

■ POUR LA  
**SCIENCE**

**Octobre 1996**

édition française de

**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

**LES CYCLES  
SOLAIRES**

**LA LATENCE  
VIRALE**

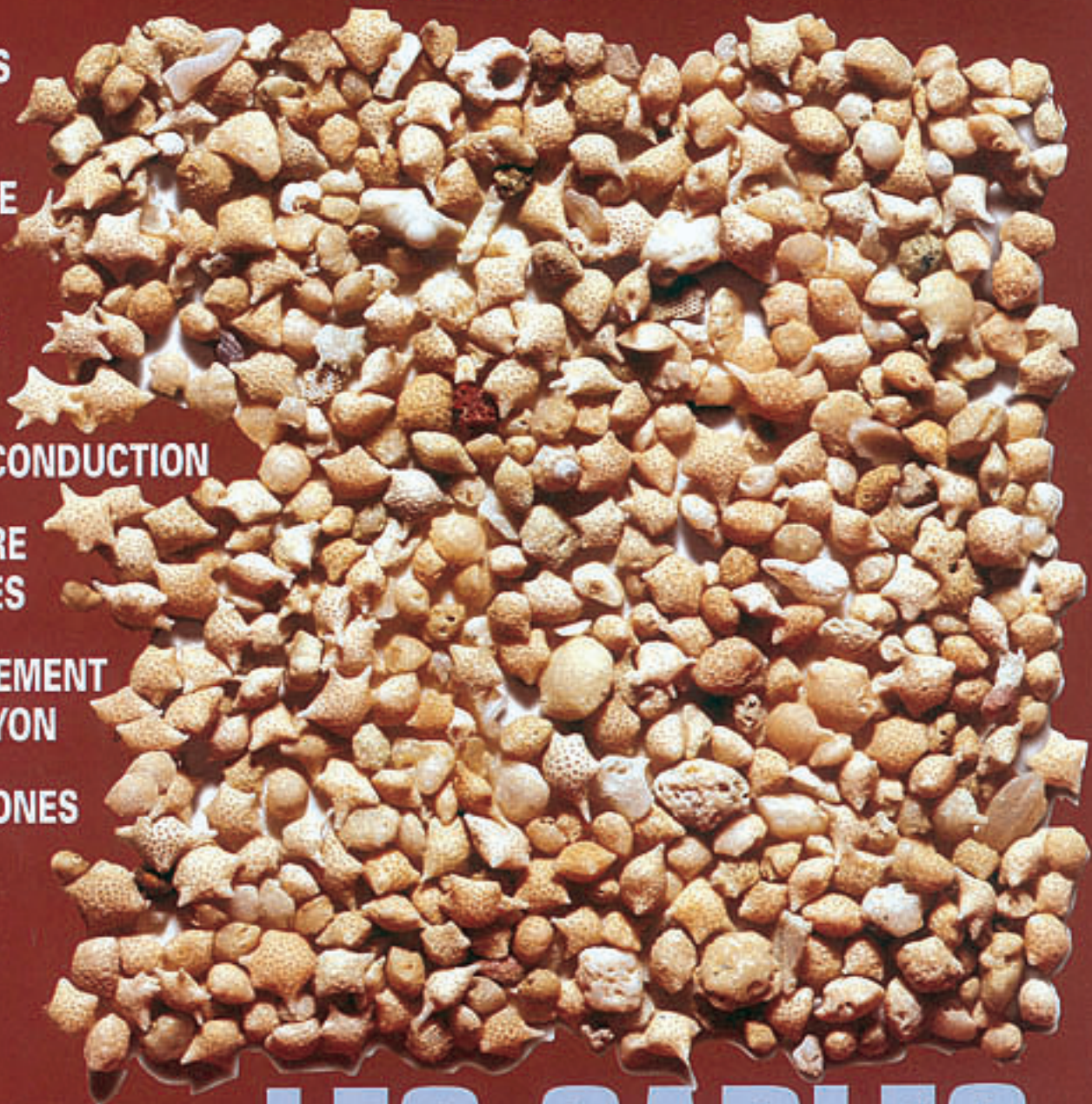
**BULLES DE  
DAUPHIN**

**LA SUPRACONDUCTION**

**LA MÉMOIRE  
DES GLACES**

**DÉVELOPPEMENT  
DE L'EMBRYON**

**LES HORMONES**



**LES SABLES**



M 2687 - 228 - 38,00 F

Canada : \$ 8,75

**Bloc-notes** de Didier Nordon

7

**Tribune des lecteurs**

8



### Point de vue

10

**La vache folle : une suite d'erreurs**

par Jean-Jacques Duby



### Les inattendus de la science

12

**L'invention du zéro**

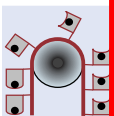
par Christian Houzel



### Science et gastronomie

21

**Bières de pharaons**



### Jeu-concours

22

**Le mouvement perpétuel**

par Pierre Tougne

### Perspectives scientifiques :

**Pansement pour fracture**

24

**Un ancêtre précoce**

25

**Enzymes et médicaments**

26

**Satellites d'astéroïdes**

27

**Le cheval, athlète aboulti?**

28

**Échographie du thymus**

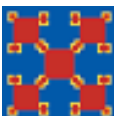
29

**Horloge équatoriale**

30

**La musique pour les paroles**

31



### Visions mathématiques

96

**Mathématiques sans se lacer**

par Ian Stewart



### Logique et calcul

100

**Démographie et sens giratoire**

par Christoph Pöppe



### Analyses de livres

110

– **Carte géologique de la France au millionième**

– **Marie Curie**, par Susan Quinn

## La mémoire des glaces du Groenland

34

par Claude Boutron

Les neiges et glaces du Groenland révèlent l'histoire de la pollution atmosphérique par les métaux lourds, de l'Antiquité à nos jours.



## Les hormones végétales

42

par Antonio Granell

et Juan Carbonell

Les hormones végétales sont des messagers chimiques que les cellules utilisent pour moduler leur développement et s'adapter à un environnement auquel les plantes, immobiles, ne peuvent échapper.



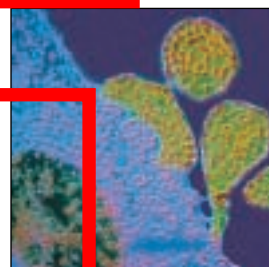
## Les infections virales persistantes

52

par Jean-Claude Nicolas

et Vincent Maréchal

Après une infection virale, l'organisme semble sortir vainqueur du combat qu'il a mené contre le virus. La victoire n'est pas toujours définitive.



## La dynamo stellaire

60

par Elisabeth Nesme-Ribes,

Sallie Baliunas

et Dmitry Sokoloff

Les cycles des taches observées sur le Soleil et sur d'autres étoiles aident à comprendre les cycles d'activité magnétique du Soleil et leur impact sur le climat terrestre.

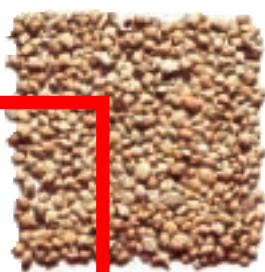


## Les sables du monde

68

par Walter Mack  
et Elizabeth Leistikow

Le sable est l'un des matériaux les plus banals à la surface de la Terre. C'est aussi l'un des plus variés.

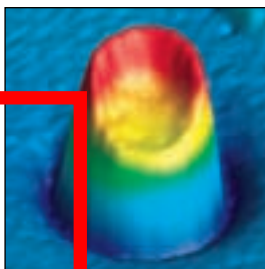


## La supraconduction à haute température

74

par John Kirtley  
et Chang Tsuei

Des expériences testent des phénomènes quantiques dans les matériaux et éclairent d'un jour nouveau la supraconduction à haute température.

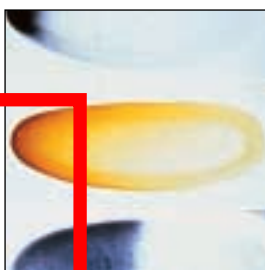


## Le développement de l'embryon

82

par Christiane  
Nüsslein-Volhard

Des différences de concentration de quelques molécules clés commandent l'organisation de l'embryon.

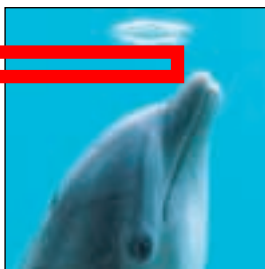


## Les ronds d'air des dauphins

90

par Ken Marten, Karim  
Shariff, S. M. S. Sarakos  
et Don White

À Hawaii, des dauphins s'amuse à faire, dans l'eau, des spirales et des ronds d'air tourbillonnants et stables.



## Le prix de l'ignorance

On sait combien coûte la recherche ; l'épidémie de la vache folle nous enseigne le coût de l'ignorance.

Jean-Jacques Duby examine les erreurs commises (voir *La vache folle : une suite d'erreurs*, page 10) : inertie administrative, méconnaissance du risque... La plus dommageable a été la passivité. Pourquoi, il y a dix ans, un programme de recherche n'a-t-il pas été lancé alors que le péril était envisageable ? Parce qu'il s'agissait de prévention, toujours différée par les urgences ? Parce que cette recherche, à la fois fondamentale et appliquée, s'insérerait mal dans les programmes en place ? Parce que la science ne pouvait pas, pensaient les décideurs de la santé publique, résoudre le problème ? Il est vrai que l'identification des causes des maladies neuro-dégénératives à partir de symptômes, est très délicate. D'autant que des voix scientifiques expriment le doute : la maladie de Creutzfeldt-Jakob pourrait être due à un virus, la protéine identifiée par S. Prusiner n'étant que la porte d'entrée de ce virus. Or la latence des virus est une question délicate que les biologistes commencent seulement à explorer (voir *Les infections virales persistantes*, par J.-C. Nicolas et V. Maréchal, page 52).

Les comptes de l'État ne font jamais état des périls auxquels nous échappons grâce aux résultats de la recherche, et ce silence diminue la reconnaissance publique. Les drames évités sont, il est vrai, difficilement chiffrables : le Globe terrestre n'est pas un terrain d'expérimentation qui permettrait des études comparées. Or tout ce qui n'est pas chiffré est au pire ignoré, au mieux englobé dans des considérations morales, lesquelles sont écoutées avec l'intérêt que l'on porte aux discours de remise de prix, et aussi vite oubliées.

Les épidémies de type vache folle, il y en aura d'autres : la mondialisation de l'économie, la rapidité des communications, l'âpreté de la concurrence, propagent les catastrophes.

Si nous ne réagissons pas mieux aux alertes, nous continuerons à brûler des vaches dans des crématoires. Dans l'Antiquité, les Grecs sacrifiaient les mêmes animaux pour obtenir le pardon des Dieux.

Philippe BOULANGER

Par Didier Nordon

## Terrorisme scientifique

**S**cène vue lors d'une commission universitaire chargée de recruter des collègues. Tous les membres de la commission appartenaient à la même spécialité, mais deux sous-spécialités rivalisaient. Prudent, je les désignerai ici par A et par B. Les tenants de la sous-spécialité A se lamentaient à donner des indications trop longues et trop techniques sur les recherches effectuées par les candidats qu'ils défendaient, un représentant de la sous-spécialité B a fini par se fâcher : «Vous commencez à nous ennuyer. Nous aussi, nous pouvons donner tous les détails sur ce que font nos candidats. Il y en aura jusqu'à demain. Si c'est ça que vous voulez !»

La menace agit. Les A comme les B se contentent d'évoquer de façon succincte les résultats de leurs postulants respectifs. Cette équilibre de la terreur, on dit long sur l'intérêt que les chercheurs portent aux travaux des autres. Et, je le répète : au sein d'une même spécialité.

## Cosinus par la tangente

**L**es vérités érudites sont aussi fantaisies que les vérités populaires. J'étais persuadé qu'Henri Poincaré avait servi de modèle à Christophe pour son savant Cosinus. Mais lisant récemment une monographie sur Hadamard, j'ai appris que non, la figure de Cosinus était inspirée de celle d'Hadamard. J'ai rectifié mes connaissances. Seulement, un article de Pierre Laszlo m'informe aujourd'hui que c'est d'Ampère que Christophe se serait inspiré, Ampère «à la distraction légendaire» (Le savant fou chez Jules Verne

dans *De la science en littérature à la science-fiction*, éditions du CTHS, 1996).

À, suffit. Je n'ai pas la patience d'une machine à traitement de texte, sur laquelle millésimes consécutives ne laissent pas plus de trace qu'une seule. Fantaisie pour fantaisie, renversons l'ordre des phénomènes. C'est Hadamard qui inspire la réalité non l'inverse. Ampère, Hadamard, Poincaré – pourquoi ces savants n'ont-ils eu d'autre but dans la vie que de passer pour des modèles de distraction ? Parce que nous imitons leur façon de penser, non ? même lui-même, n'est-ce pas ? quand il était petit : devenir aussi distrait que Cosinus. Les grands types littéraires sont éternels, vers l'avenir et vers le passé.

## Politique scientifique commune

**D**ans le monde à 200 000 (c'est beaucoup) le nombre de revues universitaires paraissant en anglais, et à 5 le nombre moyen de lecteurs pour chaque article (c'est peu !). Les articles servent à faire avancer non la compréhension, mais les carrières. La situation empirera avec les journaux électroniques : le plus grand danger est la surproduction.

Les constatations de Noel Malcolm (*Independant on Sunday*, 21 juillet 1996) sont peu originales. Ce qui l'est, c'est la comparaison fondée qu'il fait avec l'agriculture, où la situation est similaire. L'État achète les produits à des cours surévalués et constitue des stocks qui restent inutilisés. Entendez : il subventionne les bibliothèques universitaires pour qu'elles achètent des revues et des livres qui s'entassent sans être lus. Noel Malcolm suggère d'aller plus loin dans l'alignement de la politique universitaire sur la politique agricole. De

même que l'agriculture, pour qu'il ne laisse certaines terres en jachère, il devrait donner une prime aux universitaires qui s'abstiennent de publier.

## Simmons, pas mort

**V**oici deux jolies fautes d'orthographe – jolies parce qu'elles ornent le texte plus qu'elles ne le défigurent : elles collent bien à son sens !

Le premier est de Simmons, critiquant les fautes de modifères de la compétition sportive écrit : «La préparation scientifique des champions laisse flotter derrière elle bien des odeurs de souffre.» Deux f. Ainsi se trouvent évoqués non seulement l'absorption de substances interdites, mais encore le paroxysme de douleur auquel sont contraints les champions afin de se «épasser».

Marie Cariou, philosophe, pour souligner tout le bien qu'elle pense de ses collègues, annonce les «mystificateurs qui n'ayant rien à dire se plaisent à habiller des idées banales d'horipeaux langagiers faussés et ennemiés» (Bergson et *Bachelard*, PUF, 1995, p. 74). Ce h, sentez-vous tout ce que ce h veut dire ? Mais, si je ne me permets pas de croire un redoublement de consonnes, j'ai bien bienvenu. Si Marie Cariou avait décrit ses ennemis affublés d'horipeaux, ils ne s'en seraient pas relevés.

## Pourquoi pas 12/7?

**N**e pas savoir si une affirmation est du lapin ou du cochon n'est jamais plaisant. Pour un peu, on se sentirait bête...

Ce sentiment désagréable, je viens de l'approuver en lisant l'injonction suivante : «Montrer que le 13 du mois a plus de chances de tomber un vendredi que tout autre jour de la semaine.» Si je l'avais lue dans la page Divertissement de mon quotidien, j'aurais souri : simple plaisanterie pour moquer notre tendance à surestimer la fréquence des dates déplaisantes.

Mais c'est dans l'*American Mathematical Monthly* (vol. 100, n° 7) que j'ai lu cela. Et je connais trop les mathématiciens pour n'en pas avoir peur. Chez eux, tout peut être sérieux, même le divertissement. Ils sont capables d'avoir une démonstration rigoureuse concernant la fréquence supérieure des retours du vendredi 13. Nul que je suis, elle m'échappe. Et vous ?

## Véritables et vraies vérités politiques

**C**ertains adjectifs s'appliquent à eux-mêmes : «court» est court, «français» est français, «polysyllabique» est polysyllabique. D'autres ne s'y appliquent pas : «anglais» n'est pas anglais, «rouge» n'est pas rouge, «monosyllabique» n'est pas monosyllabique. C'est un célèbre paradoxe. Disons, par définition, qu'un adjectif qui ne s'applique pas à lui-même est «hétérologique». Un instant de réflexion, et l'on s'aperçoit que l'adjectif «hétérologique» ne peut être ni hétérologique, ni non hétérologique.

Ces considérations mènent également à un paradoxe politique. Écoutons notre président : «Les problèmes de l'Université appellent de vraies propositions et une vraie réforme.» Pourquoi répète-t-il le mot «vrai» ? Parce qu'il nous paie de mots. Incapables de les aborder vraiment, les politiciens se gargarisent d'autant plus de vrais problèmes, auxquels ils demandent d'apporter de vraies solutions. Le recours insistant au mot «vrai» marque la fausseté d'un discours. Vidé de sens par les politiciens, ce mot ne s'applique plus à lui-même. Vrai n'est pas vrai !

## Extinction on?

L'extinction des dinosaures a-t-elle été rapide ou non? La chute d'une météorite en est-elle la cause? Si l'on ne retrouve pas d'amoncellements d'ossements liés à cette extinction, c'est peut-être simplement que les dinosaures ont disparu à cause d'un écoulement de magma. Certaines espèces de batraciens disparaîtraient de plusieurs régions du monde parce que leurs œufs seraient soumis à un rayonnement ultraviolet plus intense (voir *Pourquoi les grenouilles disparaissent*, *Pour la Science*, juillet 1995). Les dinosaures qui pondaient des œufs, n'auraient-ils pas connu le même sort, après que la chute d'une météorite ait fortement perturbé le climat?

C. BOY, Arcachon

## Constructivisme (suite)

Trois affirmations de Paul Caro (voir *Le monde scientifique et technique se dégrade*, *Pour la Science*, juillet 1996) sont contestables. D'abord, le désintérêt de la communauté scientifique pour la «mémoire de l'eau» démontrerait l'absence de réalité du phénomène. La démonstration de P. Caro n'en est pas une; elle montre simplement que la communauté scientifique internationale a une influence considérable dans nos sociétés. Mais les scientifiques ont-ils toujours raison?

Ensuite, selon P. Caro, l'image du monde scientifique et technique se dégrade. Sur quoi repose une telle affirmation? Comment mesurer la dégradation de l'image du monde scientifique? En effectuant des sondages? Et depuis quelle époque cette image se dégrade-t-elle? Admettons néanmoins que cette affirmation est justifiée; quelles explications peut-on lui apporter? P. Caro semble suggérer que la cause est à chercher chez des penseurs non scientifiques. Je me demande si l'on ne pourrait pas la chercher chez les scientifiques eux-mêmes.

Je pense à la prétention scientifique qui confine parfois à l'arrogance, et au physicien qui déclarait, au cours d'une discussion informelle, qu'il était d'habitude de résoudre des systèmes d'équations différentielles pour décrire complètement la nature». Je pense aussi à l'irresponsabilité scientifique, tel ce généticien qui affirmait, lors d'une interview télévisée: «Je livre mes recherches au monde et n'ai pas à me préoccuper de la manière dont il s'en servira.»

Enfin P. Caro déplore que «La montée [...] des superstitions [soit] l'un des pro-

blèmes majeurs de notre temps, et une menace» la encore, sur quoi repose une telle affirmation? Qu'entend exactement P. Caro par «superstition»? Sommes-nous certains que «l'homme de la rue» soit plus superstitieux qu'il y a un siècle? Comment expliquer, si elle est réelle, la recrudescence des superstitions en cette fin de millénaire, et pourquoi constituerait-elle une menace?

Ces problèmes ne viendraient-ils pas aussi de la science et de la technique elles-mêmes? Entourés d'une technique toujours plus envahissante et perfectionnée reposant sur des théories scientifiques de plus en plus complexes dont la compréhension est réservée à une part réduite de la population, ne devons-nous pas craindre d'être tributaires d'autres types de connaissance, de manière à tenter de maîtriser le savoir scientifique. Il n'est ce pas un danger que la confiance excessive dans les procédés cognitifs de la science nous conduise, sans aucune superstition, à une situation comparable à celle que nous vivons désormais: la possibilité, issue de la science, de détruire la planète!

Fédéric CHABERLOT, Lausanne

## Réponse de Paul Caro

La première critique illustre la manière dont les formes modernes de fantasmes anciens imprègnent l'air du temps. Si la communauté scientifique ne croit pas à la «mémoire de l'eau», c'est tout simplement parce qu'elle considère que cette affaire est fondée sur des erreurs expérimentales (commises de bonne foi d'ailleurs). En revanche, les termes, poétiques, utilisés resuscitent dans les imaginaires une très vieille croyance, la croyance en l'eau bénite, et là, c'est vrai, la communauté scientifique, sauf peut-être les ethnologues, n'a rien à en dire.

