTOIRE DU PLUS GRAND NOMBRE PREMIER

Revenons sur l'histoire des nombres premiers records pour prendre conscience, en suivant ces records, comme ceux concernant les décimales de π , de l'explosion récente des connaissances mathématiques et techniques : pendant des siècles, tout a été très lent, puis, en quelques années, une série de résultats mathématiques et d'avancées techniques nous a fait formidablement progresser.

Avant le xvi^e siècle, il est impossible de dresser la table précise des records du «plus grand nombre premier» : trop peu de documents nous sont parvenus, et il est impossible de valider une affirmation de primalité quand elle n'est pas accompagnée d'un minimum de justifications. S'il suffisait à un mathématicien de dire que tel nombre est premier pour que l'on considère que ledit mathématicien détient

le record du plus grand nombre premier, alors, en affirmant que tous les nombres de Mersenne ($M_p = 2^p - 1$, avec p premier) sont premiers, on détiendrait le record jusqu'à la fin des temps : il est vraisemblable que, parmi ces nombres, il y en a une infinité de premiers et donc, même si l'on se trompe pour certains, on aura l'injuste gloire d'avoir proposé une primalité pour un nombre plus grand que ceux connus à un instant donné.

L'histoire du plus grand nombre premier commence donc à la fin du xvi^e siècle. En 1588, Pietro Cataldi vérifie que $M_{17} = 2^{17} - 1 = 131\,071$ et $M_{19} = 2^{19} - 1 = 524\,287$ sont premiers. La table de nombres premiers qu'il a établie jusqu'à l'entier 750 suggère qu'il a bien fait les calculs nécessaires pour prouver la primalité de ces deux nombres en utilisant la méthode des divisions (on s'assure qu'aucune division de l'entier M par un nombre premier inférieur à la racine carrée de M ne tombe juste). Malheureusement, Cataldi indique aussi que $M_n = 2^n - 1$ est premier pour $n = 23, 29, 31$ et 37 . Or c'est faux, sauf pour 31.

En 1640, Fermat, utilisant sa découverte que si p est impair et premier alors les diviseurs premiers de $2^p - 1$ sont de la forme $2kp + 1$, montre la fausseté des affirmations de Cataldi pour $n = 23$ et 37 .

Euler montre plus tard encore que, pour 31, Cataldi avait raison et que, pour 29, il se trompait. Assez étrangement, les facteurs trouvés pour 23, 29 et 37 sont assez petits, et donc, si Cataldi avait utilisé sa table systématiquement, il aurait dû les découvrir. Cela rend suspects ses affirmations pour 17 et 19.

La méthode d'Euler, qui prouve que Cataldi a raison pour $n = 31$, consiste à établir, dans un premier temps, que les diviseurs premiers de $2^{31} - 1 = 2147483647$

sont nécessairement de la forme $248n + 1$ ou $248n + 63$, puis, dans un second temps, à exploiter ce résultat en opérant une série judicieuse et limitée de divisions.

La leçon de l'histoire du plus grand nombre premier est que tout progrès résulte de l'amélioration des méthodes plutôt que de l'obstination de calculateurs fous, prêts à mener des suites d'opérations de plus en plus longues et pénibles.

Les derniers records où l'on fait calculer des réseaux de très nombreuses machines ne contredisent pas le principe que le record du plus grand nombre premier est le fruit de l'intelligence et de l'innovation. Si, dans les derniers calculs du projet GIMPS, la nouveauté n'est pas strictement mathématique, elle réside dans la maîtrise et dans l'application optimisée et organisée à grande échelle d'une technique nouvelle, où il n'est pas plus facile d'être le meilleur qu'en mathématiques.

Le record suivant de Landry en 1867 est obtenu avec $(2^{59} - 1)/179\,951 = 3\,203\,431\,780\,337$. Ce record doit être remarqué, car ce nombre premier n'est pas un nombre de Mersenne et c'est, parmi les nombres records qui ne sont pas des nombres de Mersenne, celui qui a tenu le plus longtemps : neuf ans.

En 1876, le Français Édouard Lucas propose une méthode plus efficace encore que celles de Fermat et d'Euler pour tester si un nombre de Mersenne est premier. Cette méthode, simplifiée par Lehmer dans les années 1930, est encore utilisée aujourd'hui pour les records de plus grands nombres premiers.

Le nombre prouvé premier par Lucas en 1876 est : $2^{127} - 1$ et il restera le plus grand nombre premier connu pendant 75 ans, jusqu'en 1951. C'est à cette date que Ferrier, à l'aide d'une machine à calculer mécanique de bureau, améliore le record de Lucas en découvrant un nombre premier de 44 chiffres : $(2^{148} + 1)/17$.

LES ORDINATEURS S'Y METTENT

Commence alors le temps des machines électroniques, dont la naissance dans les années 1940 permet d'aller plus loin grâce aux progrès technologiques (rapidité, fiabilité et puissance des circuits), à des innovations dans les algorithmes mathématiques de manipulation des grands nombres et à une meilleure maîtrise des langages de programmation.

En 1951, Miller et D. Wheeler prouvent, à l'aide de l'ordinateur EDSAC qui est moins puissant que nos calculatrices de poche d'aujourd'hui, puisqu'il dispose seulement d'une mémoire de 5 kilo-octets, que les nombres suivants sont premiers : $k M_{127} + 1$ pour $k = 114, 124, 388, 408, 498, 696, 738, 744, 780, 934$ et 978 .

5. MÉTHODES POUR PROUVER LA PRIMALITÉ DES GRANDS NOMBRES

Le test de Lucas-Lehmer

$2^p - 1$ est un nombre premier si et seulement si $2^p - 1$ divise $S(p - 1)$ avec $S(1) = 4$ et $S(n + 1) = S(n)^2 - 2$ pour $n > 1$.

Le théorème de Proth (1878)

Si N est de la forme $N = k.2^n + 1$ avec $k < 2^n$ et s'il existe un nombre entier a tel que : $a^{(N-1)/2} + 1 \equiv 0 \pmod{N}$, alors : N est premier.

Ces deux chercheurs découvrent aussi que le nombre de 79 chiffres suivant est premier : $180 (M_{127})^2 + 1 = 180(2^{127} - 1)^2 + 1$. Ce nombre ne gardera le titre que peu de temps. L'année suivante, Raphaël Robinson écrit, pour l'ordinateur SWAC, son premier programme, qui marche du premier coup (!) et découvre, dans la journée du 30 janvier 1951, deux nouveaux nombres de Mersenne premiers (M_{521} , M_{607}). Les autres sont découverts le 25 juin (M_{1279}), le 7 octobre (M_{2203}) et le 9 octobre (M_{2281}).

En 1957, H. Riesel découvre que M_{3217} est premier à l'aide de l'ordinateur suédois BESK. De son côté, A. Hurwitz découvre que M_{4253} et M_{4423} sont premiers à l'aide d'un IBM7090. D. Gillies avec un ILLIAC-2 prouve la primalité de M_{9689} , M_{9941} et M_{11213} , et B. Tuckerman utilisant le célèbre IBM 360 met à jour le nombre premier M_{19937} qui comporte 6 002 chiffres.

Le calcul de Hurwitz pose un problème philosophique étrange. Hurwitz, à cause de l'ordre dans lequel la machine faisait apparaître les résultats, prit connaissance de la primalité de M_{4423} quelques secondes avant de lire que M_{4253} est aussi premier. Seul l'ordinateur IBM 7090 a cru que M_{4253} était premier avant d'afficher que M_{4423} était premier. Peut-on considérer que M_{4253} est un nombre premier record et faut-il l'indiquer dans les tables ?

J'ai choisi de faire apparaître M_{4253} dans la table des records de nombres premiers les plus longs. Cela revient à attribuer la découverte à l'ordinateur lui-même, ce qui choquera tous ceux qui croient qu'un ordinateur ne pense pas et donc ne découvre pas. Même si l'ordinateur IBM n'a pas eu conscience de sa découverte, je crois qu'il faut avoir un peu plus de considération et d'estime pour cette nouvelle espèce à laquelle nous donnons naissance et qui nous rend tant de services.

Les derniers records mentionnés dans la table proviennent du projet GIMPS qui, avant le succès de N. Hajratwala, avait déjà découvert trois nombres premiers de Mersenne grâce aux ordinateurs de Joël Armengaud (novembre 1996), de George Spence (août 1997), et de Roland Clarkson (janvier 1998). Ce dernier est un jeune étudiant de 19 ans dont l'ordinateur a découvert la primalité de $M_{3021377}$, un nombre de 909 526 chiffres.

UN MÉCÈNE DONNE UN DEMI-MILLION DE DOLLARS

Ces premières découvertes furent faites uniquement pour la beauté de l'art, car c'est seulement en mars 1999 que le prix dont nous avons parlé a été créé par l'EFF. L'Electronic Frontier Foundation est une association de défense

et de promotion de l'utilisation de l'Internet. À la suite du don d'un mécène anonyme, un prix de 50 000 \$ (environ 300 000 F) a été promis au premier individu ou groupe qui découvrirait un nombre premier de plus d'un million de chiffres décimaux. C'est ce prix que N. Hajratwala vient de gagner ; 100 000 \$ récompenseront la découverte du premier nombre premier de plus de dix millions de chiffres décimaux, 150 000 \$ la découverte du premier nombre premier de plus de 100 millions de chiffres décimaux, et 250 000 \$ le premier nombre premier de plus d'un milliard de chiffres décimaux. Soit un total d'un demi-million de dollars si vous gagnez tous les prix d'un coup.

Les règles précises de ce concours sont intéressantes (démonstrations contrôlables, calculs reproductibles, publications reconnues, confirmations par des experts), car elles traduisent ce qu'on sait

aujourd'hui sur la génération des nombres premiers, sur les formules pour créer des nombres premiers et sur les preuves de primalité. Ces règles intéresseront les amateurs qui, persuadés d'avoir trouvé des résultats importants sur les nombres premiers, s'interrogent sur la façon de faire reconnaître et valider leurs découvertes.

Les organisateurs du concours demandent que tout prétendant à l'un des prix fournisse une définition précise du nombre gagnant : pas question de proposer un nombre en disant que c'est la solution d'un système de 100 équations compliquées, même si l'on précise lesquelles ! Le prétendant doit aussi indiquer la méthode de preuve qui assure la primalité du nombre proposé, laquelle doit pouvoir être mise en œuvre par d'autres chercheurs.

Les tests de primalité probabilistes (qui indiquent qu'un nombre est premier avec une probabilité de 99,99 pour cent, par