La dégradation de l'image du monde scientifique est un problème de communication et d'éducation. La production de savoir est extrêmement importante et elle ne peut être suivie et comprise que par des spécialistes, et encore seulement dans des domaines étroits. De plus en plus de personnes sont capables d'accéder à ce savoir parce que l'enseignement universitaire se développe partout, mais, «l'honnête homme» qui voudrait connaître de tout un peu est souvent frustré. De là une réaction d'agacement, voire des pulsions de haine, d'envie ou de jalousie, envers les «savants». Cette réaction est, depuis l'Antiquité, un classique de la culture occidentale. Elle connaît aujourd'hui l'une de ses résurgences périodiques, et la manière cavalière dont les constructivistes traitent

le corpus scientifique et ses méthodes en est un exemple.

La compréhension n'est pas «réservée à une part réduite de la population» au sens d'un savoir secret: tous les éléments pour y parvenir sont publics et elle ne dépend que de la volonté d'apprendre. Cela requiert un effort. Il est évidemment plus facile d'adopter les doctrines «d'autres types de connaissance» qui tombent directement du ciel, et ne demandent pas de «se casser la tête». Ce n'est certainement pas «élargir son esprit», c'est plutôt sombrer dans les délices de l'encerclement par les sciences faibles qui obsèdent l'humanité depuis toujours, comme celle du cataclysme possible «qui détruirait la planète».

Par quelle technologie «la science» pourrait-elle aujourd'hui réaliser ce fantasme millénariste? La planète a parfaitement résisté à l'impact qui a, paraît-il éliminé les dinosaures. Il est sûr, il reste à mieux lutter contre la superstition, et mieux alimentée par l'ignorance que par le savoir...

## Quark

Quark, en allemand, signifie absurde, mais aussi fromage blanc. Ça y est? Vous y êtes, Maître Nordon sur un arbre perché (voir *Pour la Science*, août 1996)?

Voilà donc la raison pour laquelle «... je n'ai aucun mal à comprendre une représentation conceptuelle où le camembert et les quarks figurent côte à côte».

Cela dit, le nom de cette noble particule provient de celui d'un personnage du roman *Finnegan's Wake* de James Joyce, auteur que Murray Gell-Man semble tout particulièrement apprécier.

«Le feu fait que [j'aie] compris la phrase précédente» me rendra-t-il plus modeste? Certainement pas car la modeste est le privilège de la médiocrité. B. IQEUX (Le Diable et le bon Dieu).

Bernard IQEUX, Sèvres

## Trous noirs

Jeremy Bernstein écrit fort justement dans *Éléments de relativité* (*Pour la Science*, août 1996) que l'article publié par Albert Einstein en 1939 (*Sur un système à symétrie sphérique composé de plusieurs masses liées par la gravitation*) démontre qu'un amas sphérique d'étoiles en équilibre gravitationnel possède un rayon plus grand que le rayon de Schwarzschild.

L'article présente en outre : « Bien que la théorie présentée ici ne traite que des amas dont les particules ont des trajectoires circulaires, il n'y a pas d'objection sérieuse au fait que des cas plus généraux aient des résultats similaires. La "singularité de Schwarzschild" n'apparaît pas parce que la matière ne peut pas être concentrée arbitrairement. Cela est dû au fait que, en effet, les particules accélèrent la vitesse de la lumière. »

Jean Eisenstaedt, dans l'encadré, a tort de tourner Einstein en ridicule avec son image de ressort. Einstein dit sa conviction que le rayon de Schwarzschild est infranchissable de toute façon (c'est-à-dire qu'un trou noir ne peut se former par effondrement gravitationnel). Ce fait a été démontré par N. Stavroulakis (*Gazette des mathématiciens*, 31, 119 (1986)).

Pourquoi les démonstrations prouvant la formation de trous noirs dans le cadre de la relativité générale sont-elles erronées ? Deux sources d'erreurs fréquentes sont purement mathématiques : un changement de variables non bijectif, et l'utilisation globale du théorème de Birkhoff, qui n'est vrai que localement. La troisième source d'erreurs est aussi épistémologique : le rayon de Schwarzschild a une signification périmétrique, pas celle d'un rayon. Il s'agit d'un rayon de courbure.

Des trous noirs ont-ils été observés, même indirectement ? Il en existerait au centre de galaxies en rotation rapide, telle M87 (voir *L'Espresso*, 12 septembre 1996). Toutefois, la présence, au centre de cette galaxie, d'un amas d'étoiles suggère que ces trous noirs, s'ils existent, tout autant les observations, en utilisant des formules démontrées par Einstein dans son article de 1919. Ironie de l'histoire ?

Michel MIZONY, Lyon.

## Réponse de Jean Eisenstaedt

**A**lbert Einstein n'a pas été le seul ni le dernier à douter que sa théorie permette la formation de trous noirs. De nombreux scientifiques ont longtemps voulu, et encore aujourd'hui, démontrer que le rayon de Schwarzschild était infranchissable. Ils n'acceptent pas le caractère courbé de l'espace et ses conséquences extrêmes, en particulier les singularités de la relativité générale. La physique et l'Univers trouvent leur limite, qu'il s'agisse du Big Bang ou de l'horizon de Schwarzschild. Qu'Einstein ne s'opposât à ces questions en 1939 n'est pas si étonnant. Son opinion était liée à son refus qu'il puisse exister des singularités dans sa théorie. Précisément toutefois, le rayon de Schwarzschild n'est pas singulier : c'est un horizon derrière lequel une étoile peut disparaître.

Il n'y a aucune raison d'exiger des changements de coordonnées « bijectifs » : en relativité générale, à cause de la covariance générale des équations, la notion de coordonnées n'a pas de sens physique *a priori*. La question a été résolue mathématiquement par Georges Lemaître dès 1932 : la soi-disant singularité de Schwarzschild est perméable.

La vraie question est celle de l'équilibre d'une étoile. D'un côté, les forces gravitationnelles sont proportionnelles à la masse de l'étoile : elles augmentent sans limite avec celle-ci. De l'autre, les forces de « cohésion » de la matière sont limitées par l'équation de compressibilité de la matière en question : elles ne peuvent pas équilibrer n'importe quelle force gravitationnelle. La relativité générale prévoit donc que des étoiles peuvent disparaître derrière leur horizon et former des trous noirs.

## Vaches en queue de poisson

Les vaches ont toujours été folles, comme le prouve le texte suivant de l'essayiste américain du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, Henry David Thoreau (*sic*) (extrait de *Walden ou la vie dans les bois*) : « Le bruit court qu'il arrivait que les vaches étaient parfois nourries de têtes de poissons. [...] Ce récit est courant chez les voyageurs et est peut-être une calomnie, mais il y a plus de 1 000 ans que les Latins et les Grecs ont répété que telle ou telle nation nourrissait ses bovins, ou ses chevaux, ou ses moutons, avec du poisson, comme on peut le voir chez Elie et Plinius l'Ancien ; dans le *Journal* de Néarque, qui était amiral d'Alexandre, et qui accomplit un voyage de l'Indus à l'Euphrate, 326 ans avant J.-C., il est dit que les habitants de cette partie de la côte, nommés Ichthyophages, c'est-à-dire mangeurs de poisson, non seulement mangeaient du poisson cru mais qu'ils broyaient des poissons dans une vertèbre de baleine, dont ils se servent comme mortier, et que la pâte ainsi obtenue était donnée à leurs bovins, car il n'y a pas d'herbe sur cette côte, et d'autres voyageurs, dans les temps modernes, Braybosa, Niebuhr et alii rapportent le même fait. »

Quand si Caligula, Eliagabal, et autres empereurs extravagants, n'avaient pas consommé trop de vache ou de poisson ? Plutôt que du saturnisme que l'on évoque parfois dans leur cas, ne faut-il parler d'« empoisonnement bovin » ?

Pierre TROTIGNON, Lille

# La vache folle : une suite d'erreurs

JEAN-JACQUES DUBY

L'épidémie d'encéphalite spongiforme bovine, après avoir tué 160 000 bovins et touché le quart des exploitations britanniques, est réduite à quelques dizaines de cas par semaine. Nul ne sait si cette diminution se poursuivra jusqu'à l'éradication.

Les déclarations du ministre de l'Agriculture britannique sur dix cas de maladie de Creutzfeldt-Jakob atypiques posent la question d'une éventuelle transmission à l'homme de la maladie de l'animal.

D'où l'effolement : la consommation de viande bovine et les cours ont chuté de 30 à 40 pour cent dans les pays européens. Une crise économique frappe le secteur de l'élevage, l'industrie de la viande et sa distribution.

Analysons le déroulement de cette crise à la lueur des erreurs commises.

Le manque de connaissances scientifiques est le handicap majeur. L'erreur des responsables britanniques a été de ne pas lancer des recherches en 1985 ou 1986, dès qu'il fut acquis que l'encéphalite spongiforme bovine progressait rapidement. Le risque a été sous-estimé. Lorsque, dix ans après, les politiques ont besoin de réponses scientifiques pour résoudre la crise, les spécialistes ont peu progressé sur l'agent infectieux ou sur le mode de transmission, encore moins sur un test de contamination ou sur un vaccin. De telles recherches n'auraient pas abouti sur tous les plans, mais on serait certainement plus avancé, et les décideurs ne seraient peut-être pas obligés de jouer « à l'aveugle », dans un tragique *zoo* où ils sont piégés.

La crise de la vache folle est une catastrophe technologique causée par l'homme. Si les éleveurs anglais n'avaient pas transformé des ruminants en carnivores, rien ne serait arrivé. Certains philosophes ou sociologues stigmatiseront une dérive : les valeurs de la nature – la vache qui mange de la bonne herbe au grand air – et le respect du consommateur sont passés au second plan. Peut-être, mais la décision fatale, qui a été d'autoriser la production de farines moins chauffées, relève d'une imprévoyance trop commune : les impératifs économiques ont pris le pas sur le contrôle du risque. Remarquons à cet égard que l'assouplissement de la réglementation,

au début des années 1980, a été favorisé par un transfert de l'autorité de contrôle des fabricants britanniques d'aliments pour bétail, du ministère de l'Agriculture vers le ministère de l'Industrie. Je pense que la réglementation aurait été moins laxiste si les farines avaient contenu des ingrédients artificiels : on pense trop souvent que seules les choses créées par l'homme sont potentiellement dangereuses, ce qui vient de la nature, est offensif...

## LE PRINCIPE DE PRÉCAUTION EST-IL APPLICABLE ?

Le risque le plus grave reste la transmission à l'homme. On craint aujourd'hui que ce risque n'existe, mais on ignore son ampleur éventuelle : aussi les conditions typiques du principe de précaution s'appliquent-elles. L'interdiction de la consommation de certains abats de bovins et l'embarco européen sur les bovins anglais relèvent de ce principe. Le coût est énorme : la Grande-Bretagne exportait l'équivalent de 500 millions de livres sterling par an. L'abattage du cheptel coûtera des milliards de livres.

Ces mesures douloureuses visent autant à restaurer la confiance du consommateur qu'à réduire le risque de contamination humaine. Si cette contamination existe, mais à une incidence du même ordre de grandeur que la maladie de Creutzfeldt-Jakob classique, le risque est limité à quelques dizaines de décès par an, et l'on peut juger le coût actuariel de chaque vie sauvée exorbitant.

Toutefois, des scientifiques comme le microbiologiste Richard Lacey, de l'Université de Leeds, craignent que la maladie de Creutzfeldt-Jakob atypique ne soit une maladie nouvelle, une « encéphalite spongiforme bovine humaine », différente de l'affection classique, transmise par l'ingestion de viande provenant de bêtes atteintes d'encéphalite spongiforme, et dont l'incidence pourrait être beaucoup plus élevée. R. Lacey évoque des centaines, voire des milliers de décès dans les prochaines années.

Selon un scénario encore plus catastrophique, l'encéphalite spongiforme bovine serait transmissible à l'homme via les cochons ou les volailles qui continuent

à être nourris aux farines carnées et pourraient être contaminés : certes, cochons et poules ne vivent pas assez vieux pour développer la maladie, mais ils pourraient multiplier l'agent pathogène. La seule précaution efficace serait d'interdire purement et simplement la fabrication de ces farines.

On peut se demander s'il n'y a pas eu longtemps un déficit de communication. Dans le milieu des années 1980, le gouvernement britannique n'a pas beaucoup diffusé les informations sur l'épidémiologie. En somme, ni la Commission européenne ni après 1990. La polémique sur le mécanisme de la maladie, et a fortiori sur une éventuelle transmission à l'homme, est restée confinée aux publications spécialisées. La grande presse n'a-t-elle couvert l'épidémiologie d'une manière anecdotique, et sans insister sur la transmission humaine jusqu'au 20 mars 1996, date à laquelle elle a repris les déclarations du ministre, déclenchant la panique chez les consommateurs. Panique pour paniquer, il eût sans doute mieux valu qu'elle se produisît plus tôt : les dommages humains, si par malheur ils devaient être confirmés, en eussent été réduits, et les dommages économiques n'eussent pas été plus importants.

Les fautes d'appréciation des politiques, les responsables de la santé, et peut-être des médias, peuvent être diversement appréciées. Et les scientifiques ? Il est difficile de stigmatiser leur manque de connaissances sur ces maladies, pas plus qu'on ne peut leur reprocher de ne pas avoir encore découvert de vaccin contre le cancer ou le SIDA. En revanche, en minimisant la probabilité de transmission à l'homme dans son premier rapport, la Commission Southwood a commis une erreur culturelle. Les théories de Prusiner, leurs conséquences sur l'existence ou l'absence d'une barrière d'espèce n'auraient-elles pas dû être prises en compte ? Comme le reconnaît aujourd'hui R. Southwood, « le modèle de la tremblante paraissait [alors] le plus vraisemblable (mais il semble (maintenant) que nous ayons pu nous tromper...) ».

Faut-il alors passer la vache folle et sa possible transmission à l'homme par les perles et profits du risque de développement ? L'histoire et, peut-être, les tribunaux en jugeront. La multiplication des errements, le laxisme des réglementations, la mollesse et le retard des mesures administratives ne plaident pas pour une exonération totale des responsabilités.

Jean-Jacques DUBY est directeur général de l'École supérieure d'électricité et conseiller scientifique de l'UAP.



# L'invention du zéro

CHRISTIAN HOUZEL

*La présence d'une absence matérialisée par le zéro, illustre et contient l'essence des mathématiques.*

**S**il inventeur (inconnu) du zéro avait déposé un brevet et que ce brevet avait duré 1 000 ans, il aurait gagné gloire éternelle et beaucoup d'argent. Pourtant, l'acquisition du concept du zéro n'est pas particulièrement douloureuse : il est difficile de nous souvenir quand nous avons appris l'existence du zéro à l'école primaire.

Zéro est un chiffre à part : la multiplication par zéro redonne zéro, et des questions sur le zéro sont encore difficiles à résoudre au XIX<sup>e</sup> siècle, comme la valeur de  $0^0$ . La division par zéro est impossible. Elle donne l'infini, quel que soit le nombre que l'on met au numérateur, sauf si c'est zéro lui-même. Le zéro et l'infini sont liés non seulement en mathématiques, mais aussi en physique : pour atteindre le zéro absolu de température, il faut une énergie infinie.

Zéro n'est rien, et il est inattendu que le rien ait une aussi grande importance en mathématiques. Dans les équations, il a un statut privilégié, car c'est le seul que l'on mette à droite du signe égal, où il trône isolé et magnifique.

## LA NUMÉRATION DE POSITION

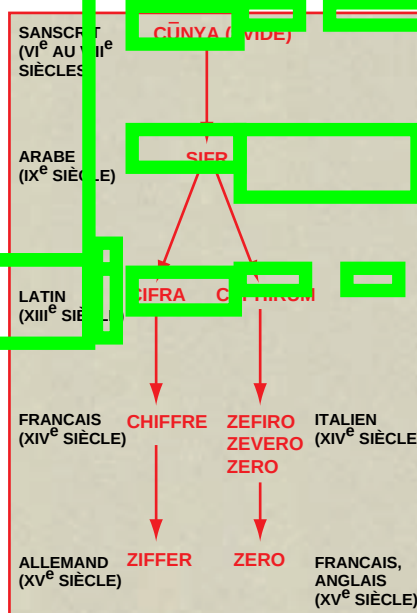
Zéro est issu de la numération de position où le sens d'un symbole dépend de sa position : le chiffre 1 isolé signifie une unité, 10 s'il est en deuxième position avec un zéro à côté de lui, 100 quand il est en troisième position avec deux zéros à sa droite. Selon l'étymologie latine de la terminaison «-ente» signifie 10, comme dans trente, quarante, etc. Les abaques anciens étaient des tables formées de colonnes où l'on mettait des petits cailloux : dans la colonne des unités, chaque caillou valait 1, dans la colonne des dizaines à côté, chaque caillou valait 10, etc. En latin, *calculus* signifie caillou.

La première numération positionnelle attestée date de l'antiquité babylonienne (à partir du II<sup>e</sup> millénaire avant notre ère) ;

elle n'était pas de base 10, mais de base 60. Nous avons d'ailleurs conservé cette base 60 dans le décompte du temps et des angles.

Dans l'écriture babylonienne, un bâton inscrit dans l'argile fraîche avec un roseau taillé donnait une incision en forme de clou munie d'une tête ; cette marque signifie 1 ou 60 ou 3 600, les différentes puissances de 60, mais aussi les puissances négatives, c'est-à-dire  $1/60$  ou  $1/3 600$ , etc. En l'absence de «rien», c'est-à-dire de zéro, quand il manquait un ordre de puissance de 60, l'écriture babylonienne était ambiguë : seul le contexte permettait de savoir si un clou vertical signifiait 1 ou 60.

Les Babyloniens, ou tout au moins ceux d'un rang au milieu de chiffres, inséraient un espace. Or un espace est de longueur élastique et peut échapper à l'examen : deux «cous» verticaux, serrés l'un à côté de l'autre, signifient deux ; qu'un petit espace les sépare, cela fait 61. Aussi les mathématiciens de Babylone, dans



Document PLS

les derniers siècles avant notre ère, ont-ils rempli l'espace vide par un signe, deux petits clois obliques indiquant l'absence d'une unité d'un rang sexagésimal.

Les Grecs de l'antiquité hellénistique, dans les derniers siècles avant l'ère chrétienne, ont beaucoup étudié l'astronomie babylonienne et adopté, pour les calculs astronomiques, l'arithmétique babylonienne ; dans ce contexte, ils notent quelquefois l'absence d'un rang par un «0» qu'ils initient du mot grec *ouden*, lequel signifie rien. Pour noter un petit angle inférieur à un degré, ils inséraient ce «zéro» à la place des degrés, puis indiquaient après les minutes et les secondes.

Dans les plus anciens textes indiens, le zéro était noté par un point ou par un petit rond. Ce signe a plusieurs désignations : les Indiens rédigeaient en leurs règles de calcul, comme les règles de grammaire et les règles de construction des temples, et ils inventaient des synonymes et d'autres façons de nommer les choses, pour que leurs règles de versification soient respectées. On dénombre une dizaine de façons de nommer zéro, un, deux, etc.

Toutefois, le nom canonique indien est *cūnya*, qui signifie vide en sanscrit et désigne un «blanc». Ce signe n'est pas encore considéré comme un chiffre : il y a neuf marques, les chiffres de 1 à 9, et ce symbole qui indique le vide.

Les Indiens ont toujours eu un système de base 10 : avant l'invention du zéro, 10 est dénoté par un symbole spécial, une espèce de rond avec deux petites cornes sur le côté. Il n'est pas impossible que ce signe soit l'origine du zéro. Les plus anciennes inscriptions indiennes incorporant le système de positions datent des VII<sup>e</sup> et VIII<sup>e</sup> siècles. En Inde, la plus ancienne inscription comportant la notation avec zéro date du IX<sup>e</sup> siècle.

Les Mayas de l'Amérique centrale ont aussi un système positionnel en base 20. La civilisation maya atteint son apogée au X<sup>e</sup> siècle de notre ère, plus tard que les Incas, mais elle s'est développée de façon indépendante, et les Mayas utilisent aussi un zéro. Un zéro qui était noté par une espèce de forme en amande, avec une décoration à l'intérieur qui varie suivant les inscriptions ou les manuscrits.

## LA FASCINATION DES GRANDS NOMBRES

Les Babyloniens, les Indiens et les Mayas sont fascinés par les très grands nombres, à la différence des Grecs et des Romains, qui ne s'en préoccupent guère. Le plus grand nombre possible dans la langue grecque, c'est la myriade, c'est-à-dire 10 000. Or le zéro est une première étape dans la représentation commode des

grands nombres, et ni Archimède ni Euclide n'utilisent le zéro. Cependant Archimède avait inventé une méthode pour désigner des nombres extrêmement grands, permettant de compter les grains de sable qui rempliraient la sphère des étoiles fixes.

Les Babyloniens, avec la base 60, peuvent noter de très grands nombres de façon économique. Chez les Indiens, avec la base 10, c'est un peu plus compliqué, et les erreurs sont plus faciles. Toujours est-il que les Indiens ont systématisé cette notation du zéro dans les premiers siècles de notre ère. On n'en sait pas beaucoup plus.

Les Chinois n'ont adopté la notation du zéro indien que très tardivement, au XIII<sup>e</sup> siècle. À l'époque, les Chinois ont une notation numérique mixte : ils notent 1 par un trait horizontal, 2 par deux traits, 3 par trois traits ; ensuite, il y a des chiffres jusqu'à 9, et puis 10 est représenté par une croix et, quand on veut noter 20, on met le chiffre 2, c'est-à-dire deux traits, suivi de la croix. C'est deux fois 10. Il existe un symbole indépendant pour 100, un symbole indépendant pour 1000. Les Chinois, pour faire leurs calculs, se servent de baguettes qu'ils posent sur une table en colonnes verticales : une colonne pour les unités, une colonne pour les dizaines, etc. Ils n'avaient pas besoin du zéro, puisque, sur la table, une colonne vide dénote le rang de l'absence.

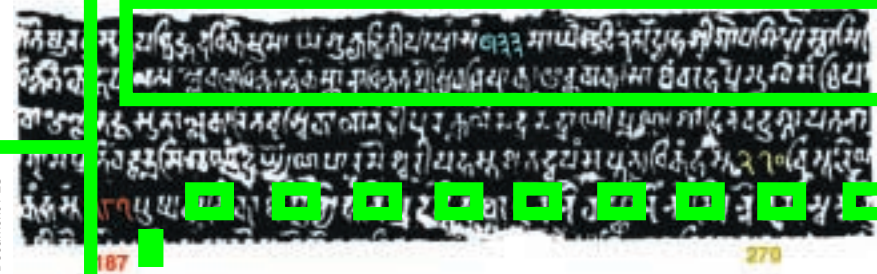
Au XIII<sup>e</sup> siècle, dans les traités mathématiques pour expliquer leurs algorithmes, les Chinois reproduisent en marge du traité la configuration des baguettes et s'aperçoivent qu'il était très gênant de laisser des places vides, et ils commencent à placer un grand rond, le symbole indien du zéro, aux endroits adéquats.

Les Arabes adoptent le système indien dès la fin du VIII<sup>e</sup> siècle de notre ère, au début parallèlement à d'autres systèmes. Vers 825, un grand mathématicien de Bagdad, inventeur de l'algèbre, Al-Khwarizmi, rédige un traité sur ce qui s'appelait le calcul indien. Là apparaissent non seulement la notation du zéro, mais aussi des méthodes de calcul utilisant ce nombre.

Car ajouter un zéro, à droite, revient à multiplier par 10. Un poète indien du XVII<sup>e</sup> siècle, Bihārī, évoque le point que les femmes ont sur le front, point qui multiplie leur beauté par 10, comme le point à côté d'un nombre multiplie le nombre par 10.

Malheureusement l'original arabe du livre d'Al-Khwarizmi a disparu, et l'on n'en a que des adaptations en latin qui datent du XII<sup>e</sup> siècle. On en connaît plusieurs adaptations un peu différentes inti-

Document PLS



1. Plus ancienne inscription où apparaît le zéro, dans le nombre 270, coloriée en jaune sur l'illustration par souci de clarté. D'autres chiffres, 933 (en bleu) et 187 (en rouge) confirment que les Indiens utilisaient la numérotation de position et le système décimal. Sur cette inscription de Gwalior, le nombre 933 indique la date qui correspond à 870.

|   | 594 | 753 | 793 | 815 | 837 | 867 | 870 | 876 | 917 | 925 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 |     |     | -   |     |     |     | 1   | 1   |     |     |
| 2 |     |     | 2   |     |     |     | 2   |     |     | 2   |
| 3 |     |     |     |     |     |     | 3   | 3   |     |     |
| 4 |     |     |     |     | 8   |     | 8   |     | 8   |     |
| 5 |     | 9   | 9   |     | 5   |     | 55  | 5   | 5   |     |
| 6 | 6   | 4   |     |     |     |     | 2   |     |     |     |
| 7 |     | 7   | 3   | 3   |     | 7   | 77  | 7   | 77  |     |
| 8 |     |     |     | 7   |     | 7   | 70  | 7   |     | 7   |
| 9 |     |     |     |     | 9   | 9   | 9   | 9   | 9   | 9   |
| 0 |     |     |     |     |     |     | 0   | 0   | 0   |     |

Document PLS

2. Chiffres des premières inscriptions hindoues, avec apparition de la notation avec zéro dans l'inscription de Gwalior.

Document PLS

3. Le zéro est utilisé dans le «triangle de Pascal», reproduit ici par Al-Samaw'al (mort en 1174), triangle trouvé dans un livre d'al-Karaji, mathématicien du X<sup>e</sup> siècle. C'est la première fois dans l'histoire que l'on rencontre ce triangle.

tuées algèbres, prononciation latine au Moyen Âge du nom Al-Khowarizmi. Au Moyen Âge, un algorithme c'était un livre sur les méthodes de calcul.

## LE NOM DE ZÉRO

D'où vient le nom zéro ? En sanscrit, zéro est écrit *çūṇya*, le vide. Les Arabes, quand ils ont adopté le système indien, ont traduit vide en arabe : le mot utilisé, *sifr*, vient d'une racine qui signifie «être vide». Les Latins ont adopté le mot arabe tel quel *ciphra*, avec des formes un peu différentes. Dans certains textes latins, zéro c'est un petit cercle ; dans d'autres c'est une petite roue. Léonard de Pise, un auteur plus connu sous le nom de Fibonacci, a écrit en 1202 un célèbre livre, *Liber abaci*, où il dénomme le zéro *cephirum* d'après l'arabe. Le latin *cifra* qui en découle a donné, probablement par l'intermédiaire du picard, *chifre*.

Dans les anciens textes français, le chiffre signifie parfois zéro et, par exten-

sion, désigne tous les chiffres. Les chiffres, ce ne sont pas des nombres, ce sont les symboles numériques. Aujourd'hui, on parle toujours de chiffres on «fait du chiffre», on «donne les choses en chiffres». Les hommes d'affaires, les banquiers parlent de chiffres pour signifier nombres. Or les chiffres, ce sont les symboles ; c'est une erreur de confondre les lettres et les mots. Il y a des mots d'une lettre en français, mais ce ne sont pas des lettres. Longtemps, zéro a été un symbole, pas un nombre.

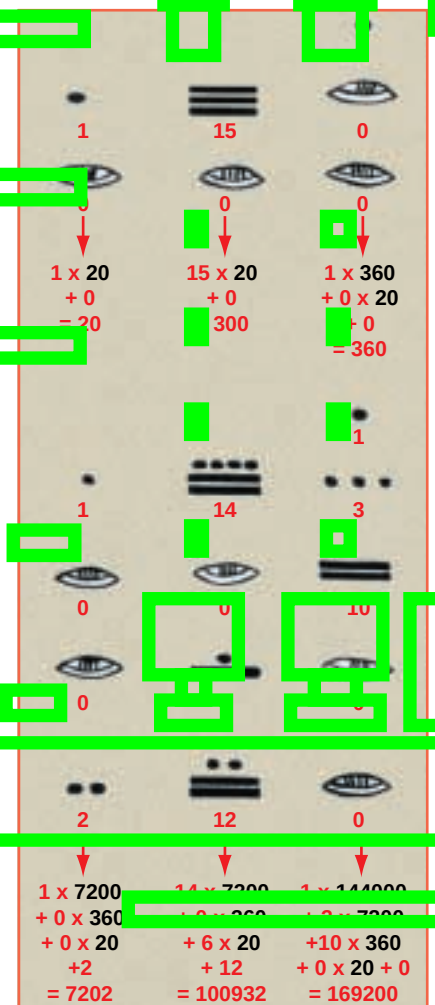
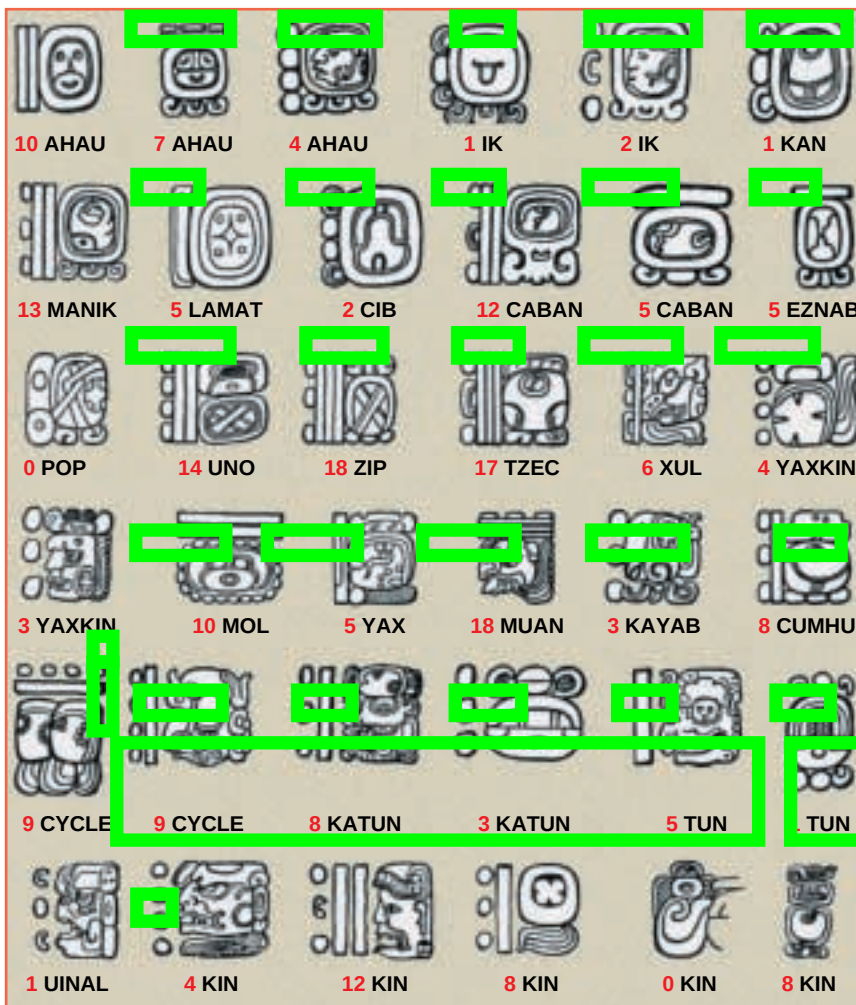
## LE ZÉRO ET L'INFINI

Dès qu'il a fallu faire de l'arithmétique, il a fallu expliciter les opérations sur le zéro. Les règles de base sont explicitées dans les traités de calcul indiens du *v*<sup>e</sup> siècle, mais les Indiens ne posent le problème de la division par zéro. C'est là que l'infini apparaît. De manière floue. Par exemple, Brahmagupta, au *vii*<sup>e</sup> siècle,

dit : «Un nombre divisé par zéro, ça fait ce qu'il dénomme *taccheda*. *Taccheda* c'est le mot de dénominateur et *taccheda* signifie ce qui a ce dénominateur», c'est-à-dire la fraction qui a pour dénominateur zéro.

Un auteur un peu postérieur Mahāvīra, commet une erreur. Il énonce : «Un nombre divisé par zéro, ça fait zéro.» Bhāskara, qui vit au *xii*<sup>e</sup> siècle, à l'apogée de la mathématique indienne, tente de clarifier la question en énonçant : «Un nombre divisé par zéro, c'est le nombre qui a comme dénominateur *kha*, c'est-à-dire le creux, le vide, zéro.»

Il précise : «Ce nombre ne peut être ni augmenté ni diminué», en se référant à la mythologie indienne où zéro est comme le dieu immuable qui n'est ni augmenté ni diminué au changement de cycle. Dans la conception indienne de l'éternel retour, quand le monde disparaît et est recréé, un nombre gigantesque d'êtres sont absorbés, sont créés mais le dieu reste immuable.



4. Exemples d'utilisation de barres et de cercles dans la numérotation calendaire maya. À chaque nombre est associé le signe d'une période, d'un jour ou d'un mois. Les Mayas commençaient logiquement leur numérotation par zéro. Certaines désignations de

nombres sont seulement utilisées dans les calendriers. Dans les codices (à gauche), le système de numération est à base 20, sauf pour le troisième ordre, de base 18 (pour faire que 1 en troisième position donne 360, le nombre approximatif de jours dans un an).

Un autre auteur indien, Krishna, aborde le concept d'infiniment petit, qui sera très utilisé dans le calcul différentiel et intégral à la fin du XVII<sup>e</sup> et au XVIII<sup>e</sup> siècles. Euler, le grand mathématicien du XVIII<sup>e</sup> siècle, développait ce calcul infinitésimal avec des infiniment petits, qu'il négligeait dans certains calculs. Comme les mathématiques sont une science parfaitement exacte, on ne peut pas négliger quelque chose qui ne soit pas rigoureusement nul, donc ces infiniment petits... sont nuls.

Mais alors, comment peut-on calculer avec des zéros ? Dans le calcul infinitésimal, il y a des choses qu'on appelle  $dx$ ,  $dx^2$ . Si toutes valent zéro, que signifie cette notation ? Euler explique qu'il y a deux façons de comparer des grandeurs. La façon qu'il appelle arithmétique, qui consiste à dire : « Deux quantités sont égales si leur différence est nulle ». Sous ce rapport-là, tous les infiniment petits sont égaux entre eux. Selon une autre façon de voir, deux quantités sont égales quand leur quotient est égal à 1, et, à ce moment-là le quotient de deux zéros,  $0/0$ , peut avoir un sens, comme l'indiquait le mathématicien indien Bhāskara.

Cette définition est imposée par l'astronomie chez Bhāskara, et par le développement du calcul différentiel chez Euler. La pratique d'Euler du calcul sur des infiniment petits, nuls quand cela l'arrange, ne nous satisfait plus maintenant. Au XX<sup>e</sup> siècle, on a développé une théorie, l'analyse non standard, où les infiniment petits ont un statut propre sans être des zéros : ce sont des quantités qui, multipliées par n'importe quel entier, restent toujours infiniment petites. On a ainsi donné un sens légitime et rigoureux à tous ces infiniment petits qui avaient un statut incertain au XVII<sup>e</sup> siècle et même encore au XIX<sup>e</sup> siècle.

Zéro est-il le premier nombre ? Quand on commence à numérotter, on commence par 1, pas par 0. On s'interroge : le XX<sup>e</sup> siècle se termine-t-il en 2000 ou en 2001 ? On verra bientôt refluer le débat parce que notre ère commence par l'année 1 et pas par l'année zéro. Les Mayas, des spécialistes du calendrier, étaient plus cohérents : ils commençaient le mois par le jour zéro. Chez les Mayas, la querelle sur le début du troisième millénaire n'aurait pas lieu d'être !

Au siècle dernier, Peano a fondé l'axiomatique, mais il n'admettait pas encore zéro comme nombre et il commence à 1, ce qui est maladroit.

0<sup>0</sup> ?

Le problème de la valeur de  $0^0$  apparaît dans Euler. Quelle est la valeur de  $a^b$  quand on fait tendre  $a$  et  $b$  vers zéro. Il

y a ou non une limite selon la façon dont  $a$  et  $b$  tendent vers zéro. Si on fait  $x^x$  et qu'on fait tendre  $x$  vers zéro, on obtient 1. C'est la seule définition raisonnable, cohérente, de  $0^0$ . Nous pouvons même la justifier avec la théorie des ensembles.

En théorie des ensembles, les nombres découlent des conceptions sur les ensembles. On définit les nombres ordinaux à partir de l'idée d'ensembles bien ordonnés. Un ensemble bien ordonné, c'est un ensemble où l'on a une relation d'ordre qui permet de dire si un élément est avant ou après un autre : chaque fois qu'on prend une partie non vide d'un ensemble bien ordonné, cette partie a un premier élément.

Dans la hiérarchie des ensembles, il y a d'abord l'ensemble vide qui n'a aucun élément : quel que soit l'élément  $x$ ,  $x$  n'appartient pas à l'ensemble vide. Ce qui est difficile à concevoir, c'est que, là où il n'y a rien, il y a quand même un ensemble. Il faut s'abstenir de la tête qu'un ensemble est une collection d'objets, parce qu'une collection qui n'a aucun objet n'est pas une collection.

L'ensemble vide est déjà un ordinal, l'ordinal zéro. On peut construire un deuxième ensemble qui a pour seul élément l'ensemble vide. C'est l'ordinal 1.

Ensuite on prend l'ensemble qui a comme seul élément l'ensemble vide, et l'ensemble vide, et l'on définit l'ordinal 2.

Cette construction des nombres entiers à partir de l'ensemble vide est l'œuvre du mathématicien américain d'origine hongroise von Neumann. Les cardinaux sont des ordinaux particuliers : chaque ordinal fini est un cardinal. À chaque ensemble correspond un cardinal qui compte combien il y a d'éléments. Sur les ensembles, on peut faire des constructions qui singent les opérations arithmétiques sur les nombres. On définit ces opérations sur les ensembles d'abord et les opérations sur les nombres en découlent.

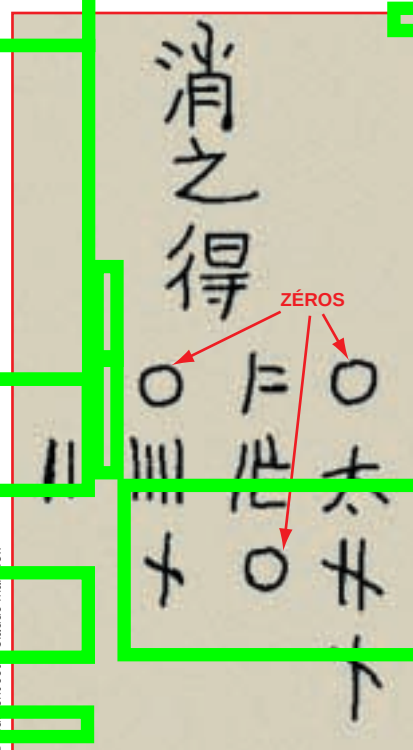
Ainsi, la somme disjointe des deux ensembles est un nouvel ensemble dont les éléments appartiennent à l'un ou à l'autre. Cette somme correspond simplement à l'addition des nombres : si l'ensemble  $A$  a pour cardinal  $a$ , si  $B$  a pour cardinal  $b$ , le cardinal de la somme disjointe est  $a + b$ . Cette transposition à toutes les propriétés de l'addition et peut être étendue aux cardinaux infinis. Similairement, le produit  $A \times B$  de deux ensembles  $A$  et  $B$  est l'ensemble des couples qui ont deux composantes  $a$  ;  $b$ , une composante  $a$  dans  $A$ , une composante  $b$  dans  $B$ . Le cardinal de  $A \times B$  est le cardinal de  $A$  multiplié par le cardinal de  $B$ .

Une troisième opération est l'exponentiation :  $A^B$ ,  $A$  et  $B$  étant des ensembles : c'est l'ensemble de toutes les applications de  $B$  dans  $A$  qui, à chaque élément de  $B$ , associe un élément de  $A$ . L'ensemble de ces applications est  $A^B$ . Le cardinal de  $A^B$  c'est le cardinal de  $A$  à la puissance du cardinal de  $B$ . Nous pouvons alors donner un sens à  $0^0$ , qui est le cardinal de l'ensemble vide à la puissance de l'ensemble vide : ce sont toutes les applications de l'ensemble vide dans lui-même. Comme il n'y en a qu'une,  $0^0$  est égal à 1.

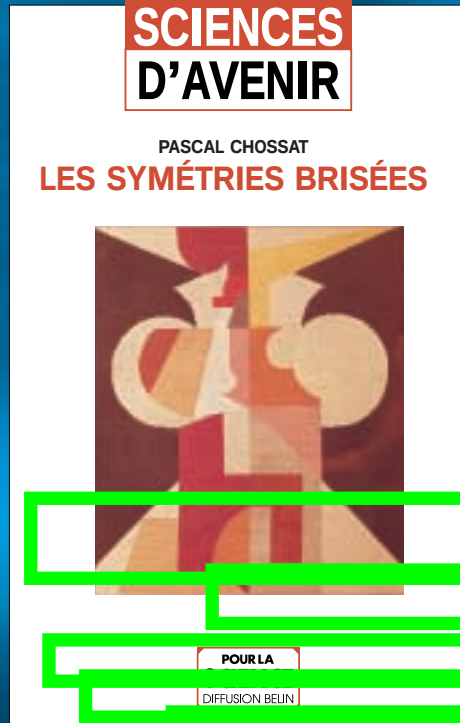
## LES AUTRES ZÉROS

L'invention du zéro est une très grande découverte mathématique : tout un pan des mathématiques est né de ce bouillonnement qui vient du zéro.

Sans le zéro, il n'y a pas de dérivées, pas de calcul infinitésimal, pas d'intégrales. L'utilisation du zéro en tant qu'infiniment petit non nul est très délicate, et s'affine encore aujourd'hui. En géométrie algébrique, on a besoin d'infiniment petits parce que les courbes algébriques ont des tangentes. Il faut savoir les construire, calculer dessus, mais, en algèbre, on ne peut pas tou-



5. Le plus ancien texte mathématique chinois comportant le symbole du zéro sous forme d'un cercle est le *Shushu jiu Zhang* de 1247. Le texte ci-dessus, le *Siyuan yujian*, date de 1303. L'énorme intervalle entre le zéro-cercle indien et le zéro-cercle chinois militerait en faveur d'une influence indienne.



## LES SYMÉTRIES BRISÉES

Pascal Chossat

La symétrie, de simple conséquence des lois physiques, est devenue principe d'explication dans des domaines aussi divers que les transitions de phase ou la turbulence.

La théorie des brisures de symétrie rend compte de la diversité des phénomènes en s'attachant aux symétries perdues, «brisées», d'un état originel.