6. LA FORMULE DE MARCEL PAGNOL

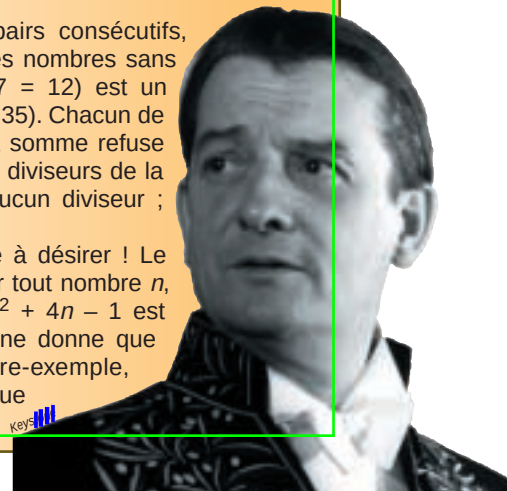
En 1992, Jacqueline et Frédéric Pagnol ont publié le texte de notes inédites que leur époux et père, le grand écrivain Marcel Pagnol, avait laissées. L'ouvrage, paru aux Éditions Pastorelly, porte le titre paradoxal *Inédits* et contient quelques pages sur les nombres premiers que l'amateur de mathématiques qu'était Marcel Pagnol avait soigneusement conservées. L'éditeur, dans un court texte de présentation, précise que "le conteur merveilleux est aussi un mathématicien rigoureux qui s'attaque aux problèmes les plus ardu, tels que les nombres premiers". Conscient peut-être de ce que ses notes comportaient un aspect conjectural et risqué, Pagnol les avait gardées pour lui. Leur naïveté étonne et "nous fend le cœur". En voici le texte, qui m'a été signalé par Paul Perbost.

«Quoique je ne sois pas mathématicien, j'aime les chiffres et les nombres, et surtout les nombres premiers qui sont assez mystérieux. Je crois avoir trouvé une formule qui permet de fabriquer des nombres premiers : c'est la petite équation suivante. x et $(x + 2)$ sont deux impairs consécutifs, comme 5 et 7 ou 17 et 19, etc. $x + (x + 2) + x(x + 2)$ = premier ; $(5 + 7) + (5 \times 7) = 47$. C'est-à-dire que la somme de deux impairs consécutifs et de leur produit est un premier. Nous avons donc une formule qui nous permet de construire des nombres premiers, et un moyen très simple de confirmer l'exactitude de nos calculs. $15 + 17 + 15 \times 17 = 287$ premier.»

Si Pagnol avait essayé 9 et 11, il aurait trouvé que $9 + 11 + 9 \times 11 = 119 = 7 \times 17$. Suivent d'autres exemples et calculs, où étrangement Marcel Pagnol semble prouver que, pour $x = 55$, le nombre obtenu par sa formule, 3 247, est premier alors que pourtant $3\,247 = 17 \times 191$. Pagnol entreprend de démontrer sa formule.

«Pourquoi la première formule, de deux impairs consécutifs, nous donne-t-elle des premiers, c'est-à-dire des nombres sans diviseurs ? C'est parce que la somme $(5 + 7 = 12)$ est un nombre pair, et le produit est un impair $(7 \times 5 = 35)$. Chacun de ses nombres a son (ou ses) diviseur(s). Or, la somme refuse les diviseurs du produit, et le produit refuse les diviseurs de la somme, et le total des deux n'admet donc aucun diviseur ; c'est donc un nombre premier.»

Vous conviendrez que ce raisonnement laisse à désirer ! Le théorème que M. Pagnol propose est que, pour tout nombre n , $(2n - 1) + (2n + 1) + (2n + 1)(2n - 1) = 4n^2 + 4n - 1$ est premier. On sait prouver qu'aucun polynôme ne donne que des nombres premiers. Même sans contre-exemple, Pagnol, s'il avait connu ce résultat, aurait su que sa conjecture était fausse.



exemple) sont exclus par les organisateurs. Je trouve cette option discutable, car un test probabiliste fait de telle façon qu'il ne reste qu'une probabilité d'erreur inférieure à 10^{-1000} serait aussi sûr qu'un test fait (même plusieurs fois) sur des machines qui ont chacune une probabilité de mauvais fonctionnement supérieure à 10^{-100} . Cette clause n'est toutefois pas pénalisante, car les tests probabilistes ne savent pas traiter efficacement des nombres de plusieurs millions de chiffres.

Il n'est pas impossible et pas interdit par les règles du concours EFF que quelqu'un réclame le prix en proposant non pas un long calcul, mais une formule facilement exploitable $f(n)$ (voir l'article de janvier 1999 de cette rubrique sur les formules pour les nombres premiers) avec la démonstration mathématique que, pour toute valeur du paramètre n , la formule $f(n)$ produit un nombre premier.

Si, par exemple, la formule de Marcel Pagnol $4n^2 + 4n - 1$ avait été correcte, comme c'est une formule simple à mettre en œuvre pour obtenir des nombres de un million, dix millions, cent millions, et même un milliard de chiffres, le grand écrivain aurait pu (aidé d'un informaticien pour expliciter les développements décimaux de ses propositions) réclamer d'un coup tous les prix offerts par l'EFF. Si vous détenez une telle formule, vous êtes riche.

Pour qu'un prétendant gagne un prix, l'annonce de son résultat, avec un minimum de précisions sur la méthode permettant de prouver la primalité, doit être publiée dans une revue académique. De telles revues procèdent à l'expertise préalable des articles publiés en les soumettant à des spécialistes reconnus. Même si l'article rendant compte du record ne comporte qu'une seule page, il assure que le prix est attribué en accord avec les expertises scientifiques.

Si vous proposez une formule nouvelle, l'article devra comporter la preuve qu'elle donne des nombres premiers et des indications sur son exploitation concrète pour engendrer des nombres premiers de un million de chiffres ou plus. Si quelqu'un proposait une formule simple dont la démonstration qu'elle ne donne que des nombres premiers est complexe (il est fréquent en arithmétique que les démonstrations occupent des dizaines de pages), la vérification pourrait prendre plusieurs mois.

Les organisateurs se réservent la possibilité de demander le développement décimal complet des nombres proposés. Expliciter ce développement décimal pour une formule du genre $3^{1000000} + 17$ n'est pas très facile, mais les spécialistes y arrivent pour des nombres de quelques millions de chiffres.

7. LES DIVISEURS PREMIERS DE M_p

Il est plus facile de démontrer que les nombres de Mersenne sont premiers que d'autres nombres, car un diviseur premier de $2^p - 1 = M_p$ (p premier supérieur à 2) est toujours de la forme $2mp + 1$.