Elle donne une nouvelle compréhension de la genèse des formes dans la nature.

■ Voir bon de commande p. 98

POUR LA  
**SCIENCE**  
DIFFUSION BELIN

jours faire tendre une quantité vers zéro, comme on le fait en analyse, parce qu'on ne calcule pas toujours avec des nombres réels.

Il arrive alors que l'on utilise d'autres règles : par exemple, en calculant «modulo quelque chose», c'est-à-dire en remplaçant chaque nombre par le reste de la division par un certain module. Ainsi 3 est égal à 1 modulo 2 parce que le reste de la division de 3 par 2 donne 1. Dans ce cadre, des éléments dénommés «nilpotents» jouent le rôle du zéro. Ce sont, par exemple, des éléments non nuls, mais dont le carré est nul. On peut considérer que cet  $\varepsilon$  est un élément petit, parce que son carré est nul. Quand on fait de l'analyse, on dira  $\varepsilon$  est petit, le carré est beaucoup plus petit, on le néglige : en algèbre on dit  $\varepsilon$  n'est pas nul, mais le carré de  $\varepsilon$  est nul.

Ce type de calcul est facile à concevoir parce qu'il est familier. Les compteurs d'eau, les compteurs de kilomètres des voitures repartent à zéro automatiquement quand ils dépassent un certain nombre. Les Mayas avaient cette conception du calendrier : à la fin de l'année, ils repartaient à zéro.

Examinons un exemple numérique : dans le calcul modulo 9, chaque nombre est remplacé par le reste de sa division par 9. (C'est ce qu'on fait quand on fait la preuve par 9). Trois est un élément nilpotent : le nombre 3 n'est pas nul, mais, modulo 9,  $3^2$ , qui fait 9, est égal à zéro.

### UN ARGUMENT RÉALISTE ?

Toutes ces belles propriétés sont-elles inattendues ? Ce qui est inattendu, c'est qu'elles aient été indépendamment découvertes par de multiples civilisations. Sont-elles le fruit de l'imagination humaine, comme l'affirment les constructivistes, ou toutes les belles caractéristiques du zéro reposent-elles dans une caverne scintillante de type Ali Baba qu'il nous appartient d'explorer, comme le pensent les réalistes ? Le zéro pose toute une question de validité des mathématiques et des difficultés de sa définition.

Christian ROZELLE est mathématicien, historien des mathématiques et professeur à l'IUFM (Institut universitaire de formation des maîtres) de Paris.

Une retranscription de ce débat, enregistré avec Émile Noël au Palais de la Découverte, sera diffusée sur France Culture le 9 octobre à 9 heures.

# Bières de pharaons

Les Égyptiens connaissaient le maltage.

Les hiéroglyphes ont révélé que les Égyptiens fabriquaient de la bière, mais comment s'y prenaient-ils ? Les provisions de route pour l'au-delà, enterrées avec les défunts, viennent de le dire : utilisant des résidus de cette bière, l'archéologue Delwen Samuel, de l'Université de Cambridge, a reconstitué les recettes des brasseurs égyptiens.

On a longtemps cru que les Égyptiens étaient des brasseurs primitifs : ils auraient fait leur bière à partir de pâte à pain très levée et peu cuite, qu'ils auraient dispersée dans l'eau, tamisée et fermentée par les levures utilisées pour la confection du pain. Comment tester cette hypothèse ? Les résidus alimentaires antiques étant très bien conservés dans le climat aride de l'Égypte (les micro-organismes ont besoin d'eau pour proliférer), les archéologues des années 1920 avaient utilisé le microscope optique pour préciser la matière première des brasseurs égyptiens : du blé emmer (*Triticum dicoccum*) et de l'orge, utilisés soit ensemble, soit séparément. Quels traitements ces céréales subissaient-elles ?

D. Samuel a complété les premières études par des analyses au microscope électronique de tissus végétaux, de grains d'amidon, de levures et d'autres micro-organismes. Elle s'est surtout intéressée

aux grains d'amidon des céréales retrouvées à Deir el-Medina, où vivaient entre l'an -500 et l'an -307 les ouvriers qui construisaient les tombes de la Vallée des rois ; d'autres échantillons analysés provenaient d'Amarna, en Moyenne Égypte. Les grains d'amidon étant modifiés de façon caractéristique par les traitements qu'on leur fait subir, l'archéologue britannique supposait que l'on trouverait dans la morphologie des grains antiques la clef des anciens procédés de brasserie.

Les céréales sont composées de grains d'amidon dans des enveloppes ; les grains, eux, sont composés de deux types de grosses molécules, l'amylose et l'amylopectine, enchaînement respectivement linéaire et ramifié d'un motif de base qui est le glucose.

Quand des grains d'amidon sont chauffés dans l'eau, l'amylose se dissout dans la solution, et le reste des grains gonfle, parce que l'eau s'introduit par capillarité entre les molécules. Au microscope, on voit les grains gonfler, se replier et, finalement, fusionner. Quand la quantité d'eau est limitée, les grains ne sont pas complètement dispersés, de sorte qu'ils conservent une limite identifiable.

De surcroît, les enzymes des céréales qui germent dissocient l'amidon en molé-

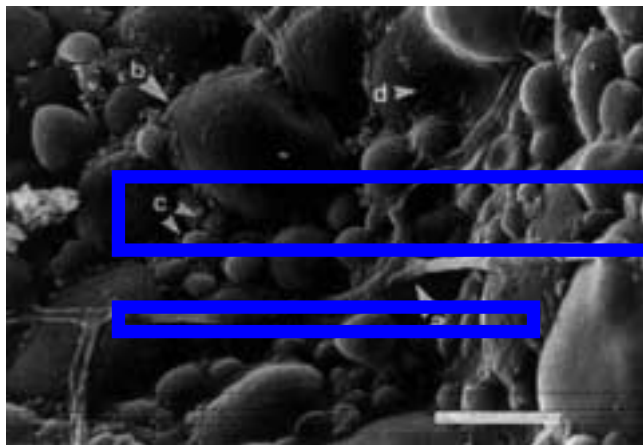
cules plus petites, les dextrines ou les sucres élémentaires, ce qui crible la surface des grains d'amidon de petites cavités et creuse des galeries dans les grains. Si les Égyptiens avaient obtenu de la bière en dispersant seulement de la mie de pain dans l'eau, les grains d'amidon auraient été simplement fusionnés, mais comme ils étaient également attaqués, D. Samuel a conclu que les Égyptiens pratiquaient une sorte de maltage (le maltage moderne est l'opération qui consiste à remper de l'orge dans l'eau, à provoquer la germination des grains, puis à sécher ces derniers dans une touraille).

Apparemment les Égyptiens maltaient et chauffaient d'abord les grains, ce qui engendrait les sucres et des molécules aromatiques par les réactions dites de Maillard, entre les sucres et les acides aminés. Puis ils mélangeaient les grains maltés à des grains germés et non chauffés et à de l'eau. La solution formée était ensuite décantée et fermentée.

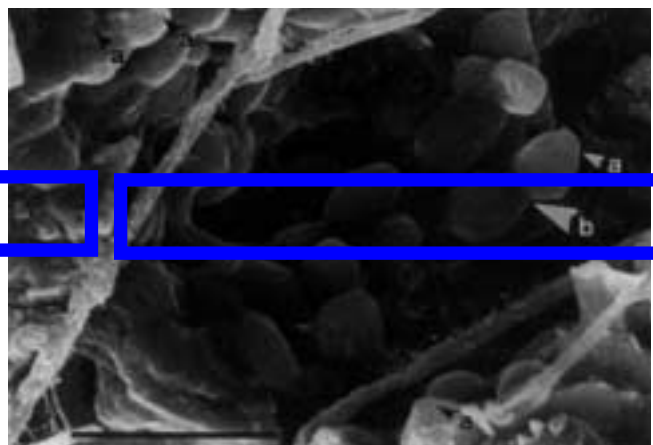
Quels ustensiles utilisaient-ils pour le maltage ? Les archéologues, guidés par les analyses au microscope, peuvent se mettre en quête. Quel goût avait leur bière ? James Merrington, brasseur à Newcastle, a tenté de fabriquer la bière retrouvée par D. Samuel : utilisant blé emmer, coriandre et genièvre, il a obtenu une bière plaisante, avec un goût complexe et puissant. Ce n'est peut-être pas une réplique des bières antiques, mais la tentative était intéressante.

Hervé This

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



Microstructure d'un fragment de pain. On distingue des grains d'amidon de diverses tailles. Les grains ne présentent pas de signe de déformation particulière.



Cellules de levure trouvées dans des résidus de bière trouvés dans une poterie d'une tombe de l'Égypte antique. On aperçoit des modifications sur plusieurs grains (b).

France Culture  
et  
Pour la Science

vous invitent  
au Palais  
de la Découverte  
à l'enregistrement  
de leur  
nouvelle émission

les  
Inattendus  
de la  
Science

Samedi 12 octobre  
à 15h

La paléontologie

avec Michel Brunet  
professeur à l'Université  
de Poitiers

Directeur du Laboratoire  
de géologie, biochronologie  
et paléontologie humaine

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



Palais de la découverte

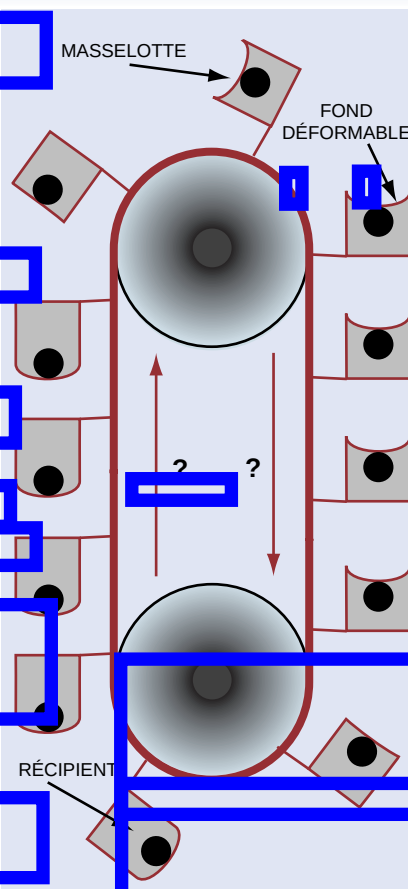
POUR LA  
SCIENCE

# JEU-CONCOURS

PIERRE TO

N° 28

## LE MOUVEMENT PERPÉTUEL



Faut-il vraiment expliquer le diagramme à gauche ? C'est une machine perpétuelle. La masselotte, solidaire du fond du récipient, est représentée par un disque noir sur le schéma. Elle entraîne et déforme le fond du récipient selon l'orientation de celui-ci, vers le haut ou vers le bas. La force d'Archimède, proportionnelle au volume, fait tourner le système selon le sens indiqué par les flèches...

Mais nous savons tous que le mouvement perpétuel est impossible. Nous demandons aux lecteurs de nous expliquer pourquoi le système représenté ici ne «tourne pas».

De plus, si vous connaissez d'autres machines à mouvements perpétuels, hydrodynamiques, électriques, magnétiques ou autres, indiquez-les nous. Nous publierons les plus originaux, les plus surprenants, en vous remerciant grâce.

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'octobre 1996, dix gagnantes au sort recevront un livre de la Collection *Univers des Sciences*.

## RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 28

Si l'on désigne par  $N$  le nombre de cartes d'un tas quelconque et  $V$  la valeur de la carte du dessous, on a la relation  $N + V = 14$  (A). Soit  $(n_1, v_1)$ ,  $(n_2, v_2)$  et  $(n_3, v_3)$  les valeurs de  $n$  et  $v$  des trois tas conservés. On aura alors, en main,  $N = 52 - (n_1 + n_2 + n_3)$  cartes. Si par exemple ce sont les cartes du dessus des tas 1 et 2 qui sont retournées,  $v_1$  et  $v_2$  nous sont connus et donc aussi  $n_1$  et  $n_3$  grâce à la relation (A). Il faut trouver  $v_3$ . Or  $v_3 = 14 - n_3 = 14 + N - 52 + n_1 + n_2 = N - 38 + 14 - v_1 + 14 - v_2 = N - 10 - v_1 - v_2$ .

Nombreux ont été les lecteurs à résoudre ce petit problème, mais auraient-ils été aussi perspicaces devant le tour de magie qu'il permet de réaliser ? Distribuez un jeu de 52 cartes selon le procédé décrit (mais en commençant mentalement !), retournez-vous et demandez à la personne de choisir trois tas, de les retourner et de vous donner les cartes restantes. À ce moment, vous vous retournez et demandez que l'on retourne la carte de dessus de deux paquets quelconques. Maintenant il vous suffit, en regardant les cartes dans votre main, de compter mentalement  $10 + v_1 + v_2$  cartes, le nombre de cartes restantes vous donnant la valeur de la carte du dessus du troisième paquet. Essayez-le avec des amis !

# Pansement pour fracture

*Un pansement à l'ADN accélère la cicatrisation osseuse.*

Chaque année, en France, des milliers de personnes souffrent de fractures osseuses dont certaines se réparent mal. Peut-on favoriser la cicatrisation des os ? À l'Université du Michigan, Jeffrey Bonadio et ses collègues ont utilisé un pansement constitué d'une éponge naturelle imbibée d'ADN pour réparer des os de rats sectionnés. Une cicatrisation osseuse parfaite a été obtenue en quelques semaines.

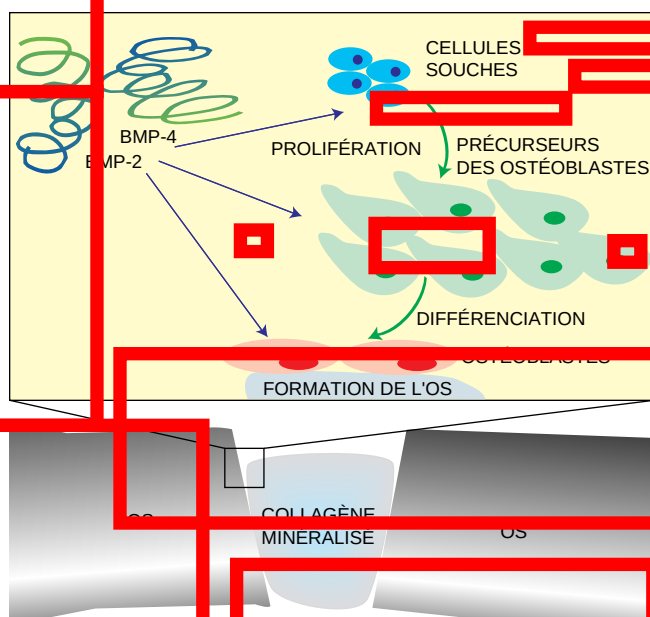
Chez les organismes supérieurs, l'os remplit deux fonctions physiologiques : une fonction de soutien et de protection des organes vitaux, grâce à sa résistance et à sa solidité, et une fonction métabolique. Au cours de son développement normal, l'os est constamment remodelé. Deux types de cellules assurent cette fonction : les ostéoclastes détruisent l'os, tandis que les ostéoblastes le construisent.

En 1965, M. R. Urist a montré que chez l'animal, l'implantation d'os déminéralisé dans un site non squelettique (abdomen ou muscle) déclenche l'ostéogenèse (formation osseuse). La formation des os est contrôlée par des protéines nommées *bone morphogenetic proteins* ou BMP (protéine de la morphogenèse osseuse).

Après une cassure, comment l'os se consolide-t-il ? Les protéines BMP présentes dans l'os lui-même déclenchent la prolifération de cellules pouvant donner naissance à des populations cellulaires différentes. Après différenciation, sous l'action des BMP, les ostéoblastes présents à proximité de la cassure synthétisent une protéine, le collagène. Ces cellules adhèrent aux fibres existantes et continuent la production du collagène dont la minéralisation donnera de l'os nouveau.

Pour tester l'action de ces protéines osseuses, on les a purifiées, puis asso-

ciées à un support qui les protège et qui sert aussi de germe, pour l'édification de l'os néoformé. Ainsi l'effet d'une protéine osseuse la BMP-2 (produite par recombinaison génétique) a été évalué sur des fémurs de rats fracturés. La BMP-2 associée à un matrice de collagène, utilisée comme support, montre à l'examen radiologique une augmentation significative de la construction osseuse. De plus, des tests mécaniques ont révélé



Après une fracture, les protéines BMP activent les mécanismes de la formation osseuse, provoquant la prolifération et la différenciation de cellules souches en ostéoblastes. Les ostéoblastes migrent vers la matrice de collagène, y adhèrent et synthétisent du collagène qui, en se minéralisant, forme de l'os. Véritables usines à BMP, les cellules hôtes en contact avec une éponge imbibée d'ADN codant une BMP favorisent la consolidation des fractures osseuses.

une parfaite union fonctionnelle entre les bords du défaut et l'os nouvellement formé. Chez le babouin, animal plus proche de l'homme que le rat ou la souris, plusieurs études réalisées avec la BMP associée à du collagène ont également montré une parfaite cicatrisation de l'os sectionné.

Jusqu'à aujourd'hui, toutes les études réalisées avec les BMP utilisaient de grandes quantités de protéines purifiées,

coûteuses à produire. De plus, ces protéines sont rapidement dégradées par diverses enzymes. Aussi, la durée de vie des protéines utilisées directement n'est que de 10 secondes, limitant leur action. D'autre part, les fortes doses utilisées sont toxiques.

## UN PANSEMENT ÉPONGE

Pour pallier ces inconvénients, J. Bonadio et ses collègues ont eu l'idée de tester, au lieu des protéines BMP purifiées, mais directement de l'ADN qui code l'une de ces protéines, la BMP-4. On a retiré cinq millimètres d'un os d'une quinzaine de rats de laboratoire. Dans un cas, on a utilisé des morceaux d'éponges naturelles imbibées de collagène et d'ADN codant la BMP-4. Dans d'autres cas, on ajoutait également un fragment d'ADN codant une hormone qui régule le métabolisme osseux. Ces éponges étaient ensuite implantées à la place du morceau d'os manquant. Le résultat est spectaculaire : neuf semaines

suffisent pour obtenir une cicatrisation osseuse parfaite et, lorsque les deux ADN sont associés, le temps de consolidation est réduit de moitié. Cette façon d'administrer localement l'ADN codant des protéines participant à la formation osseuse protège les protéines des dégradations. Les BMP-4 sont produites par des cellules de la peau (les fibroblastes) présentes en grande quantité à proximité d'une blessure. Les mécanismes de protection interne de ces cellules évitent la BMP produite d'être dégradée trop rapidement. De plus, comme la production des protéines est lente, l'organisme ne reçoit plus des doses de BMP élevées, ce qui évite toute toxicité.

Cette accélération de la consolidation des fractures osseuses ouvre des perspectives en chirurgie orthopédique. D'autres facteurs de croissance et de différenciation interviennent pour la formation osseuse, et des expérimentations avec les ADN codant ces facteurs sont en cours. Après avoir montré que cette méthode permet une reconstruction osseuse de grande taille (par exemple chez le singe), cette approche peu coûteuse devrait rapidement être testée chez l'homme.

Abderrahim LOMRI,  
INSERM Unité 349, Paris

# Un ancêtre précoce

La mâchoire fossile d'un parent de l'éléphant prouve l'ancienneté de la diversification des mammifères modernes.

Les mammifères apparaissent à la même époque que les dinosaures, il y a environ 230 millions d'années. Pendant 150 millions d'années, ils restent discrets. Ce sont des animaux de petite taille, nocturnes, insectivores ou carnivores. Lorsque les dinosaures disparaissent, les mammifères se diversifient et les remplacent dans presque tous les milieux. Leur succès ne s'est pas démenti depuis. Quand et comment cette « radiation » des grands groupes de mammifères actuels s'est-elle produite ? La découverte en Afrique, d'une espèce primitive de la lignée des éléphants prouve la rapidité de cette transition : tous les ordres de mammifères actuels sont apparus en moins de 20 millions d'années.

En 1994, dans une vente de fossiles et de minéraux, François Escuillie, de l'Association de paléontologie *Rhinopolis*, découvre un fragment de mâchoire de mammifère parmi des restes d'animaux marins provenant de gisements de phosphate du bassin Ouled Abdoun, au Maroc.

Il ignore de quel endroit précis le fossile a été extrait, et son âge. Selon les études morphologiques réalisées par Emmanuel Gheerbrant, du Laboratoire de paléontologie des vertébrés (CNRS et Université Paris 6), et Jean Sudre (EPHE), le fragment de maxillaire et les dents supérieures conservées sont ceux d'un proboscidién primitif (les éléphants sont les seuls représentants actuels de cet ordre).

Comme chez les autres proboscidiens, les molaires ont deux grandes crêtes transversales et la première prémolaire est absente, remplacée par une barre osseuse. La position antérieure par rapport aux dents, des orbites oculaires (déduite de la forme de la mâchoire) indique un raccourcissement de la face, caractéristique des proboscidiens et de leurs proches parents les siréniens (l'ordre des lamantins).

Ce fossile présente toutefois des caractères primitifs par rapport aux plus anciens proboscidiens connus. D'abord, l'animal était de petite taille : les dimensions de ses

dents indiquent qu'il ne pesait pas plus d'une quinzaine de kilogrammes. Ensuite, la crête externe des molaires supérieures a une forme, vue de dessus, en W : cette caractéristique générale des ongulés est absente chez les proboscidiens de moins de 50 millions d'années. Tous ces caractères originaux indiquent un nouveau genre et une nouvelle espèce, nommée *Phosphaterium escuilliei*.

53 À 59  
MILLIONS D'ANNÉES

Quel âge a *Phosphaterium escuilliei* ? Les couches sédimentaires du bassin Ouled Abdoun sont toutes identifiées et datées. La réponse est donc venue de la gangue de phosphates qui enveloppait le fossile. Les petites dents de requin qu'elle contenait, identifiées par Henri Cappetta, du CNRS, sont caractéristiques de la dernière période du Paléocène, le Thanétien, il y a 53 à 59 millions d'années. Cette datation s'accorde avec l'analyse phylogénétique du fossile : *Phosphaterium escuilliei* est le plus ancien proboscidién connu, et le plus primitif. Sa découverte repousse de sept millions d'années au moins la date d'apparition de l'ordre.

Selon les comparaisons morphologiques et la biologie moléculaire des animaux actuels, l'ordre des proboscidiens est l'un des derniers ordres de mammifères à s'être différencié. La diversification de ces derniers était donc achevée lorsque vivait *Phosphaterium escuilliei*, nettement plus tôt que ce que laissent entrevoir jusqu'ici les archives paléontologiques. Cette radiation des ordres modernes de mammifères, qui a commencé à la fin du Crétacé et a atteint son paroxysme au début du Paléocène, il y a environ 60 millions d'années, a donc été extrêmement rapide.

Selon E. Gheerbrant, cette découverte démontre l'importance des événements évolutifs qui se sont déroulés en Afrique. L'isolement de ce continent, de la séparation d'avec l'Amérique du Sud, il y a 100 millions d'années, à la collision avec la plaque eurasiatique, il y a 24 millions d'années, a permis l'émergence de grands groupes de mammifères (quatre à huit des 18 ordres actuels sont d'origine africaine), aujourd'hui composantes importantes de la faune mondiale. Les proboscidiens modernes, représentés par les éléphantiformes, ont ainsi colonisé tous les continents, à l'exception de l'Australie et de l'Antarctique, même s'ils ne sont plus représentés aujourd'hui qu'en Afrique et en Asie. Le succès des primates est plus éclatant encore. La compréhension de l'origine et de la diversification de la faune moderne passera donc par de nouvelles prospections et fouilles en Afrique. □



Ce fragment de maxillaire, de 53 à 59 millions d'années, appartenait au plus ancien proboscidién connu (l'ordre des éléphants) : l'absence de la première prémolaire, remplacée par une barre osseuse (flèche verte), et les deux grandes crêtes transversales des molaires (flèche rose) sont caractéristiques des proboscidiens. Cet animal de petite taille est le plus primitif des proboscidiens : la forme en W de la crête externe des molaires vue de dessus (flèche rouge) est absente chez les formes plus évoluées.

# Enzymes et médicaments

*L'effet de divers médicaments dépend de l'activité, variable, des enzymes P450.*

**P**rendre deux comprimés matin, midi et soir. Les posologies des médicaments, les doses actives pour un minimum d'effets secondaires, sont établies d'abord sur l'animal, puis sur l'homme au cours des essais cliniques qui aboutissent à l'autorisation de mise sur le marché. Généralement, les molécules thérapeutiques sont oxydées, à un moment ou à un autre de la chaîne des réactions qui métabolisent le produit administré, et qui ont souvent lieu dans le foie. Grâce à cette dégradation, les substances actives, potentiellement toxiques, ne s'accumulent pas dans l'organisme. Or, la concentration des cytochromes P450, les enzymes qui assurent cette dégradation, varie notablement d'une personne à l'autre.

Les enzymes P450, les principaux agents de la biotransformation des médicaments, participent aussi au métabolisme de diverses substances exogènes, tels la caféine, les pesticides ou les substances cancérigènes, et de molécules endogènes, les hormones stéroïdes, par exemple. Plusieurs équipes, et notamment celle de Daniel Mansuy, à l'Université René Descartes, en étudient les propriétés biochimiques et pharmacologiques. Ces petites protéines abondent dans le foie et ont des propriétés oxydantes. Aujourd'hui, on a isolé plus de 500 cytochromes P450, répartis en une trentaine de familles, et capables de transformer plusieurs centaines de milliers de molécules. Chacun métabolise un petit groupe de produits de structure analogue.

Les gènes codant les P450 sont polymorphes : chez quelques personnes, certaines enzymes ne sont pas synthétisées, d'autres sont fabriquées, mais en quantité variable, d'autres encore sont présentes sous une forme inactive. Si la concentration totale de ces cytochromes P450 est quasi constante dans la population générale, les concentrations de

chacun d'eux peuvent varier de 1 à 1 000. Selon son patrimoine génétique, une personne peut ne pas disposer de la panoplie des enzymes P450 nécessaires au métabolisme « normal » des médicaments et présenter des réactions plus ou moins graves à certains traitements.

Quand un patient à qui l'on administre un médicament ne synthétise pas le cytochrome P450 qui dégrade cette molécule, cette dernière s'accumule, risquant de déclencher des effets secondaires indésirables. En outre, certains médicaments doivent d'abord subir une transformation biochimique pour devenir actifs : quand une personne est dépourvue du P450 qui assure la libération de la forme active du médicament, le traitement est sans effet aux doses recommandées. Au contraire, chez une personne dont la concentration en ce P450 est trop élevée, la biotransformation et la libération de la forme active sont rapides, de sorte que la concentration toxique de la forme active est rapidement atteinte.

De surcroît, si le patrimoine génétique de chacun influe sur la concentration des enzymes P450, cette dernière dépend également de la consommation de tabac et d'alcool, ainsi que de l'administration simultanée de plusieurs médi-

caments. Selon les cas, la synthèse et/ou l'activité des P450 est augmentée ou inhibée. Quand un premier médicament augmente la biosynthèse d'un P450, le deuxième médicament risque d'être métabolisé trop vite : cette molécule active est dégradée avant d'agir ; quand c'est un des métabolites du second médicament qui a les propriétés thérapeutiques, sa concentration augmente rapidement et le seuil de toxicité peut être atteint. Inversement, quand le premier médicament inhibe la synthèse ou l'activité d'un P450 dégradant le second médicament, la concentration sanguine de ce dernier augmente, éventuellement jusqu'au seuil de toxicité.

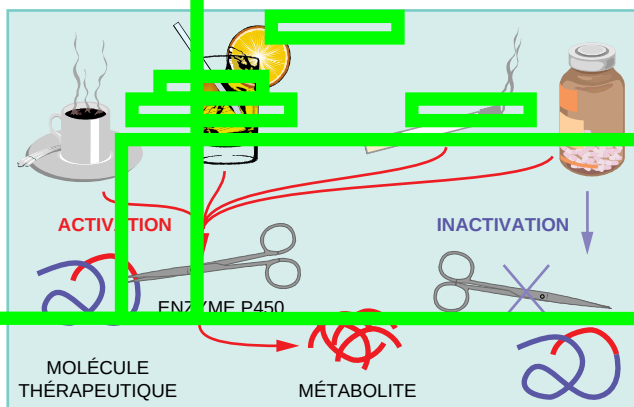
## P450 ET ANTIBIOTIQUES

Ainsi, des antibiotiques de la série des macrolides, telle la troléandomycine (TAO), inhibent l'activité de certains P450, et l'on a constaté que l'administration simultanée de macrolides et de dihydroergotamine ou de ciclosporine a des effets néfastes. Un surdosage de la dihydroergotamine, administrée notamment en traitement de fond des migraines, entraîne l'apparition de fourmillements dans les doigts, puis d'engourdissement, de troubles digestifs divers et, parfois, de convulsions. On a également constaté des crises d'épilepsie avec la théonibilline (principal constituant alcaloïde des feuilles de thé et stimulant du système nerveux central), et des hémorragies avec les anticoagulants, administrés en même temps que certains antibiotiques macrolides.

Si l'on constate un polymorphisme entre les individus d'une même population, les populations, prises dans leur ensemble, présentent également un polymorphisme pour certaines enzymes : quatre pour cent des Caucaasiens (les populations blanches d'Europe et d'Amérique du Nord) sont des métaboliseurs lents de l'acétaminophène, un antalgique usuel, tandis que la proportion atteint 20 pour cent chez les Asiatiques (chez les métaboliseurs lents, la molécule thérapeutique s'accumule et les effets secondaires néfastes s'intensifient).

Conscients des risques que présentent les variations inter-individuelles du métabolisme

des médicaments, les pharmacologues ne se contentent plus, aujourd'hui, de résultats statistiques pour établir une posologie ; ils tentent de prévoir les P450 qui interviendront dans leur métabolisme. □



**Le café, l'alcool, le tabac ou encore certains médicaments augmentent les quantités de P450. La molécule thérapeutique est alors trop rapidement métabolisée, et son action est fugace. Dans les cas où le métabolite est actif, ce dernier s'accumule, et sa concentration peut atteindre des valeurs toxiques. Quand les enzymes P450 sont inactivées, la molécule thérapeutique n'est pas dégradée et son excès est potentiellement dangereux.**

# Satellites d'astéroïdes

*Les passages répétés d'astéroïdes près de la Terre forment et détruisent les astéroïdes binaires.*

**S**ur la Terre, parmi les 28 cratères d'impacts connus pour leur diamètre supérieur à 20 kilomètres, trois sont formés par des impacts simultanés de deux astéroïdes de tailles comparables. En simulant les trajectoires d'astéroïdes en orbite près de la Terre, les astronomes américains William Bottke et Jay Meesh, montrent que des passages répétés près de la Terre brisent des astéroïdes en deux, ce qui expliquerait le nombre d'impacts doubles observés.

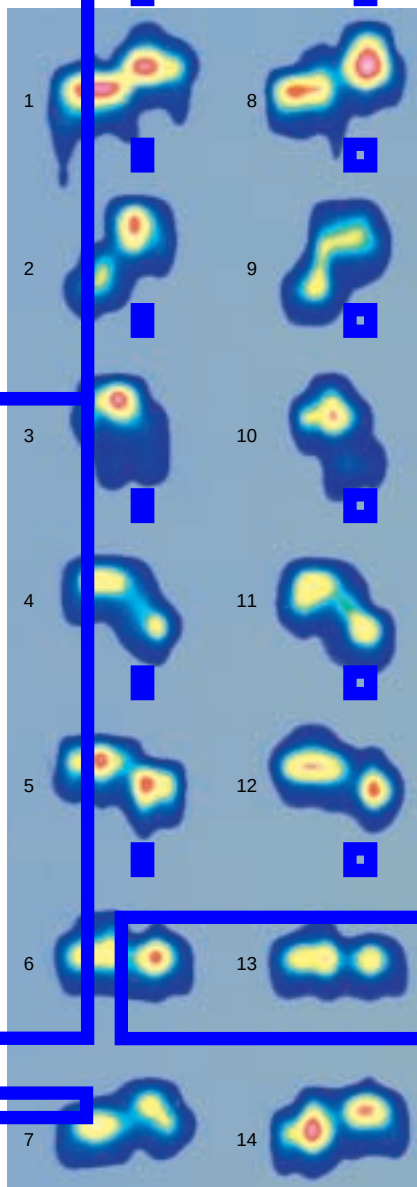
Les astronomes utilisent des techniques d'imagerie radar pour observer la structure des astéroïdes dont l'orbite approche suffisamment celle de la Terre. En 1989, les images radar de l'astéroïde Castalia révèlent sa forme allongée, avec un étranglement en son milieu : cet astéroïde pourrait être composé de deux corps en contact ou de deux corps proches orbitant l'un autour de l'autre (système binaire aux composantes serrées). En 1992, on note une structure analogue pour l'astéroïde Toutatis. Un an plus tard, lors de son survol de l'astéroïde Ida, la sonde Galileo observe la présence d'un satellite, Dactyl. Cet objet est beaucoup plus petit qu'Ida, mais il prouve l'existence de satellites d'astéroïdes.

Le couple Ida-Dactyl constitue un système binaire aux composantes bien séparées. En revanche, Toutatis n'est sans doute pas un tel système, car on distinguerait ses composantes sur les images radar. S'agit-il d'un système binaire aux composantes serrées ? De tels couples ont une période de rotation de quelques heures : s'ils tournaient plus vite, la force centrifuge l'emporterait sur la force de gravitation et le satellite serait éjecté ; s'ils tournaient moins vite, le satellite s'écraserait sur son compagnon. Comme la période de rotation de Toutatis est de l'ordre d'une semaine, il s'agit plutôt de deux corps en contact ou d'un corps unique en forme de cacahouète. Pour Castalia, la période de rotation est de quatre heures et il pourrait s'agir d'un astéroïde binaire aux composantes serrées.

Les impacts doubles sur la surface terrestre aident à déterminer la proportion d'astéroïdes binaires aux compo-

santes séparées : seuls les objets binaires avec des composantes suffisamment séparés créent ces impacts.

Comment évoluent les astéroïdes binaires ? Un astéroïde qui s'approche



Les images radar de l'astéroïde Castalia révèlent une structure formée de deux objets ; cette structure tourne sur elle-même en quatre heures environ. On suit la rotation de haut en bas, puis de gauche à droite.

de la Terre subsiste 100 millions d'années avant d'entrer en collision avec elle. Au cours de son existence, un astéroïde passe donc de nombreuses fois près de la Terre. Or, notre planète perturbe l'orbite des corps dans son voisinage par des forces de marées : pour un système binaire, les orbites de chaque composante ne subissent pas la même force gravitationnelle, car elles passent à des distances différentes de la planète. Cet effet différentiel, d'autant plus important que la distance entre l'astéroïde et la Terre est faible, modifie le mouvement relatif des composantes du système binaire. De surcroît, les forces de marées internes, dues aux forces gravitationnelles entre les composantes, modifient aussi les mouvements.

## MODIFICATION D'ÉTAT

Avec Paolo Farinella, de l'Université de Pise, nous avons montré que ces phénomènes modifient rapidement les systèmes binaires aux composantes initialement séparées. En un temps bref (environ dix millions d'années) devant leur temps de vie, ces systèmes deviennent des systèmes binaires compacts ou des objets indépendants par éjection d'une de leurs composantes. Ceci expliquerait la structure « binaire-contact » d'astéroïdes comme Castalia et Toutatis. De plus, lorsqu'il y a éjection d'une composante, la période de rotation de l'astéroïde restant peut augmenter sensiblement : elle passe de quelques heures à un jour ou deux. Ce modèle d'évolution dynamique n'explique cependant pas pourquoi Toutatis possède une période si longue.

Pourquoi les astéroïdes binaires à proximité de la Terre n'ont-ils pas tous disparu ? Sans doute parce que les systèmes binaires récemment injectés sur une orbite croisant l'orbite terrestre ont été peu perturbés. Ensuite, parce que le mécanisme décrit peut aussi fonctionner en sens inverse : au lieu de faire disparaître les astéroïdes binaires, les forces de marées dues à la Terre peuvent « casser » les astéroïdes, agrégats de corps de tailles variées. Pour un objet de quelques kilomètres de diamètre la cohésion gravitationnelle est faible. Aussi, l'effet des forces de marées différentielles sur les

parties de ces astéroïdes provoque leur rupture, engendrant un astéroïde binaire. Un équilibre s'établit entre création et disparition des astéroïdes binaires. La proportion des couples d'astéroïdes dans cet état binaire, calculée par les astronomes américains, expliquerait la proportion de cratères doubles à la surface des planètes.

Bertrand CHAUVINEAU  
Observatoire de la Côte d'Azur, Grasse

# Le cheval, athlète abouti ?

*La plus noble conquête de l'homme est fragile.*

**P**ourquoi les athlètes humains ont-ils considérablement progressé, au cours du dernier demi-siècle, et pas les chevaux ? Le physiologiste anglais Stephen Buidiansky invoque une limitation physiologique du cheval, mais cette idée est controversée.

Les observations sont incontestables : dans les 50 dernières années, le record humain du 1 500 mètres est passé de 3 minutes 50 secondes à moins de 3 minutes 20 secondes, et les marathoniens ont gagné plus de 28 minutes sur leurs 42 kilomètres. En revanche, les courses équestres de plat se courent dans les mêmes temps. S. Buidiansky donne deux explications. Tout d'abord, les chevaux seraient, par nature, si bien adaptés à la course que leur entraînement serait inutile. Ainsi, dans un graphique qui indique l'intensité métabolique maximale en fonction de la taille, pour les divers mammifères, le cheval est largement en tête. Autrement dit, le cheval ne pourrait pas progresser beaucoup, parce qu'il serait déjà un super-athlète. D'autre part, les caractéristiques du galop limiteraient les performances, notamment en limitant la consommation d'oxygène.

Ces explications sont critiquables. Tout d'abord, l'amélioration des temps de course humains est due à des techniques d'entraînement de mieux en mieux adaptées, à une sélection plus efficace des sportifs et surtout, à une amélioration du matériel : chaussures et pistes ! Cette différence expliquée, il reste à comprendre comment les performances s'améliorent, chez le cheval ou chez l'homme.

Chez l'homme, le temps de course en fond ou en demi-fond dépend de la consommation maximale d'oxygène : on peut prévoir les temps de course en mesurant cette capacité. En revanche, aucune étude du cheval n'a démontré que les performances des chevaux en compétition sont limitées par la consommation maximale d'oxygène (mesurée en laboratoire). Chez l'homme comme chez le cheval, les poumons fournissent de l'oxygène au sang, le cœur pompe le sang vers les muscles, et les muscles transforment en travail mécanique l'énergie stockée sous forme chimique. La per-

formance est au prix d'une bonne efficacité de chacune de ces transformations.

Dans les muscles, plusieurs métabolismes se déclenchent dès le début de l'exercice : après la consommation de l'énergie directement utilisable (la dissociation de la phosphocréatine en ATP), le métabolisme devient anaérobie (sans oxygène), transformant le glycogène en ATP. Toutefois, ce métabolisme, que l'entraînement n'améliore pas beaucoup, libère de l'acide lactique dans les muscles. Aussi le métabolisme aérobie prend-il le relais.

S. Buidiansky suppose que le métabolisme anaérobie des chevaux ne leur permettrait de courir qu'une cinquantaine de mètres, mais cette hypothèse est fautive : les chevaux peuvent courir plusieurs centaines de mètres en utilisant leur métabolisme anaérobie, car leurs réserves de glycogène sont supérieures. Le métabolisme anaérobie reste actif tout au long d'une course ou d'un cross de concours complet.



Le cheval de course est sélectionné pour sa capacité à gagner de nombreuses courses plutôt que pour sa vitesse absolue.

Puis S. Buidiansky suppose que le métabolisme aérobie est également limité, parce que les chevaux respirent exactement une fois par foulée et ne peuvent modifier ce rythme respiratoire. Il est exact que le cheval n'a pas de clavicule, et que le mouvement de ses membres antérieurs est directement lié aux muscles de sa poitrine et de ce fait, à sa cage thoracique : quand les antérieurs se posent, au galop, l'impact transmis par les membres fait remonter les côtes, ce qui expulse l'air des poumons. En même temps que le cheval baisse la tête et le cou ; puis, quand le cheval ramène les membres sous lui, pendant le temps de suspension, il inspire jusqu'au poser des membres postérieurs. Comme la quantité d'oxygène est limitée par la fréquence de mouvement des membres, et que celle-ci est limitée, on pourrait supposer que les animaux n'auraient benoît plus assez d'oxygène pour courir correctement.

Cette idée est insuffisante : les chevaux peuvent augmenter leur vitesse soit en augmentant la fréquence du galop, soit en allongeant leur foulée. Et l'antagonisme avec le fonctionnement respiratoire n'est pas évident : le volume ventilé et l'efficacité de l'échange gazeux à la surface des alvéoles pulmonaires sont d'autres facteurs importants de la consommation d'oxygène.

## UN ATHLÈTE FRAGILE

La physiologie du galop et les effets de l'entraînement des chevaux restent trop mal connus pour que l'on puisse déterminer aujourd'hui les raisons des performances. Le métabolisme aérobie d'un animal bien entraîné lui permet de soutenir la vitesse moyenne de la course, mais, pour les accélérations, c'est le métabolisme anaérobie qui entre en jeu, car il délivre une puissance bien supérieure. Aujourd'hui, les techniques d'entraînement améliorent essentiellement la capacité aérobie. Après avoir étudié un millier de trotteurs, Eric Barrey et ses collègues de la Station d'amélioration génétique, au Centre INRA de Jouy-en-Josas, ont montré que la fréquence cardiaque était moyennement corrélée aux performances, tout comme la fréquence des foulées et divers paramètres métaboliques sensibles à l'entraînement.

Enfin les éleveurs ne visent pas les records de vitesse, mais des gains (en argent) totaux des chevaux dans leur année de compétition. En effet, le cheval de course est un animal fragile des membres, et dont la carrière est brève ; son entraînement améliore ses performances, mais il conduirait, chez trop d'animaux, à des blessures qui ruineraient leur carrière. Aussi les écuries de galo-

peurs préfèrent sélectionner génétiquement des animaux doués, qu'elles entraînent peu, mais dont le potentiel de course est immédiatement exploité (chez les trotteurs, au contraire, le cheval doit beaucoup travailler pour acquérir un haut niveau). De ce fait, l'hérédité des performances dans les courses de galop est cruciale : les sélectionneurs ont démontré que la contribution génétique aux performances en course de plat est de l'ordre de 25 pour cent.