En effet, soit q un diviseur premier de $2^p - 1 = M_p$ (p premier et > 2).

On a : $2^p - 1 \equiv 0 \pmod{q}$, donc $2^p \equiv 1 \pmod{q}$.

Les solutions positives de l'équation $2^x \equiv 1 \pmod{q}$ sont les multiples d'un nombre positif, k , plus petite solution positive de l'équation $2^x \equiv 1 \pmod{q}$ (cela résulte du fait évident que, si x et x' sont deux solutions positives de cette équation, leur différence aussi).

Le plus petit k tel que $2^k \equiv 1 \pmod{q}$ est donc un diviseur de p , c'est-à-dire 1 ou p . Ce ne peut pas être 1, car $2^1 \not\equiv 1 \pmod{q}$, c'est donc p .

En utilisant le petit théorème de Fermat (qui dit que, si q est premier, alors pour tout nombre a qui n'est pas multiple de q , il existe un q positif tel que $a^q \equiv 1 \pmod{q}$) et que le plus petit k positif vérifiant cette équation divise $q - 1$, on en déduit que p divise $q - 1$, autrement dit $q = hp + 1$ pour un certain h . Ce nombre h est pair, car sinon hp serait impair et donc q serait pair, ce qui ne se peut pas puisque q est un diviseur premier d'un nombre impair. Donc $h = 2m$, et donc $q = 2mp + 1$.

Ce théorème permet de déterminer rapidement les M_p qui sont premiers. Ainsi, pour étudier la primalité de $M_{13} = 2^{13} - 1 = 8\,091$, il suffit de tester si ce nombre est divisible par un nombre premier de la forme $26k + 1$ inférieur à $\sqrt{8091} = 90,504$. Les nombres de la forme $26k + 1$ inférieurs à 91 sont 27, 53 et 79. Seuls 53 et 79 sont premiers. Deux divisions suffisent pour prouver que M_{13} est premier.

voire quelques milliards de chiffres. Si votre proposition est simple, on ne vous demandera pas d'en expliciter le développement décimal ; si elle est inhabituelle, alors il faudra que vous prouviez que vous êtes capable de l'exploiter. Si vous avez trouvé une méthode, vous réussirez sans peine à convaincre un spécialiste de vous aider... contre une partie de la récompense.

UN MARCHÉ DU CALCUL ?

Les promoteurs pourraient développer ainsi un marché du temps de calcul. D'une part, chaque propriétaire d'une machine (même de puissance moyenne) n'utilise que très peu la puissance de sa machine et, si on lui proposait quelques francs par jour pour que sa machine travaille quand il ne s'en sert pas, il serait heureux et gagnant (en quelques mois, il récupérerait le prix d'achat de sa machine). D'autre part, de nombreux projets scientifiques pourraient bénéficier de l'existence de ce marché qui éviterait le gâchis formidable de 99 pour cent de la capacité de calcul dont dispose l'humanité.

Des projets fonctionnant aujourd'hui sur le principe du bénévolat ont déjà été mis en place (le projet GIMPS dont nous avons parlé ci-dessus en est un exemple). Ces calculs géants en réseaux auxquels chacun peut associer sa machine portent sur la factorisation de grands entiers, sur la recherche des chiffres binaires de π , sur l'étude détaillée de signaux radio provenant du ciel pour y

découvrir d'éventuels signes d'intelligence extraterrestre (projet SETI), sur le craquage de codes cryptographiques créés par défi ou par des firmes qui veulent montrer qu'elles vendent des méthodes résistant aux attaques les plus sérieuses.

Le réseau Internet pourrait changer l'univers de l'information, mais aussi l'univers du commerce. Avec les projets de calculs distribués, il pourrait aussi bouleverser l'univers du calcul pour atteindre des puissances de calcul aujourd'hui réservées aux riches institutions. Il se pourrait aussi que la loi de Moore (doublement de la puissance de calcul tous les 18 mois) puisse par ces moyens être dépassée (doublement tous les 12 mois, voire tous les 6 mois).

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université de Lille.

<http://www.mersenne.org/prime.html> : The Great Internet Mersenne Prime Search. Pour participer à la recherche de nouveaux nombres premiers records.

<http://entropia.com> : organisation dédiée à des projets de calculs distribués.

<http://eff.org> et <http://eff.org/coop-awards/> : à propos des prix proposés par l'Electronic Frontier Foundation.

<http://www.scruznet.com/~luke/mersenne.htm> : à propos de Marin Mersenne.

<http://www.utm.edu/research/primes/> : Le meilleur site internet sur les nombres premiers (C. Caldwell).

Mathématiques

Cours d'algèbre. Primalité. Divisibilité. Codes.

Michel Demazure. Éditions Cassini.

Depuis le XVIII^e siècle, la mécanique, l'électromagnétisme, la thermodynamique, et les théories de la relativité et de la mécanique quantique ont inspiré les travaux des plus grands mathématiciens. Depuis quelque temps, des questions mathématiques bénéficient, de même, d'un nouvel éclairage et de nouveaux moyens d'investigation apportés par l'informatique. Cette dernière est même la source de nouveaux problèmes. Le mathématicien contemporain ne peut plus ignorer que l'arithmétique, longtemps considérée comme la reine des mathématiques pures, est devenue, avec l'apparition de l'informatique, un domaine de mathématiques appliquées.

Le cours d'algèbre de Michel Demazure, paru aux éditions Cassini, est une démonstration de cette transformation.