Comment sélectionner rapidement les animaux doués ? Les sélectionneurs ont mis au point une série de tests précoces et des caractérisations de la puissance des muscles. On sait aujourd'hui que cette dernière dépend de la proportion de fibres à contraction lente et de fibres à contraction rapide. Ces dernières, caractérisées par un type de myosine particulière (la myosine est, avec l'actine, l'une des deux protéines qui assurent la contraction), sont de deux types : myosine à contraction lente et myosine à contraction rapide. Les myosines à contraction rapide sont dans les fibres à métabolisme soit anaérobie soit mixte aérobie-anaérobie. La vitesse de contraction et le type métabolique sont des propriétés distinctes. Le type métabolique se modifie avec l'entraînement, tandis que le type contractile est plus difficile à modifier.

Comme les chevaux sont avantagés par une forte proportion de fibres rapides aérobies et que les proportions des fibres musculaires des divers types sont héréditaires (à 40 pour cent environ), les sélectionneurs ont, depuis peu, des biopsies pour connaître le potentiel de course des chevaux. On comptait naguère, au microscope, les proportions des divers types de fibres sur des prélèvements de tissus musculaires, mais les chercheurs de l'INRA ont mis au point une méthode de dosage par des anticorps monoclonaux spécifiques de chaque forme de myosine. Introduites depuis peu dans les écuries les plus modernes, ces méthodes de tri précoce donnent déjà des résultats : chez des éleveurs de trotteurs qui travaillent avec l'INRA, en Mayenne, il ne faut plus que six mois pour ne retenir que 25 pour cent des jeunes chevaux potentiellement intéressants pour la course.

Enfin, puisque l'objectif des écuries est le gain total des animaux sur toute leur brève carrière, les écuries qui ont du succès sont celles qui, à qualité de recrutement égale, savent le mieux gérer les engagements dans les courses. Puisque le nombre total d'engagement par cheval est limité par la résistance des animaux, les entraîneurs étudient les concurrents pour aligner leurs protégés quand ils ont les meilleures chances de succès. Le métabolisme n'est pas en cause. □

# Échographie du thymus

On estime l'état immunitaire d'enfants mal nourris.

Comment soigner les 200 millions d'enfants mal nourris des pays en développement ? Le traitement classique, essentiellement diététique, ne prend pas en compte le déficit immunitaire d'origine nutritionnel. Des enfants apparemment guéris restent immunodéprimés : le risque qu'ils contractent une maladie infectieuse dès leur retour dans leur environnement, potentiellement contaminant, est alors grand. L'échographie du thymus permet, à faible coût, le suivi de la récupération immunitaire et la vérification de la bonne santé nutritionnelle des enfants jusqu'à cinq ou six ans. Nous avons défini ses conditions d'utilisation en routine.

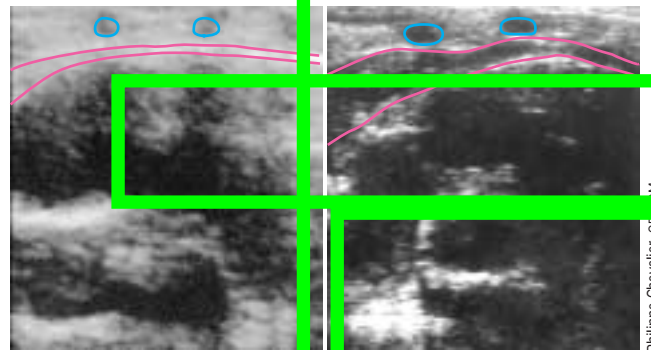
Chez l'enfant, l'une des caractéristiques majeures du déficit immunitaire d'origine nutritionnelle est l'atrophie du thymus, glande composée de deux lobes, située sous le sternum et moulée sur le cœur et les gros vaisseaux (elle s'atrophie normalement pendant la puberté). Le thymus est un organe clé du système immunitaire. Selon plusieurs études chez l'enfant dénutri, son atrophie est due à une destruction massive des thymocytes (cellules du thymus intervenant dans les réactions immunitaires). Elle est en outre corrélée avec une diminution de la concentration interne en hormones thymiques responsables de la formation des lymphocytes (globules blancs participant à l'immunité), à une augmentation du pourcentage de lymphocytes immatures et à une diminution des sous-populations de lymphocytes T. L'observation de cette atrophie est donc un moyen indirect d'estimation de l'état du système immunitaire.

La position du thymus a longtemps limité l'étude de cette glande à une

approche pondérale ou volumétrique post-mortem. Les premières études *in situ* ont été réalisées, il y a environ 40 ans, par radiographie, sans succès car l'imagerie radiologique du thymus est peu précise. Parmi les autres techniques d'imagerie médicale, de mise au point plus récente, la tomographie et la résonance magnétique nucléaire sont trop coûteuses pour les pays en développement. L'échographie est, en revanche, une technique non invasive et de faible coût. Elle a été appliquée pour la première fois chez l'enfant dénutri il y a une dizaine d'années à Dakar, au Sénégal, par une équipe de l'ORSTOM. Nous en avons poursuivi et validé l'utilisation avec l'équipe du centre de récupération immunitaire nutritionnelle de Cochabamba, en Bolivie.

La netteté échographique des limites du thymus favorise sa localisation et la prise de mesures. Pour minimiser les variations de la glande dues aux contractions du myocarde, nous avons retenu comme surface normalisée la surface corrigée de l'image échographique du lobe thymique gauche comprise entre l'ombre de la seconde et de la quatrième côtes, de préférence à sa seule épaisseur.

Les études effectuées au Sénégal et en Bolivie montrent un lien entre la régression du thymus et la dégradation



La surface, mesurée sur une image échographique, du lobe gauche du thymus (contour rose) : glande située entre les côtes (en bleu) et la zone cardiaque est d'autant plus faible que l'état immunitaire des enfants mal nourris (à gauche) est mauvais. On la compare à celle du thymus d'enfants sains (à droite).

progressive de l'état nutritionnel, mesurée par différents paramètres anthropométriques (rapport entre le poids et la taille, conférence du bras). Malgré la forte variabilité interindividuelle, le rapport de superficie thymique entre enfants dénutris et enfants témoins peut atteindre dix. Inversement, pendant la phase de récupération nutritionnelle, la masse thymique croît progressivement. Le suivi échographique indique quand la surface thymique peut être considérée comme normale.

Philippe CHEVALIER, ORSTOM, Montpellier.

# Horloge équatoriale

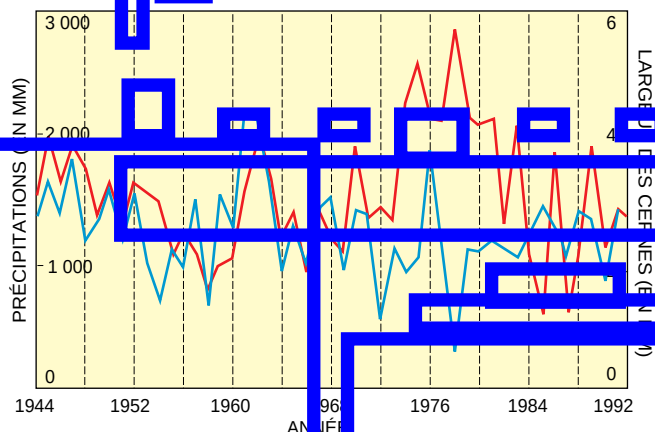
On étale l'âge d'un arbre d'Afrique équatoriale grâce aux précipitations.

**C**omment sait-on que la forêt avance ou recule ? En datant les arbres : une lisière constituée d'arbres jeunes marque une avancée de la forêt.

Dans les pays tempérés, l'alternance des saisons assure une croissance périodique des cernes des arbres : chaque printemps, après une phase de vie ralentie, un nouveau cerne se constitue. En identifiant et en dénombrant les cernes, on détermine l'âge de l'arbre. Dans les pays tropicaux, l'uniformité des saisons atténue la belle alternance des phases d'activité et de repos végétatif des arbres. Il en résulte des irrégularités de croissance des cernes, une datation plus délicate, et une impossibilité temporaire d'examiner les mouvements de la forêt. Pour progresser dans l'analyse, Christelle Belingard et ses collègues de l'Université de Marseille et de l'ORSTOM ont étudié l'okoumé, un arbre d'Afrique équatoriale. En comparant les données pluviométriques locales à la largeur des cernes, les chercheurs savent dater chaque cerne et examiner les évolutions de la frontière entre la forêt et la savane.

Ces chercheurs ont étudié quatre okoumés provenant de la lisière d'une forêt du Congo. La présence, dans la région, d'une saison sèche, fraîche et nuageuse de quatre à cinq mois permettait d'espérer une périodicité de la croissance des arbres. D'après les observations anatomiques, un cerne annuel d'okoumé se décompose en quatre parties. Un anneau clair ; un anneau sombre aux limites peu marquées, correspondant à la saison sèche principale (de juin à septembre) ; un second anneau clair plus fin que le premier ; un anneau sombre aux limites marquées correspondant à la courte saison sèche du début de l'année (décembre et janvier) et qui est la frontière du cerne annuel.

Les tranches d'arbres sont observées à la loupe binoculaire. Le décompte des cernes annuels s'est révélé difficile : comme les bords de l'anneau sombre sont souvent bien marqués, on peut confondre ce dernier avec la ligne sombre qui délimite le cerne annuel.



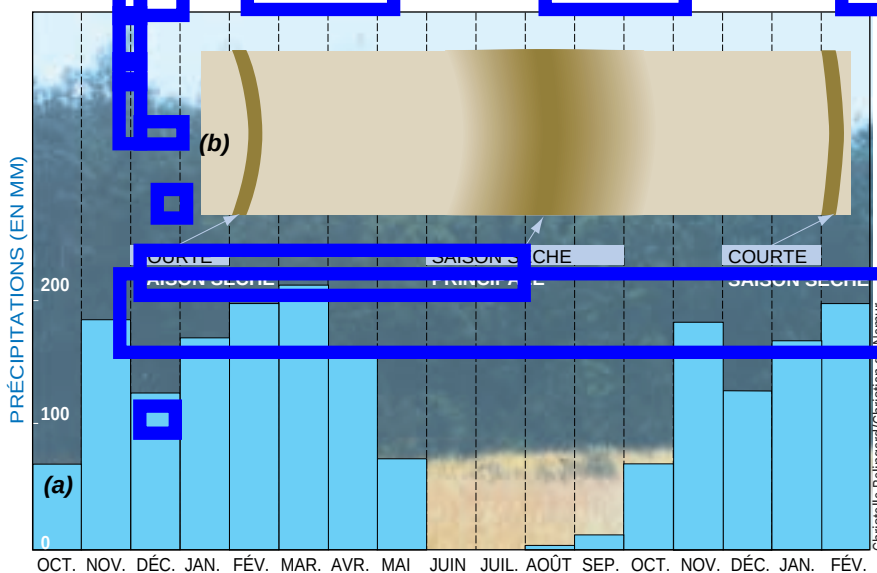
La largeur des cernes d'un okoumé (en rouge) est déterminée par la valeur des précipitations (en bleu) mesurées entre octobre et septembre de l'année attribuée à la formation de chaque cerne.

## CERNES ET PLUVIOMÉTRIE

L'épaisseur de chaque cerne est reportée sur une courbe, en fonction de l'année attribuée à la formation du cerne. La comparaison des courbes montre que le synchronisme est mauvais : on ne peut faire coïncider d'un arbre à l'autre, l'année de formation des cernes. En revanche, lorsque l'on compare la courbe de la largeur des cernes du plus vieil arbre à la courbe des précipitations annuelles enregistrées à la station météorologique de Pointe Noire (située à une centaine de kilomètres de la forêt), une concordance apparaît. La pluviométrie est un bon moyen de dater les cernes, donc les arbres.

Pour préciser quelle période de l'année favorise la variation de la largeur des cernes, on divise la séquence des précipitations en plusieurs périodes qui correspondent aux saisons et on compare la pluviométrie de ces périodes avec la largeur des cernes. La somme des précipitations comprises entre le mois de octobre et le mois de septembre de l'année de formation du cerne donne la meilleure concordance. La quantité de pluie est ainsi le facteur qui limite la croissance radiale de l'okoumé : la dendrochronologie est applicable à l'okoumé dans les conditions climatiques locales, après comparaison avec des données pluviométriques.

Grâce à cette étude, les chercheurs ont daté des okoumés situés en bordure de la frontière avec la savane. On remarque d'abord que l'âge des arbres augmente à mesure que l'on s'éloigne de la lisière, ce qui est interprété comme une avancée de la forêt sur la savane. L'âge de l'okoumé le plus vieux, situé à 75 mètres à l'intérieur de la forêt, est de 69 ans. Dans cette région, on estime donc la vitesse d'avancée de la forêt à une centaine de mètres par siècle.



L'alternance de saisons sèches et de saisons des pluies, visible sur l'histogramme des précipitations (en bleu (a)), est responsable de la formation de cernes dans un tronc d'okoumé (b).

# La musique pour les paroles

*L'intonation de la parole aide les bébés à apprendre leur langue maternelle.*

**C**omment apprenons-nous à parler ? Comment les hébés isolent-ils ces mots enchaînés dans des phrases ? L'intonation de la parole est un élément clé : elle découpe les phrases en groupes de quelques mots. Dès les premiers jours de notre vie, nous percevons les différences d'intonation qui marquent ce découpage : nous pouvons alors commencer à apprendre les mots et la structure de notre langue maternelle.

Comment apprenons-nous un mot ? Avant que nous découvriions son sens en confrontant les diverses situations dans lesquelles nous l'entendons, nous devons le distinguer des autres mots des phrases. Cette distinction n'est pas aisée : les mots parlés ne sont pas tous séparés par des silences, comme les mots écrits le sont par des espaces blancs.

Selon certains psycho-linguistes, lorsque nous entendons une phrase, au lieu de la découper en mots, puis d'identifier les mots et de retrouver leur sens, nous essayons plutôt, à chaque

instant, d'identifier tous les mots qui pourraient se trouver dans cette phrase.

Par exemple, en entendant « chat grincheux », nous envisageons, un court instant, la possibilité que nous ayons entendu le mot « chagrin ». Nous ne décidons des mots que nous avons réellement entendus qu'après l'audition de la syllabe « cheux », dont nous savons qu'elle ne constitue pas un mot en français, alors que « chat » et « grincheux » existent tous les deux.

Cet modèle n'est pas universellement accepté. En outre, les bébés, qui ne connaissent pas encore les mots de leur langue, ne peuvent faire la même analyse. En revanche, ils perçoivent un premier niveau de découpage de la phrase, fondé sur l'intonation de la parole. Lorsque nous prononçons une phrase, nous regroupons les mots en petites unités d'intonation, qui possèdent chacune un contour mélodique (habituellement montant-descendant), avec un petit ralentissement du tempo sur la fin. Chaque unité contient un ou

deux mots dits « de contenu » (les noms, les verbes et les adjectifs) et plusieurs mots ou éléments grammaticaux (articles ou auxiliaires).

## MATI ET MA-TI

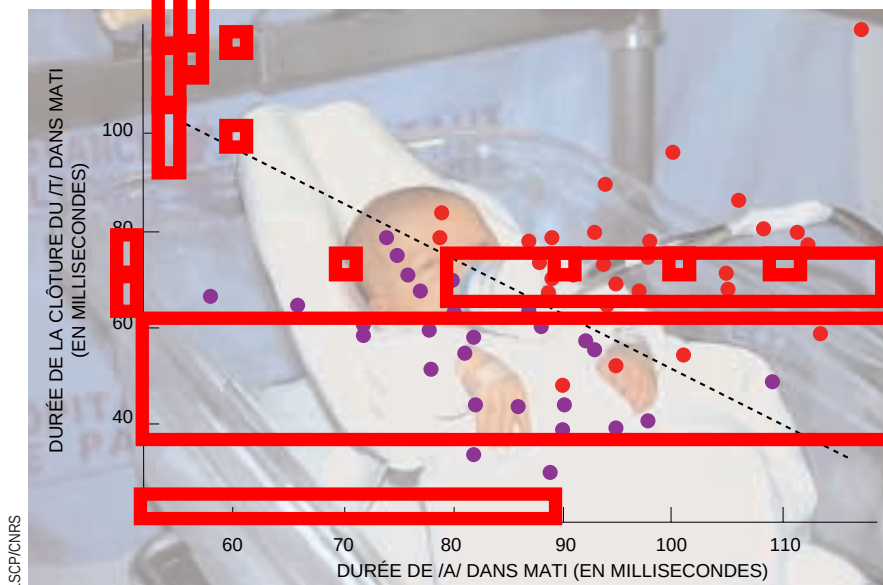
Nous avons fabriqué des « mots » bisyllabiques de deux catégories, tous homonymes à « mati » : dans une catégorie, ils chevauchent deux unités d'intonation, tel « mati » extrait de « panorama typique » ; dans l'autre, ils sont au milieu d'une unité d'intonation, tel « mati » extrait de « mathématicien ». Nous avons fait entendre ces « mati » à des nouveau-nés dont nous suivions l'intérêt par la méthode de succion non nutritive : un bébé entend un stimulus pour chaque succion qu'il fait sur une tétine reliée à un capteur de pression ; lorsque le bébé est lassé d'entendre toujours la même chose, l'intensité de la succion diminue. Les bébés auxquels on fait alors entendre des « mati » de l'autre catégorie recommencent à téter plus que ceux d'un groupe témoin auxquels on fait entendre toujours le même type de stimulus. Nous avons observé le même résultat en espagnol. Malgré l'homonymie, les bébés perçoivent la différence d'intonation.

Les unités d'intonation renseignent aussi sur la syntaxe de la langue, et même sur sa structure abstraite. La manière dont nous regroupons les mots en unités d'intonation lorsque nous parlons, dépend en effet de la structure syntaxique des phrases : la limite entre deux unités d'intonation correspond toujours à une frontière entre deux constituants syntaxiques (par exemple, entre le sujet et le groupe verbal).

Les langues du monde constituent deux grandes familles : récursives à droite lorsque l'on ajoute des éléments à la fin des phrases (c'est-à-dire du côté droit, quand on écrit : « l'homme qui a vu le chien qui poursuivait le chat qui chassait l'oiseau »), et récursives à gauche dans le cas contraire (par exemple, le turc ou le japonais). La récursivité, présente à tous les niveaux de structure, est indispensable à toute analyse syntaxique. Elle se reflète dans l'intonation : à l'intérieur des unités d'intonation, le mot le plus accentué est à droite pour les langues récursives à droite, à gauche pour les langues récursives à gauche. La perception, par les bébés, des unités d'intonation ne peut donc que leur faciliter l'apprentissage des subtilités du langage.

Anne CHRISTOPHE

Lab. de sciences cognitives et psycholinguistique, CNRS-EHESS, Paris



La durée du /a/ et la durée de clôture du /t/ permettent de distinguer, parmi des mots bisyllabiques homonymes à « mati », ceux qui proviennent d'un seul mot (en violet), tel mathématicien et ceux qui proviennent de la jonction de deux mots (en rouge), tel panorama typique. Les nouveau-nés perçoivent cette différence d'intonation, qui facilite la compréhension du langage (ils le manifestent par l'intermédiaire d'une sucette à capteur de pression).

# La mémoire des glaces du Groenland

CLAUDE BOUTRON

*Les neiges et glaces du Groenland révèlent l'histoire de la pollution atmosphérique par les métaux lourds, de l'Antiquité à nos jours.*

La pollution de l'atmosphère par les métaux lourds est une menace. À forte dose, certains d'entre eux sont toxiques. Ainsi les personnes qui ont absorbé une grande quantité de plomb souffrent de saturnisme, maladie qui se manifeste par de terribles douleurs abdominales, des diarrhées et des vomissements, une anémie et une atteinte du système nerveux... Les personnes excessivement exposées au mercure souffrent également d'atteintes du système nerveux. À doses inférieures, l'exposition prolongée pendant des siècles pourrait conduire à des altérations du cerveau humain et modifier l'évolution de notre espèce.

Cette dernière est pourtant responsable de la pollution atmosphérique, principalement elle qui rejette les métaux dans l'atmosphère : à la fin des années 1960, les rejets de plomb étaient supérieurs à 400 000 tonnes par an, soit près de 50 fois les émissions naturelles (volcaniques notamment). Depuis quand cette pollution existe-t-elle ? Date-t-elle de la Révolution industrielle ?

Les neiges et glaces qui s'accumulent année après année dans les régions polaires sont d'extraordinaires archives de l'évolution passée de l'atmosphère : les isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène, par exemple, nous renseignent sur le climat du passé ; les composés du soufre et de l'azote, ainsi que le dioxyde de carbone et le méthane des bulles d'air piégées dans les glaces ajoutent à la connaissance de notre atmosphère.

Année après année, les glaces et neiges des régions polaires ont également conservé la mémoire du plomb, du cuivre ou d'autres métaux qui étaient

présents dans l'atmosphère ancienne. L'analyse des concentrations en ces métaux, dans les glaces polaires, permet donc de reconstituer l'évolution des pollutions du passé. Elle a montré que la pollution par les métaux existait déjà il y a plusieurs milliers d'années, lors de l'apogée de l'Empire romain, sur tout l'hémisphère Nord.

## De nouvelles carottes

Les couches de neige et de glace déposées au fil du temps dans les régions centrales du Groenland, de l'Antiquité, tant ancienne que récente, de la pollution atmosphérique : les métaux que les rejets naturels ou anthropiques ont déposés dans l'atmosphère sous la forme de fines particules sont transportés par les masses d'air jusque dans les régions polaires, où elles se retrouvent incluses dans les neiges et dans les glaces.

Une partie de ces particules se dépose sur les calottes polaires : certaines servent de germes de condensation dans les nuages, d'autres sont incorporées dans les flocons de neige et d'autres sont emportées par le vent et d'autres encore sont déposées par simple sédimentation. Ces particules prises dans les neiges et glaces

permettent de faire une mesure que de nouvelles couches de neige se déposent. L'épaisseur des couches annuelles de neige est variable ; au centre du Groenland, elle est de l'ordre de 40 centimètres près de la surface.

Disposant d'échantillons de ces neiges et de ces glaces, peut-on en tirer l'histoire de la pollution en métaux

lourds ? Il y a près de 25 ans, Clair Patterson et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie ont obtenu les premiers résultats sur l'évolution des concentrations en plomb dans les neiges et dans les glaces du Groenland. Pourtant, c'est seulement depuis 1989 que ces archives ont été exploitées méthodiquement. Les campagnes européennes de carottage de glace (l'acronyme de *Greenland Ice Core Project*, soit « Programme de carottage glaciaire au Groenland ») ont livré plusieurs carottes prélevées au site nommé Summit, qui se trouve au centre du Groenland, par 72°34' Nord et 37°37' Ouest, est à une altitude de 3 238 mètres, soit environ à 3 000 mètres au-dessus du socle rocheux.

Nous avons étudié deux carottes d'une dizaine de centimètres de diamètre. La première avait été prélevée dans les 70 mètres supérieurs, tandis que la seconde s'étendait jusqu'à l'épaisseur de la calotte, de la surface jusqu'au socle rocheux, à 3 028 mètres de profondeur. La première couvre les deux derniers siècles, de l'époque de la Révolution industrielle jusqu'à nos jours ; la seconde couvre plus de 150 000 ans, notamment les périodes de la Grèce et de la Rome antiques et du Moyen Âge.

## L'eau la plus pure de la planète

L'analyse des métaux dans de telles carottes se situe aux limites actuelles de la chimie analytique de pointe. Les glaces polaires constituent en effet l'eau la plus pure de la planète : les métaux lourds n'y sont présents qu'en concen-

trations extrêmement faibles, de l'ordre du picogramme (millième de milliardième de gramme) par gramme. Pour doser le cadmium, par exemple, on doit être capable de trouver un gramme de cadmium dans 20 millions de tonnes de glace ! Cette faiblesse des concentrations à doser a deux conséquences : d'une part, la moindre contamination

des carottes anéantit les informations stockées dans les glaces ; d'autre part, les carottes doivent être analysées par des méthodes ultra-sensibles, capables de trouver une aiguille dans une botte de foin.

Les méthodes de prélèvement sur le terrain sont de plusieurs types, selon la profondeur que l'on veut atteindre.

Pour récupérer des échantillons proches de la surface, tout d'abord, on met en œuvre des protocoles de prélèvement qui ne contaminent pas les échantillons : des opérateurs munis de combinaisons spéciales, non contaminantes, de gants en polyéthylène, de pelles ou de scies propres creusent des puits dont ils extraient la



**1. LES NEIGES ET GLACES** du Groenland sont prélevées à l'aide de techniques variées : grâce à de petits carottiers ultra-propres, pour les faibles profondeurs (en haut à gauche) ; grâce à des carottiers électromécaniques de moyenne profondeur (en haut à droite) ; grâce à des carottiers de grande profondeur. À droite, on voit la récupération d'une carotte au cours du carottage européen SMR, qui a atteint plus de trois kilomètres. Ces carottes sont ramenées, au laboratoire, emballées dans des sacs étanches en polyéthylène. Sauf pour les échantillons proches de la surface, le prélèvement contamine l'extérieur de la carotte et impose une décontamination.



Claude Rado

neige. Puis, à des profondeurs comprises entre cinq et une vingtaine de mètres (soit plusieurs décennies d'accumulation des neiges au Groenland), on emploie des carottiers mécaniques propres, entièrement construits en matières plastiques, tel le polycarbonate. Ces carottiers sont préalablement nettoyés à l'acide,

Les carottiers utilisés pour atteindre les profondeurs supérieures contaminent les échantillons. Des carottiers de moyenne profondeur, qui apparaissent sur la figure 1, atteignent quelques centaines de mètres, soit quelques siècles à quelques millénaires ; le carottage se fait alors « à sec », sans fluide dans le trou.

Pour atteindre des profondeurs encore supérieures, on doit employer de grands carottiers métalliques, dans un trou rempli d'un liquide.

Ces appareils sont soit électromécaniques (un moteur électrique, alimenté par l'intermédiaire d'un câble qui descend dans le trou, fait tourner un cylindre métallique de dix centimètres de diamètre intérieur et de quelques centimètres de diamètre extérieur, soit thermiques (une résistance électrique chauffante, à la base du carottier, fond la glace sur une couronne circulaire). Ils contaminent doublement la glace : d'une part, parce qu'ils sont métalliques ; d'autre part, parce que l'on doit remplir le trou avec un fluide qui équilibre la pression considérable qui s'exerce sur les parois et

se refermer ; ce fluide, souvent à base de kérosène d'aviation, accroît la contamination de l'extérieur des carottes.

Naturellement, les échantillons obtenus par ces diverses méthodes doivent être traités différemment : les échantillons prélevés proprement dans les puits peuvent être analysés directement. En revanche, on a dû mettre au point des méthodes spéciales de traitement des carottes profondes, dont la partie externe est contaminée.

## Des glaces d'âge connu

Un point particulièrement important est celui de la datation des échantillons obtenus. Des méthodes variées sont utilisées. Celles qui exploitent les variations saisonnières de composition de la neige ou de la glace permettent de compter les années une à une à partir de la surface : on mesure par exemple les variations des rapports d'abondances isotopiques de l'oxygène 16, ou du deutérium et de l'hydrogène (les isotopes d'un élément chimique ont le même nombre de protons, mais des nombres de neutrons différents ; par exemple, le noyau de l'oxygène 16 est composé de 8 protons et de 8 neutrons, tandis que celui de l'oxygène 18 renferme 8 protons et 10 neutrons).

Une autre famille de méthodes repose sur l'identification « d'horizons repères », c'est-à-dire de couches où

des événements importants ont laissé des signatures caractéristiques : il s'agit par exemple des éruptions volcaniques majeures, telles celles du Tambora en 1815, du Krakatoa en 1883.

Dans le cas de Summit, ce type d'approche permet de dater avec une très grande précision les glaces déposées au cours des 10 000 dernières années : la précision est meilleure que dix ans pour des périodes inférieures au millénaire. Pour les parties plus profondes des carottes, toutefois, on doit également utiliser des modèles qui décrivent l'écoulement de la glace ; la précision devient moins bonne.

## La hanse de la contamination

La manipulation des échantillons impose des précautions draconiennes. Tout d'abord, les échantillons sont maintenus, de Summit jusqu'au laboratoire, à une température toujours bien inférieure à 0°C, afin d'éviter la migration des contaminants, de l'extérieur vers le cœur. Au laboratoire (spécialement conçu pour éviter les contaminations), les échantillons sont placés en chambre froide dans une enceinte spécialement aménagée et contrôlée, où nous effectuons une décontamination mécanique à l'aide d'un tour entièrement construit en matières plastiques : nous éliminons des couches successives, de l'extérieur de la carotte jusqu'à son centre, ce qui permet, en fin d'opération, d'accéder au cœur, qui est généralement exempt de contamination.

Toutes les précautions doivent être prises pour éviter que les contaminants externes n'atteignent le cœur. Lors de la décontamination, notamment, on doit éviter que le couteau qui découpe la carotte ne reporte sur la partie dégagée une fraction de la contamination qui était présente dans la partie éliminée. Au cours de ces opérations de décontamination, on récupère des tranches de glace minces, afin de vérifier ultérieurement que l'on est bien parvenu à un cœur propre : on trace les courbes de concentration, de l'extérieur jusqu'au centre ; quand un plateau se dessine, on conclut que la concentration mesurée représente vraiment ce qu'il y avait dans la neige ou dans la glace.



**2. DÉCONTAMINATION d'une carotte de glace en chambre froide à l'intérieur d'une enceinte à flux laminaire d'air ultra-filtré. La carotte, maintenue horizontalement dans un tour entièrement construit en polyéthylène, est découpée à partir de son extérieur. Chaque couche annulaire est récupérée séparément pour analyse. On isole ainsi la partie centrale, généralement vierge de toute contamination.**

De très grandes précautions doivent également être prises au cours de l'analyse proprement dite. Toutes les analyses sont effectuées dans des salles blanches, similaires à celles qui sont utilisées dans l'industrie micro-électronique, où l'air, ultra-filtré, est en légère surpression par rapport à l'extérieur; les opérateurs portent des vêtements spéciaux non émissifs de poussière et des gants en polyéthylène. Nous n'utilisons que des matériaux non contaminants pour les métaux mesurés, tels le polyéthylène basse densité ou ce qui est appelé le téflon. Les récipients qui sont en contact avec les échantillons. L'ensemble du matériel utilisé subit des nettoyages poussés, par immersion dans des bains d'acide nitrique chaud, de pureté croissante. Les bains terminaux sont préparés à l'aide d'acide nitrique de très haute pureté, mis au point pour l'analyse des roches lunaires.

Parmi les techniques analytiques ultra-sensibles qui sont utilisées figure notamment la spectrométrie de masse à ionisation thermique, que nous utilisons avec notre collègue australien Kevin Rosman, de l'Université de technologie de Perth. Cette technique permet tout à la fois de déterminer la composition isotopique du plomb (l'abondance relative des isotopes

204, 206, 207 et 208) et la concentration totale de ce métal dans des échantillons contenant que  $10^{-11}$  gramme (un cent milliardième de gramme) de plomb.

Les volumes d'échantillons utilisés sont de l'ordre de dix millilitres; on les transporte congelés en Australie, afin de limiter les échanges avec les parois des flacons. Puis, en salle blanche, on les évapore lentement en présence d'acide nitrique ultra-pur et d'un mélange de silica gel et d'acide phosphorique jusqu'à l'obtention d'une

Cette dernière est alors transférée sur un filament en rhénium, qui est introduit dans le spectromètre de masse. Une fois le vide effectué dans le spectromètre, on chauffe le filament afin de produire un faisceau d'ions métalliques qui sont déviés par des champs électriques et magnétiques. Ce faisceau, qui est détecté dans le spectromètre, dépend du quotient de la masse et de la charge.

Enfin, avec la spectrométrie de masse à ionisation thermique, on détermine l'abondance relative des divers isotopes. De surcroît, l'introduction d'une quantité connue d'un traceur enrichi en plomb 205 permet d'accéder à la concentration totale en plomb (méthode de dilution isotopique).

La spectrométrie de fluorescence atomique laser, que nous utilisons avec

Michael Holshov et ses collègues de l'Institut de spectroscopie de Troitzk (près de Moscou), est une autre technique performante. Cette fois, on vaporise 50 microlitres de glace fondue dans le faisceau d'un laser accordable à colorant double. La fluorescence des atomes du métal dosé (la longueur d'onde du laser est choisie pour exciter spécifiquement les atomes de ce métal). Cette fois, il s'agit d'une technique relative: le signal obtenu permet de déterminer la concentration du métal dosé par rapport à la concentration (connue) d'étalons contenant le même métal.

Encore rarement utilisée, la spectrométrie de fluorescence laser a mesuré les concentrations en plomb et cadmium et en bismuth à partir de très petits volumes d'échantillon jusqu'à des concentrations de l'ordre de  $10^{-13}$  gramme (ou dix millièmes de milliardième de gramme) par gramme de glace. Elle permet aussi de détecter des masses détectées comprises entre  $10^{-16}$  et  $10^{-15}$  gramme.

Enfin, avec Freddy Adams, de l'Université d'Anvers, nous avons étudié les composés organo-métalliques, tels ceux qui sont ajoutés dans l'essence automobile comme additifs antidétonants. Ces additifs sont du plomb tétraéthyle ou tétraméthyle, mais ils



**3. INSTRUMENTS MÉDIÉVAUX** retrouvés à Herculaneum et ustensiles de cuisine en bronze datant de l'Empire romain. Les glaces du Groenland montrent que la métallurgie du cuivre, dans des fours à ciel ouvert, a pollué notre atmosphère dès l'Antiquité. Il y a 7 000 ans environ, on utilisait déjà le cuivre natif. La production de cuivre a considérablement augmenté à partir d'il y a 5 000 ans, avec l'apparition des techniques qui permettent de traiter les carbonates, les oxydes, puis, plus tard, les sulfures de cuivre.

sont détectés au Groenland sous la forme de plomb diéthyle, diméthyle, triéthyle ou triméthyle, par suite de modifications chimiques qu'ils subissent lors de leur transport dans l'atmosphère.

Pour examiner les principaux résultats obtenus, nous envisagerons successivement deux périodes : d'une part, une période qui couvre toute l'Antiquité jusqu'à l'an 1500 (1<sup>ère</sup> 1500 avant notre ère à l'an 1500), et, d'autre part, la période qui a suivi la Révolution industrielle. Dans le premier cas, nous verrons que l'analyse des glaces apporte des données du plus haut intérêt pour l'archéologie. Dans le second cas, nous verrons comment nos analyses indiquent l'histoire récente de la pollution atmosphérique.

## L'Empire romain au ban des accusés

Les carottes que nous avons analysées ont permis d'étudier les variations des concentrations en plomb de 1 000 avant notre ère à l'an 1 500, période qui a vu le développement, puis le déclin de la civilisation grecque antique, de la République et de l'Empire romains, ainsi que le Moyen Âge et la Renaissance.

À Summit, la glace correspondant à cette période se trouve entre 620 et 130 mètres de profondeur. Elle est datée avec une précision meilleure que dix ans. Les concentrations en plomb dans la glace étaient de 25 picogrammes par gramme il y a 3 000 ans. Comme ces concentrations sont analogues à celles que l'on trouve dans la glace datant d'il y a plus de 7 000 ans (avant le début de la production de plomb par l'homme), on en déduit que le plomb déposé dans la glace d'il y a 3 000 ans était encore entièrement d'origine naturelle.

À partir d'il y a 3 000 ans, les concentrations croissent progressivement, atteignant des valeurs proches de deux à trois picogrammes par gramme, c'est-à-dire environ 10 fois la concentration naturelle, pendant une période de plusieurs milliers d'années (jusqu'à 500 avant notre ère à l'an 200) ; elles rediminuent ensuite pour retrouver des valeurs proches des valeurs naturelles vers l'an 500, puis elles augmentent à nouveau au cours du Moyen Âge, jusqu'à des valeurs de l'ordre de quatre picogrammes par gramme.

Aucun phénomène naturel ne permet d'expliquer ces variations, qui révé-

lent donc une très ancienne pollution atmosphérique par le plomb : près de 2 000 ans avant la Révolution industrielle, les mineurs et métallurgistes grecs et romains polluèrent l'atmosphère de la Terre ; cette pollution fut assez intense pour atteindre l'Arctique, à des milliers de kilomètres du bassin méditerranéen.

Le plomb était alors extrait de la galène, un sulfure de plomb qui contient également des concentrations notables d'argent (ce dernier était isolé lors du traitement du minerai). Après un grillage qui transformait les sulfures en oxydes, les métaux étaient fondus dans des fours, où l'on obtenait un mélange de plomb et d'argent métalliques : ce « plomb d'œuvre » était refondu à l'air libre, ce qui séparait l'argent de l'oxyde de plomb, ou litharge ; enfin la litharge était refondue en présence de charbon de bois, qui réduisait l'oxyde et formait le plomb métallique.

Les archéologues avaient montré que l'histoire de la production du plomb a commencé il y a 6 000 ans, pendant l'Âge du cuivre. La production a ensuite cru constamment, atteignant près de 80 000 tonnes par an à l'apogée de l'Empire romain, avant de décliner fortement en même temps que l'Empire. C'est seulement au IX<sup>e</sup> siècle que cette production a recommencé à croître, sans discontinuer, jusqu'à nos jours.

Les émissions de plomb ont été très polluantes : on estime que les fours utilisés, qui fonctionnaient à l'air libre, rejetaient dans l'atmosphère jusqu'à cinq pour cent des quantités produites au cours du traitement des minerais. Ils auraient émis vers l'atmosphère jusqu'à 4 000 tonnes de plomb par an à l'apogée de l'Empire romain.

Les textes anciens, des sédiments des lacs suédois ou des tourbes anglaises avaient indiqué que ces émissions ont provoqué de graves pollutions locales ou régionales, mais les données du Groenland ont montré que le plomb s'est accumulé dans l'atmosphère de l'hémisphère Nord, jusque dans l'Arctique.

## Le cuivre, autre pollution très ancienne

La production des autres métaux a-t-elle provoqué une pollution équivalente ? Oui : nous avons récemment

démontré l'existence d'une pollution en cuivre pendant l'Antiquité. Nous avons mesuré les concentrations du métal rouge dans les mêmes carottes de glace où nous avons dosé le plomb. Il y a 2 500 ans, les concentrations en cuivre ne différaient pas des concentrations naturelles, mais de 500 avant notre ère à l'an 1500, les concentrations en cuivre sont devenues, en moyenne, deux fois supérieures aux concentrations naturelles. Cette augmentation des concentrations ne s'explique pas par des causes naturelles. Nous pensons qu'elle est due à une ancienne pollution de l'atmosphère de l'ensemble de l'hémisphère Nord.

D'où ce cuivre provenait-il ? Dans l'Antiquité (comme aujourd'hui), l'essentiel du cuivre présent dans l'atmosphère provenait de la production de ce métal. Pour savoir si l'histoire de ces émissions correspondait aux variations observées dans les glaces du Groenland, nous avons d'abord cherché à reconstituer l'histoire de la production mondiale du métal rouge (voir la figure 6), par compilation des données archéologiques et historiques.

Le cuivre a été initialement récupéré sous forme native à partir d'il y a 7 000 ans. Sa production n'est devenue notable qu'il y a 5 000 ans environ, quand sont apparues des techniques qui permettaient de traiter les minerais (carbonates et oxydes de cuivre) et de les réduire. Les métallurgistes allèrent le cuivre à l'étain pour produire du bronze. La production mondiale a ensuite augmenté régulièrement avec la mise au point, il y a 4 500 ans environ, de traitements des minerais de sulfures de cuivre. On estime que la production cumulée, de l'an 2 000 à l'an 700 avant notre ère, a été de 50 000 tonnes.

À l'époque romaine, la production a considérablement augmenté, en raison d'une forte croissance de la demande pour la fabrication de la monnaie : il y a 2 000 ans, on a produit jusqu'à 15 000 tonnes par an, surtout dans la Péninsule ibérique (d'où provenait près de la moitié de la production mondiale à l'époque romaine), à Chypre et en Europe centrale. La production cumulée entre l'an 250 avant notre ère et l'an 350 est évaluée à cinq millions de tonnes.

Après la chute de l'Empire romain, la production du cuivre a diminué



**4. LINGOTS DE PLOMB** datant de l'Antiquité romaine. Sous l'Empire romain, la production de plomb atteignit 80 000 tonnes par an ; les principales mines se trouvaient en Espagne, dans les Balkans et en Asie mineure. Le plomb, métal facile à travailler, était utilisé pour la fabrication de nombreux objets d'usage courant : monnaie, tuyaux, statuettes, poids ou ustensiles de cuisine. Ces derniers contaminaient les mets et les vins, de sorte

que certains historiens ont proposé que le saturnisme, ou intoxication par le plomb, aurait été l'une des causes de la chute de l'Empire. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, une épidémie de saturnisme frappa les artisans parisiens : parmi les 1 200 personnes admises à l'Hôpital de la Charité pour cause de saturnisme, la moitié environ travaillaient le plomb ; près de 400 étaient peintres, d'autres plombiers.

en Europe, où elle est restée faible, de l'ordre de 2 000 tonnes par an, jusqu'au VIII<sup>e</sup> siècle. Elle a ensuite repris pendant le Moyen Âge, en raison de l'exploitation de nouveaux gisements en Allemagne et en Suède, respectivement à partir du IX<sup>e</sup> et du XIII<sup>e</sup> siècle. Au Moyen Âge, la production fut surtout importante en Chine, notamment pendant la dynastie des Sung du Nord (960-1127) : lors de cette période, la production chinoise atteignit 13 000 tonnes par an environ, valeur proche de celle qui était atteinte dans le bassin méditerranéen à l'apogée de l'Empire romain.

La production a ensuite décliné à nouveau, ne recommençant à croître qu'après la Renaissance ; elle n'a alors plus cessé d'augmenter, notamment en raison de l'essor des industries électriques. Aujourd'hui, les neuf millions de tonnes produites chaque année proviennent principalement du Chili, du Pérou, du Zaïre, de la Zambie et de la Chine.