La première partie, intitulée «Primalité», nous entraîne dans le sillage tracé par Euclide il y a plus de 2 000 ans, lorsqu'il établit l'existence d'une infinité de nombres premiers et qu'il identifia l'algorithme qui porte aujourd'hui son nom, pour le calcul du «plus grand commun diviseur». Les théorèmes de Fermat et d'Euler nous amènent au test de primalité de Miller-Rabin. L'étude des résidus quadratiques (un résidu quadratique modulo un nombre n est un nombre qui est un carré modulo n) se conclut par un autre test de primalité : celui de Solovay. Grâce à la notion de racine primitive, le critère de primalité de Lucas-Lehmer nous permet de découvrir de très grands nombres premiers (le plus grand, découvert il y a un an, comprend près de un million de chiffres décimaux !). Tout cela n'est envisageable qu'à l'aide de la transformation de Fourier rapide, qui fait l'objet d'un chapitre.

La deuxième partie traite de la divisibilité dans les anneaux commutatifs (un anneau est un ensemble dont les éléments peuvent être additionnés ou multipliés ; l'anneau est commutatif si la multiplication est commutative, c'est-à-dire si le produit de deux éléments a et b est égal au produit de b et a). Les notions classiques d'idéaux, d'anneaux quotients, le théorème des restes chinois, les anneaux factoriels et euclidiens y sont abordés (un anneau est factoriel s'il existe une notion de décomposition en facteurs

premiers analogue à celle qui existe pour l'ensemble des entiers).

La dernière partie propose, après avoir traité des corps finis, de leur construction et du problème de la décomposition des polynômes dans ces corps, une présentation des codes correcteurs d'erreurs sans lesquels nous ne pourrions recevoir des images venues du fin fond de l'espace, écouter nos disques laser ou «surfer» sur Internet.

L'originalité de ce cours tient dans sa démarche délibérément algorithmique. Certes, peu d'ouvrage traitant de la notion de PGCD de deux éléments d'un anneau euclidien omettent de mentionner l'algorithme d'Euclide, mais, inversement, peu s'intéressent à la réalisation effective des calculs amenés par cet algorithme. Non seulement de nombreux algorithmes ponctuent ce cours (certains sont même implantés en CAML-Light, langage utilisé dans certaines classes de préparation aux grandes écoles, ou en langage C), mais eux-mêmes, ou les calculs qui sont induits, font l'objet d'études particulières. Car à quoi bon posséder un algorithme s'il n'est pas utilisable en pratique ?

C'est ainsi que sont présentés le calcul rapide de la multiplication des grands entiers, celui des puissances, nécessaires au système de cryptographie RSA. L'ignorance actuelle d'algorithmes efficaces pour tester la primalité des entiers ou pour déterminer leur factorisation amène l'auteur à traiter des algorithmes probabilistes qui font appel au hasard pour mener leurs calculs et supplantent tous les algorithmes déterministes connus. Arrivés là, nous ne sommes plus très loin de l'un des plus célèbres problèmes de l'informatique théorique, à savoir la coïncidence entre la classe des problèmes que l'on peut résoudre en temps polynomial et celle des problèmes dont on peut vérifier une solution en temps polynomial.

Il ne faudrait cependant pas croire que ce cours d'algèbre n'est destiné qu'aux ingénieurs (il est enseigné à l'École polytechnique). Il s'agit bien d'un cours de mathématiques qui ne cède en rien aux canons de la rigueur et qui traite de sujets mathématiques.

À l'heure où l'on parle d'une prochaine réforme de l'enseignement des mathématiques dans l'enseignement secondaire, visant entre autres à introduire des questions liées à l'informatique, comment ne pas conseiller la lecture de cet ouvrage à tous les candidats au CAPES ou à l'agrégation, ainsi qu'à toute personne désireuse de rafraîchir ou de compléter ses connaissances en arithmétique et en algèbre, ou encore de les redécouvrir sous un nouveau jour ?

Éric WĘGRZYŃSKI

Histoire

La Grande Guerre chimique, 1914-1918

Olivier Lepick. Presses universitaires de France.

Les apprentis sorciers : Fritz Haber, Werner von Braun, Edward Teller

Michel Rival. Éditions du Seuil.

Le 26 avril 1915, à 17 heures, l'armée allemande déverse 150 tonnes de chlore, enfermées dans 5 830 cylindres, sur un front de six kilomètres de large, près du village de Langermarck, dans le saillant d'Ypres, au Sud de la Belgique. Un nuage verdâtre, poussé par le vent, se dirige, à la vitesse de deux à trois mètres par seconde, vers les lignes françaises ; dans la panique indescriptible qui s'ensuit, le front français est rompu sur près de deux kilomètres.

C'est ainsi que naquit la «guerre chimique» – l'expression «guerre des gaz» est moins appropriée, car de nombreuses armes chimiques ne sont pas des gaz – qui marqua la mémoire collective européenne. Spécialiste d'histoire militaire, Olivier Lepick donne un ouvrage fondamental sur ce sujet. Le sérieux de son étude n'étonne pas, puisqu'elle fut réalisée dans le cadre d'un doctorat d'histoire ; ce qui surprend très agréablement, c'est la lisibilité parfaite de l'ouvrage et le talent avec lequel l'auteur fait partager ses découvertes.

L'emploi de l'arme chimique durant la «Grande Guerre» fut la réaction à une situation stratégique que les états-majors français et allemands n'avaient pas prévue : on avait misé sur une guerre rapide, avec beaucoup de pertes, car la puissance de feu des belligérants semblait empêcher une guerre longue. Erreur : si les premiers mois ont bien été très meurtriers, ils ont fait sombrer la guerre dans une gigantesque guerre de siège, la «guerre des taupes», où une ligne continue de tranchées séparait les adversaires, de la mer du Nord à la Suisse. L'auteur montre comment, dans l'impasse, les états-majors ont recherché l'arme qui ferait revenir à une guerre de mouvement.

Malgré les conventions internationales qui proscrivaient l'utilisation de «gaz asphyxiants ou délétères», tous les belligérants avaient employé, dans les premiers mois, des munitions chimiques

lacrymogènes et irritantes, analogues aux munitions utilisées par la police pour le maintien de l'ordre en temps de paix ; les résultats avaient été décevants. En Allemagne, le chimiste Fritz Haber (qui avait découvert un procédé de synthèse de l'ammoniac) est l'inspirateur et l'organisateur de l'effort de guerre chimique : il propose d'utiliser le chlore, car ce gaz, puissant irritant des voies respiratoires, provoque une mort rapide quand l'inhalation est importante. L'industrie chimique allemande, alors la plus puissante au monde, peut fournir le chlore en quantité, mais le caractère limité de l'attaque du 22 juin 1915 et de celles qui suivent très vite ne rompt pas le front de manière durable. Plus tard, Haber regrettera que l'on n'ait pas effectué, comme il l'avait proposé, une attaque massive aux gaz «pour sortir de l'impasse de la guerre».

Très vite, la riposte française et britannique s'organise : identification rapide du gaz, prescription de mesures de protection (tampons respiratoires), organisation scientifique de l'effort de guerre chimique, avec la recherche de nouvelles substances toxiques, et mise au point de la fabrication industrielle des munitions correspondantes.

D'avril 1915 à juillet 1917, les gaz de combat sont de plus en plus utilisés, mais leur efficacité décroît ; les masques de protection ont progressé, et les fantassins ont généralement pris des habitudes plus rigoureuses pour leur protection. Aussi, après des tests à la fin de 1916, l'Allemagne utilise, en juillet 1917, le sulfure d'éthylène dichloré, qui sera également connu sous les noms de gaz moutarde (à cause de son odeur) et d'ypérite (c'est près d'Ypres qu'il a été utilisé en juillet 1917). Ce composé, connu depuis 1860, est un liquide huileux, peu volatil, qui attaque les yeux, la peau et les muqueuses en les rongant et en les nécrosant ; l'«effet retard» qu'il présente ajoute à son efficacité diabolique et à son caractère insidieux.

En moins d'un mois, les services scientifiques français identifient le nouvel agent toxique et le font produire en quantités industrielles, malgré des difficultés techniques considérables et les accidents causés par la toxicité du produit. Les premiers bombardements français des lignes allemandes par l'ypérite ont lieu en juin 1918, dévastant les troupes allemandes, surprises par cette réplique qu'ils n'attendaient pas si tôt. Ni la France ni l'Allemagne ne trouveront de parade efficace contre l'ypérite avant la fin de la guerre : les combattants étaient condamnés à s'appliquer des pommades spéciales sur le visage et à porter des vêtements huilés, inconfortables et difficilement conciliables avec



Dans l'angoisse des gaz de combat...

la mobilité nécessaire des fantassins des premières lignes. Un jeune caporal bavarois, un certain Adolf Hitler, a laissé le récit de l'attaque alliée d'octobre 1918 au cours de laquelle l'ypérite l'a gravement intoxiqué et lui a fait perdre la vue pendant plusieurs jours.

Les historiens ont beaucoup discuté les pertes dues à la guerre chimique. Selon O. Lepick, le nombre total des victimes est compris entre 710 000 et 1 000 000, soit 2,3 à 3,2 pour cent du total des victimes militaires ; sur le front occidental, le nombre de morts parmi ces victimes serait de 17 000, soit 0,5 pour cent de l'ensemble des morts dénombrés sur ce front. Les gaz et autres toxiques semblent avoir blessé et invalidé beaucoup plus qu'ils n'ont tué : de nombreuses victimes de guerre durent suivre un traitement médical pendant le reste de leur existence. L'auteur souligne la distorsion entre le nombre réel des victimes et l'idée qui subsista : nombreuses sont les familles qui conservent le souvenir de l'«arrière-grand-père gazé durant la Grande Guerre» alors que, pour l'auteur, il y eut une large confusion entre les ravages de la tuberculose dont ont été atteints de nombreux anciens combattants et les conséquences physiologiques de la guerre chimique.

La majorité des historiens qui se sont intéressés à la guerre chimique ont conclu à l'efficacité remarquable des gaz

de combat, mais il leur manquait des sources que O. Lepick a étudiées et qui conduisent à une conclusion radicalement différente : globalement, malgré quelques réussites locales, ces armes n'ont pas procuré les succès tactiques qui en étaient attendus. L'impact psychologique a été considérable : en plus de ses effets effroyables, l'arme chimique faisait vivre les combattants dans la hantise perpétuelle de son apparition sur le champ de bataille.

Deux précisions. D'une part, en 1933, Haber n'était pas «de confession juive», puisqu'il s'était converti au protestantisme au début du siècle ; cela ne le mettait pas à l'abri des lois raciales nazies, qu'il devancera en 1933 en démissionnant de ses fonctions avec beaucoup de fermeté et de dignité. D'autre part, à ma connaissance, le Zyklon B – qui n'a pas été utilisé en 1915-1918, mais qui sera mis en œuvre dans les camps d'extermination nazis de la Seconde Guerre mondiale – n'est pas le cyanoformiate de méthyle, comme indiqué, mais l'acide cyanhydrique adsorbé sur du Kieselguhr (terre d'infusoires).

La guerre chimique est également un des thèmes du livre de Michel Rival. Cet ouvrage de très bonne vulgarisation d'histoire des sciences est consacré à trois scientifiques de notre siècle qui personifient les applications meurtrières que l'on a tirées ou que l'on pourrait tirer des progrès de la science : l'arme chimique, les fusées et l'arme nucléaire.

La première partie du livre est consacrée à Haber. À côté d'une présentation de la guerre chimique, très claire, bien documentée, mais, bien sûr, plus concise et beaucoup plus générale que celle de O. Lepick, M. Rival donne une étude biographique intéressante de Haber.

Cet homme aura eu deux ambitions principales : réussir une carrière scientifique et s'intégrer à la «bonne société allemande». Son premier objectif sera atteint : malgré un tollé dans les pays qui avaient souffert de la guerre chimique, il recevra le prix Nobel de chimie de 1918 pour ses travaux fondamentaux ayant abouti à la synthèse de l'ammoniac. En outre, après la guerre, et jusqu'en 1933, Haber sera la figure la plus importante de la chimie allemande. Pendant la guerre, il recevra de nombreuses distinctions civiles et militaires, mais sans jamais dépasser le grade de capitaine, alors qu'il aurait rêvé de devenir membre de l'état-major impérial ; dans l'Allemagne impériale déjà, les grades et les positions militaires élevées étaient interdits aux juifs, même convertis...

A quand, en français, une biographie détaillée de Fritz Haber ?

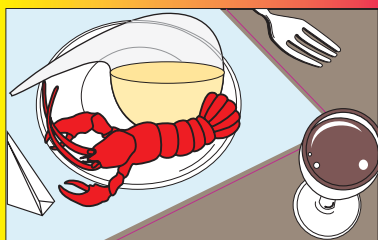
Georges BRAM

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 30 septembre 1999.



Paléontologie

Atlas historique des dinosaures

Mike Benton. Éditions Autrement.

Dire que de nombreux livres sont consacrés aux dinosaures est une litote, et les auteurs, si compétents soient-ils, peuvent éprouver quelques difficultés à trouver une approche originale pour traiter, une nouvelle fois, de ce groupe d'animaux. Les dinosaures sont fascinants, c'est entendu, mais les découvertes nouvelles ont beau s'accumuler, elles ont peine à tenir le rythme de parution des nouveaux livres destinés au grand public.

Mike Benton a judicieusement choisi une présentation jusqu'ici peu utilisée par les « vulgarisateurs », en prenant la géographie pour fil conducteur. Il est vrai que les livres consacrés aux dinosaures donnent parfois l'impression d'une uniformité géographique confondante. Certes, on montre bien au lecteur que le monde des dinosaures a évolué, depuis ses débuts, au Trias supérieur, il y a 230 millions d'années, jusqu'à sa brusque fin, il y a 65 millions d'années. Toutefois, à côté de cette diversité chronologique, la diversité géographique des dinosaures est souvent occultée ; les auteurs se cantonnent à quelques faunes connues depuis longtemps, souvent Nord-américaines, au détriment des autres faunes plus récemment découvertes, et moins classiques. Il en résulte une vue étriquée et biaisée du monde des dinosaures, qui conduit, par exemple, le public à s'étonner lorsqu'il apprend qu'on n'a jamais trouvé de tyrannosaures ou de cératopsiens dans les riches gisements de dinosaures du Crétacé supérieur dans le Sud de la France : ces dinosaures ne sont-ils pas typiques de cette période ? Si ces dinosaures sont typiques de cette période, mais en Amérique du Nord, et non partout.

D'où l'intérêt d'un livre comme celui de M. Benton, qui retrace l'histoire des dinosaures dans le temps, certes, mais aussi dans l'espace. Il raconte cette histoire sous deux angles bien différents : la première partie du livre porte sur les étapes de la découverte de ces animaux disparus, depuis les premières études scientifiques, au début du XIX^e siècle, jusqu'aux trouvailles récentes. C'est une histoire qui reflète, bien sûr, celle la paléontologie en général, avec des débuts en Europe occidentale avant de s'étendre à l'Amérique du Nord, puis à toutes les régions du monde. L'essentiel du livre, cependant,

est consacré à l'histoire évolutive des dinosaures, dans le cadre changeant de géographies successives, modelées par la tectonique des plaques. Pour que les choses soient claires, l'auteur fait d'ailleurs commencer son histoire bien avant les premiers dinosaures, avec les premiers êtres vivants. Ce choix déséquilibre un peu le livre, parce qu'il s'arrête avec la disparition des dinosaures ; le lecteur n'apprend rien sur ce qui s'est passé depuis, notamment sur la diversification des mammifères et des oiseaux. Il est vrai que cette diversification pourrait aussi faire l'objet d'un autre livre.

L'auteur n'a pas tenté d'être exhaustif, et on le lui pardonnera aisément, car il nous a évité un livre excessivement épais. Il a raisonnablement choisi de présenter les grandes lignes de l'histoire des dinosaures, dans le cadre géographique de chaque période de leur existence, puis de se concentrer sur quelques sites, régions ou formations fossilifères particulièrement importants. Le livre se clôt naturellement avec la question de la disparition des dinosaures, l'auteur exprimant assez nettement sa préférence pour l'hypothèse d'un impact par un objet extraterrestre, ce qui change agréablement des présentations évasives, encore trop fréquentes dans les livres destinés au grand public.

Ce livre est un atlas, abondamment illustré de cartes, comme il se doit. Certaines montrent les progrès de la découverte des dinosaures, depuis 200 ans ; la plupart sont des reconstitutions paléogéographiques, qui présentent les répartitions passées des terres et des mers, et la répartitions des sites à dinosaures sur les terres. Ces cartes sont graphiquement claires, mais parfois discutables sur le fond. Ainsi, la carte générale pour le Crétacé supérieur montre une Asie fragmentée en de multiples petites masses continentales, avec l'Asie du Sud-Est isolée quelque part dans le Pacifique, ce qui n'a guère de rapport avec ce que l'on sait vraiment de la répartition des dinosaures asiatiques et de la paléogéographie de cette région du monde à cette époque. Les dinosaures asiatiques ne sont d'ailleurs pas très bien traités dans ce livre, puisque la carte des sites mongols et chinois de la page 127 est fâcheusement incomplète, avec des absences assez graves, telle celle des grands gisements du Shandong et du Yunnan, connus pourtant depuis des décennies. Outre les cartes, le livre est illustré de nombreuses reconstitutions de dinosaures, qui ne sont pas parmi les meilleures que l'on ait vues ; certaines sont erronées.

Malgré ces imperfections, ce livre demeure intéressant, ne serait-ce que par l'originalité de l'approche utilisée. Il faut dire que la paléogéographie est encore loin d'être une science exacte et

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquet, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Marie Hubert. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Bénéteau. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Leïla Bellon, Jean Caelen, Bettina Debü, Paul Decaix, Évelyne Host-Platret, Philippe Ildefonse, Christian Jeanmougin, Marie-France Le Heuzey, Daniel Litaize, Joseph Mariani, Valérie Martin-Rolland, Claude Olivier, Christophe Pichon, Jean-Marie Pierrel, Bruno Savoye.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhushree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer : Joachim Rossler. Vice-President : Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Genette Grémillon : 01 55 42 84 04.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Marie Hubert.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE

POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châteaux, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oyes - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.» En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

qu'il n'est pas facile d'écrire un tel livre, qui doit synthétiser de façon claire et simple des données parfois contradictoires. Les amateurs de dinosaures prendront certainement plaisir à parcourir un ouvrage qui leur présente leurs fossiles favoris sous un jour assez nouveau.

Eric BUFFETAUT

Didactique

Apprendre !

André Giordan. Éditions Belin, 1998.

« Apprendre ! » : le point d'exclamation est chargé de toute la difficulté, voire de l'impuissance à cerner un mécanisme complexe qui semble échapper à toute explication rationnelle. La neurobiologie peut suggérer des niveaux cérébraux, des circuits, des substances chimiques, mais elle ne peut déchiffrer les réseaux de l'acte d'apprendre. Pas de localisation précise, et pas de recette miracle : la preuve est indirectement donnée par les spécialistes de la question, les didacticiens, dont les enfants sont aussi «cancres» que ceux des autres catégories socioprofessionnelles ! Ils l'avouent en privé, avec résignation.

On justifie les situations les plus noires du non-apprendre en invoquant la démotivation des enseignants, réfugiés dans la classique pédagogie frontale (face à la classe) ou dorsale (dos à la classe), et l'ennui des élèves qui bâillent, ont envie d'autre chose, à un autre moment et ailleurs, qui mémorisent phonétiquement des mots vidés de leur sens, ne communiquent pas, se murent dans une hostilité muette ou deviennent violents.

La réflexion sur l'«apprendre», devenu objet, serait-elle alors impossible ? Les didacticiens des diverses écoles ont testé différentes explorations, tels le behaviorisme ou le renforcement immédiat, qui voulait éliminer l'échec, ou le constructivisme, en mettant la main à la pâte. Nombre de ces initiatives ont montré leurs limites et se sont figées dans le dogmatisme.

Sur fond de société mutante, aux techniques envahissantes, faut-il apprendre des connaissances périssables ou maîtriser quelques grands concepts repères, fédérateurs, qui permettent de comprendre la biosphère, l'évolution du vivant, le fonctionnement du corps humain ? N'est-il pas essentiel de savoir interroger, accepter une remise en question de ses propres convictions, décoder, sélectionner les informations nouvelles ?

A. Giordan ne propose pas un absurde zappage de consommateur instable, mais une maîtrise de l'apprentissage fondée sur la communication, la discussion, les échanges d'arguments entre des élèves devenus intellectuellement actifs (on les nomme alors des «apprenants») et des enseignants médiateurs, organisateurs ou accompagnateurs du processus d'acquisition des connaissances.

Si l'on veut placer l'apprenant au centre du système éducatif (cette idée fait consensus) et si l'on souhaite qu'il s'approprie chaque parcelle d'un savoir opératoire, réinvestissable dans des situations nouvelles, on doit prendre quelques mesures préventives. Gaston Bachelard (1884-1962) avait parlé d'obstacles épistémologiques, qui deviennent des «conceptions» chez A. Giordan : on sait aujourd'hui qu'un apprenant a une idée sur un sujet avant qu'il ne soit traité par un enseignant. Aussi toute action qui vise à transmettre une connaissance bute sur une structure d'accueil en place, difficile à modifier, qui peut gêner le stockage d'une nouvelle information. En conséquence, repérer, recenser, classer les conceptions permet de nuancer les approches pédagogiques, de modifier les stratégies qui permettront à l'apprenant de comprendre le pourquoi de son erreur, de prendre du recul et de se motiver pour des explorations ultérieures.

Personne ne peut apprendre à la place de l'élève, mais ce dernier ne peut apprendre en gommant son environnement. Il doit faire avec et contre ses conceptions, avec et contre les autres. Ainsi, au cours d'interactions multiples et de négociations subtiles, la dynamique de l'apprendre peut s'enclencher et – pourquoi pas ? – procurer un plaisir motivant.

Le livre s'articule autour de trois parties destinées à trois lectorats différents : les béotiens, les spécialistes, les parents et enseignants. Fallait-il séparer ces publics aux frontières plus floues qu'il n'y paraît ? Ce choix alourdi le livre de quelques redondances ou de passages un peu lents, alors que d'autres pages sont pleines d'élan et d'idées qu'il faudrait discuter et approfondir. Malgré ces défauts de construction, A. Giordan nous livre un essai ambitieux où ceux qui le connaissent retrouveront la marque d'une réflexion affinée et mûrie. Les initiateurs des éternelles réformes de notre système éducatif devraient s'intéresser à ce livre : les nombreux questionnements qu'il évoque ne sont-ils pas au cœur de leurs préoccupations ?

Michèle FEBVRE

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de Pour la Science est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>