Quelles quantités de cuivre cette production a-t-elle libérées dans l'atmosphère ? Pour le déterminer, nous avons étudié les facteurs d'émission (la masse de cuivre émise dans l'atmosphère par masse de cuivre produite) correspondant aux techniques successivement utilisées. Ce que nous savons des techniques métallurgiques

antiques suggère que les facteurs d'émission étaient certainement considérables : dans l'Antiquité, de l'ordre de 15 pour cent. Cette valeur élevée jusqu'à la Révolution industrielle, car les techniques ont peu évolué au cours des millénaires. Le traitement des minerais de sulfure de cuivre nécessitait de nombreuses étapes successives : fusion, réduction, fusion d'oxydation et d'affinage, effectuées dans des fours primitifs, à l'air libre.

Quand les procédés furent finalement améliorés, à partir du XIX<sup>e</sup> siècle, les facteurs d'émission diminuèrent considérablement, jusqu'à environ un pour cent au début de ce siècle et à 0,25 aujourd'hui.

En combinant l'histoire de la production et des facteurs d'émission, on obtient une reconstitution des variations des émissions au cours des 5 000 dernières années. Il y aurait eu trois maxima de production de cuivre par l'homme : le premier, environ 23 000 tonnes par an, à l'apogée de l'Empire romain ; le deuxième, de plitude similaire, à l'apogée de la dynastie des Sung du Nord en Chine, vers 1080 ; le troisième, de l'ordre de 23 000 tonnes par an, dans un passé très récent (les émissions rediminuent aujourd'hui).

Si l'on admet que les émissions naturelles de cuivre vers l'atmosphère sont de l'ordre de 2 000 à 3 000 tonnes par

an, c'est-à-dire une valeur proche des maxima romains et Sung, un raisonnement sommaire montre que les émissions ont approximativement doublé dans la glace du Groenland à l'époque romaine : c'est ce qui est observé. Il devrait en être de même à l'époque de la dynastie des Sung du Nord, mais nous ne pouvons pas le vérifier, car aucun échantillon de cette période n'a encore été analysé.

Sur l'ensemble de la calotte glaciaire du Groenland, 2 800 tonnes de cuivre se seraient déposées au cours des 2 500 années qui ont précédé la Révolution industrielle. C'est près de 15 fois les quantités qui se sont déposées sur le Groenland de la Révolution industrielle jusqu'à nos jours !

Si nos travaux montrent ainsi une très ancienne pollution en cuivre, ils ouvrent également la voie à une approche quantitative de l'histoire de la production de ce métal (et des autres métaux) pendant l'Antiquité.

Il est difficile de tirer des conclusions de telles informations, car l'histoire de la production des métaux, qui a joué un rôle majeur dans le développement des sociétés humaines, reste très parcellaire et imprécise ; une approche quantitative, fondée sur les archives que constituent les carottes de glace, devrait considérablement l'améliorer.

## De la Révolution industrielle à nos jours

Examinons maintenant la pollution plus récente, par les divers métaux. La carotte prélevée entre la surface et 70 mètres de profondeur, à Summit, permet de reconstituer cette pollution des années 1700 à nos jours. Tout d'abord, les concentrations en plomb sont proches de 10 picogrammes par gramme dans les années 1770, c'est-à-dire environ le double des concentrations observées à la Renaissance. Elles croissent ensuite jusqu'à 50 picogrammes par gramme en 1900, en raison de la croissance progressive de l'industrie des métaux non ferreux, par la sidérurgie et par la combustion du bois et du charbon. Au cours des années 1920 et 1930, les concentrations auraient ensuite décliné passagèrement, peut-être en raison de la dépression économique.

Puis, de 1930 à la fin des années 1960, les concentrations ont

considérablement augmenté, en raison de l'introduction (en 1923), puis de l'utilisation généralisée des composés organo-plombés (le plomb tétraéthyle et le plomb tétraméthyle), comme additifs antidétonants dans les carburants pour automobiles. À la fin des années 1960, la quantité d'additifs utilisée avoisinait les 400 000 tonnes par an (dont deux tiers environ pour les États-Unis). Près de 70 pour cent de ces quantités étaient directement rejetées dans l'atmosphère, à la sortie des pots d'échappement : l'ensemble de notre planète fut terriblement contaminé.

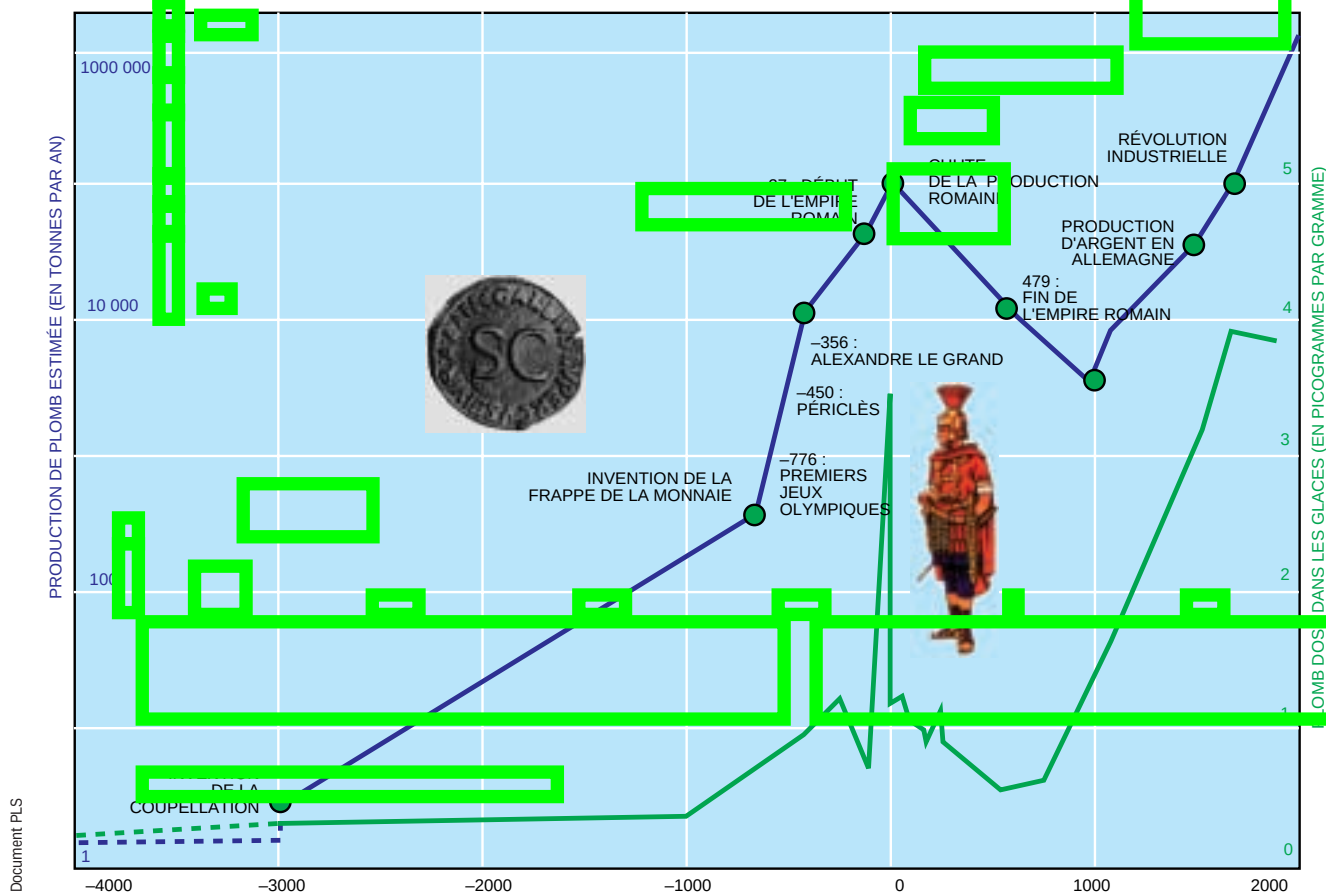
Les concentrations maximales atteintes dans les glaces du Groenland à la fin des années 1960 – environ 100 picogrammes par gramme – sont plus de 200 fois supérieures aux concentrations naturelles d'il y a plusieurs milliers d'années, et la pollution par le plomb fut, de loin, l'une des pollutions globales les plus spectaculaires (les facteurs d'augmentation pour les composés du soufre et de l'azote, pour le

gaz carbonique et pour le méthane sont bien inférieurs).

À partir du début des années 1970, les concentrations diminuent d'un facteur dix environ, ce qui ramène les concentrations des années 1990 au même niveau que celles de la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Manifestement, c'est là l'effet de l'abandon progressif des additifs au plomb au cours des deux dernières décennies. D'une part, de plus en plus de pays (notamment aux États-Unis et au Japon) consomment maintenant une essence non plombée ; l'autre part, les compagnies pétrolières ont été conduites à réduire les concentrations en plomb dans l'es-

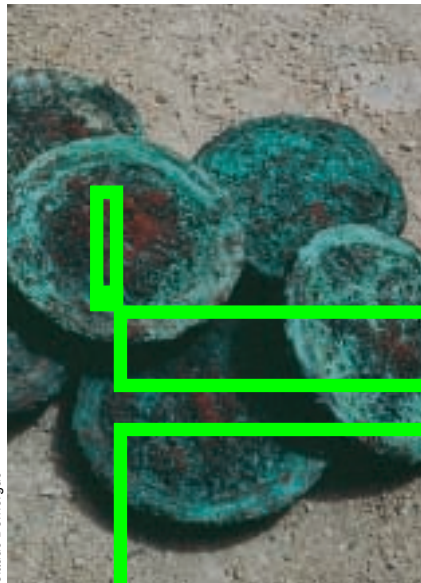
sence de la pollution en plomb, qui était de 0,55 gramme par litre en 1976, est passée à 0,15 gramme par litre depuis 1991.

La contribution des additifs au plomb à la pollution généralisée de l'atmosphère, au cours des dernières décennies, a été directement confirmée par la détection de composés organo-plombés, principalement le plomb tri-

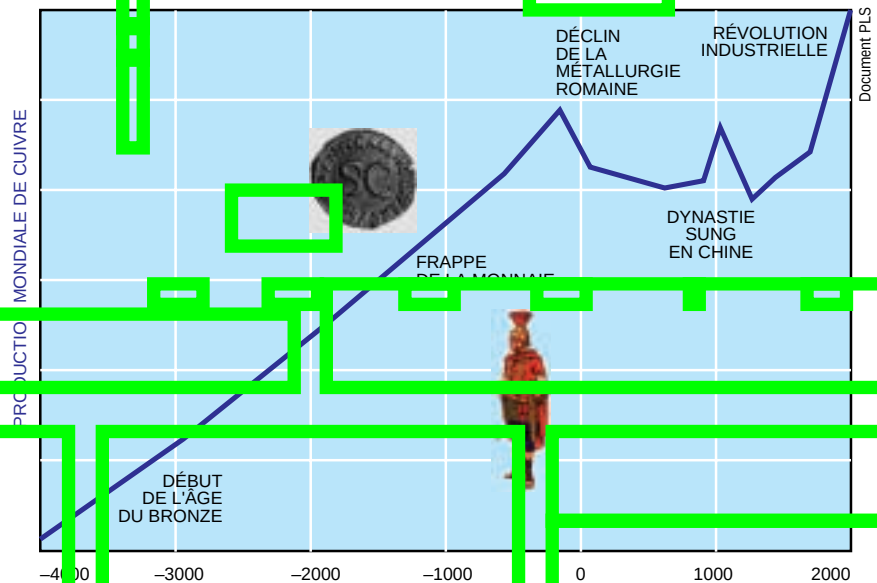


5. LES CONCENTRATIONS EN PLOMB dans les glaces du Groenland ont été altérées par les activités humaines dès le premier millénaire avant notre ère. Sur ce diagramme, on a mis en correspondance la production estimée de plomb et la quantité de plomb présente dans les

glaces. Les analyses montrent que la pollution en plomb de l'atmosphère de l'hémisphère Nord est ancienne. L'Empire romain a largement pollué la Terre. Puis la pollution a repris à partir du Moyen Âge, avant de se généraliser avec l'introduction des additifs pour l'essence.



Claude Domergue



**6. LA PRODUCTION de cuivre (courbe à droite) a commencé il y a plus de 6 000 ans. Elle a culminé une première fois à l'apogée de l'Empire romain (les lingots de gauche datent de cette époque).**

**Un deuxième maximum est observé à l'époque de la dynastie Sung, en Chine. La production actuelle est proche de neuf millions de tonnes par an.**

thyle et les métaux lourds. Les métaux lourds sont des molécules n'existant pas à l'état naturel dans l'environnement, elle constituent des traceurs de la pollution par les additifs de l'essence. Absentes de la neige et de la glace déposées avant les années 1920, elles sont présentes dans les couches déposées à partir des années 1930.

De surcroît, l'étude de la composition isotopique du plomb déposé au Groenland a permis d'identifier l'origine géographique de ce plomb, par comparaison avec les « signatures isotopiques » des différentes zones sources de l'hémisphère Nord : pour ces études, on détermine par exemple l'abondance relative du plomb 206 et du plomb 207 dans le plomb émis dans les diverses régions du Globe, et on la compare aux abondances isotopiques effectivement observées dans les neiges du Groenland.

Ces analyses ont montré qu'au début des années 1970, les deux tiers du plomb atmosphérique qui tombait au Groenland provenaient des seuls États-Unis ; à la fin des années 1980, les États-Unis n'étaient plus responsables que du quart des retombées, par suite de la très rapide baisse de l'utilisation des additifs dans ce pays. Les trois quarts du plomb provenaient alors d'Europe, où la baisse de l'utilisation des additifs au plomb a été plus tardive.

Les seuls autres métaux pour lesquels on dispose de suffisamment de

données fiables pour les deux derniers siècles sont le zinc, le cadmium et le cuivre. Le cuivre a été utilisé depuis des siècles, mais son usage a fortement augmenté jusqu'aux années 1960-1970, puis elles ont légèrement diminué au cours des deux dernières décennies. Les concentrations atteintes pendant les années 1960-1970 sont huit fois supérieures aux valeurs naturelles pour le cadmium, et cinq fois supérieures aux valeurs naturelles pour le zinc et le cuivre.

Toutefois la chronologie des changements diffère. Pour le cadmium, la croissance des concentrations a pu avoir été progressive à partir

des années 1770, alors que, pour le cadmium, elle n'aurait commencé qu'à partir des années 1850.

L'augmentation des concentrations jusqu'aux années 1960-1970 résulte sans aucun doute de l'augmentation des émissions de métaux liés à la production des métaux non ferreux, à la sidérurgie, à la combustion du bois et des combustibles fossiles et à l'incinération des ordures. La décroissance observée au cours des deux dernières décennies illustre les effets techniques des mesures de réduction des émissions adoptées dans de nombreux pays industrialisés.

Claude BOUTRON, professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble (Institut universitaire de France), travaille au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement du CNRS.

J.O. NRIAGU, *Occupational Exposure to Lead in Ancient Times*, in *Sci. Tot. Environ.*, vol. 3, pp. 105-116, 1983.

J.O. NRIAGU et J.M. PACYNA, *Quantitative Assessment of Worldwide Contamination of Air, Water and Soils by Trace Metals*, in *Nature*, vol. 323, pp. 134-139, 1988.

K.I.R. ROSMAN, W. CHISHOLM, C.F. BOUTRON, J.P. CANDELONE et U. GÖRLACH, *Isotopic Evidence for the Sources of Lead in Greenland Snows since the Late 1960s*, in *Nature*, vol. 362, pp. 333-335, 1993.

S. HONG, J.P. CANDELONE, C.C. PATTERSON et C.F. BOUTRON, *Greenland Ice Evidence of Hemispheric Lead Pollution*

*two Millennia ago by Greek and Roman Civilization*, in *Science*, vol. 265, pp. 1841-1843, 1994.

J.P. CANDELONE, S. HONG, C. PEL-LONE et C.F. BOUTRON, *Post-industrial Revolution Changes in Large-scale Atmospheric Pollution of the Northern Hemisphere by Heavy Metals as Documented in Central Greenland Snow and Ice*, in *J. Geophys. Res.*, vol. 100, pp. 16605-16616, 1995.

C.F. BOUTRON, *Historical Reconstruction of the Earth's Past Atmospheric Environment from Greenland and Antarctic Snow and Ice Cores*, in *Environ. Rev.*, vol. 3, pp. 1-28, 1995.

S. HONG, J.P. CANDELONE, C.C. PATTERSON et C.F. BOUTRON, *History of Ancient Copper Smelting Pollution during Roman and Medieval Times Recorded in Greenland Ice*, in *Science*, vol. 272, pp. 246-249, 1996.

# Les hormones végétales

ANTONIO GRANELL • JUAN CARBONELL

*Les hormones végétales sont des messagers chimiques que les cellules utilisent pour moduler leur développement et s'adapter à un environnement auquel les plantes, immobiles, ne peuvent échapper.*

**A**u cours de l'évolution, le développement d'un organisme dépend de sa concentration. Les hormones végétales, initialement isolées, se sont associées pour former des complexes pluricellulaires ; ceux-ci, au fil du temps, ont constitué les organismes supérieurs. Les activités de ces derniers se sont réparties dans des tissus et des organes à la suite de modifications structurelles et de spécialisations des groupes de cellules.

Cette nouvelle structuration a créé un besoin celui d'une croissance harmonieuse dans l'espace et dans le temps. L'activité cellulaire s'est organisée au sein de ces nouvelles structures, chaque cellule recevant des informations issues d'autres cellules et de l'environnement. Les molécules déclenchent des réactions dans les cellules réceptrices ont d'abord été identifiées dans le monde animal ; elles sont dénommées hormones, d'après le terme grec qui signifie «mettre en mouvement». Leur synthèse, leur dégradation ou la variation de leur concentration sont des signaux captés et interprétés par les cellules munies des récepteurs adaptés.

Grâce aux expériences réalisées entre 1926 et 1928 par F. Went, à Utrecht, portant sur l'effet de la lumière sur la croissance du coléoptile d'avoine, le terme hormone végétale a été appliqué aux molécules végétales (le coléoptile est le nom donné à la gaine qui, chez les plantes monocotylédones, entoure l'épicotyle de la graine, la partie qui donnera la tige).

La question posée par l'expérience de Went : comment les extrémités des plantes qui croissent en présence de lumière deviennent-elles la partie inférieure de la tige, les feuilles ou les racines ?

Les expériences de Went ont abouti à la découverte de l'auxine : cette substance voyage de la pointe de la plante, lieu de synthèse, jusqu'au coléoptile, où elle agit sur la croissance,

et dépend de sa concentration. L'auxine a été la première hormone végétale identifiée. À partir des années 1950, on découvre d'autres hormones qui modulent la croissance et le développement des végétaux : gibbérellines, cytokinines, acide abscissique et éthylène. Outre ces phytohormones proprement dites, on identifie d'autres substances — polyamines, brassinolides, acide salicylique, acide jasmonique et ses dérivés, oligosaccharine, etc. — parfois assimilées à des hormones végétales. Les molécules agissent à distance, comme les hormones, et ces substances et les composés associés sont plutôt dénommés régulateurs de la croissance végétale ou phytorégulateurs. Ces régulateurs ont une caractéristique commune : la capacité de commander et de modifier la croissance et le développement des plantes.

Au sein des régulateurs découverts dans les plantes n'exerce de fonction hormonale connue chez les animaux, le système endocrinien des animaux n'a d'équivalent chez les plantes : les cellules des plantes et des animaux communiquent à l'aide de signaux chimiques différents. Il n'empêche que les éléments qui régulent les réactions des plantes aux hormones sont analogues à ceux du règne animal.

Les plantes captent la lumière de l'environnement et ne se conforment à aucun modèle précis dans leur première phase de développement. Les animaux, en revanche, se déplacent, utilisent différentes stratégies pour s'alimenter, et leur croissance est précisément orchestrée. La formidable capacité des plantes à se développer en s'adaptant à l'environnement, et la

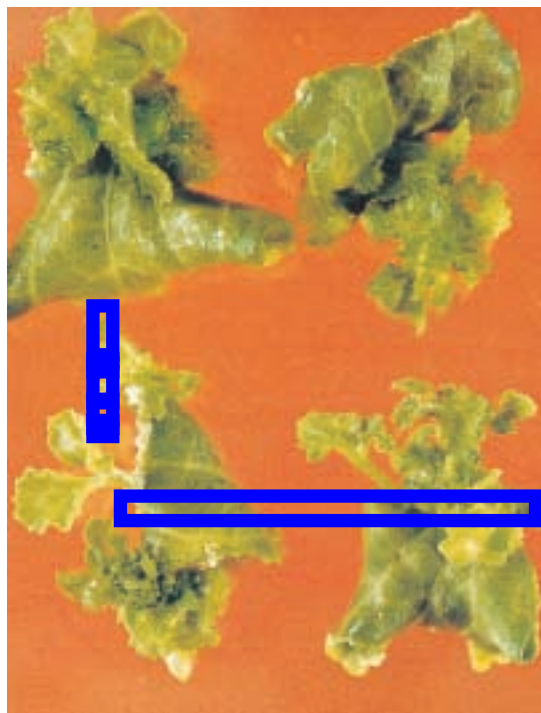
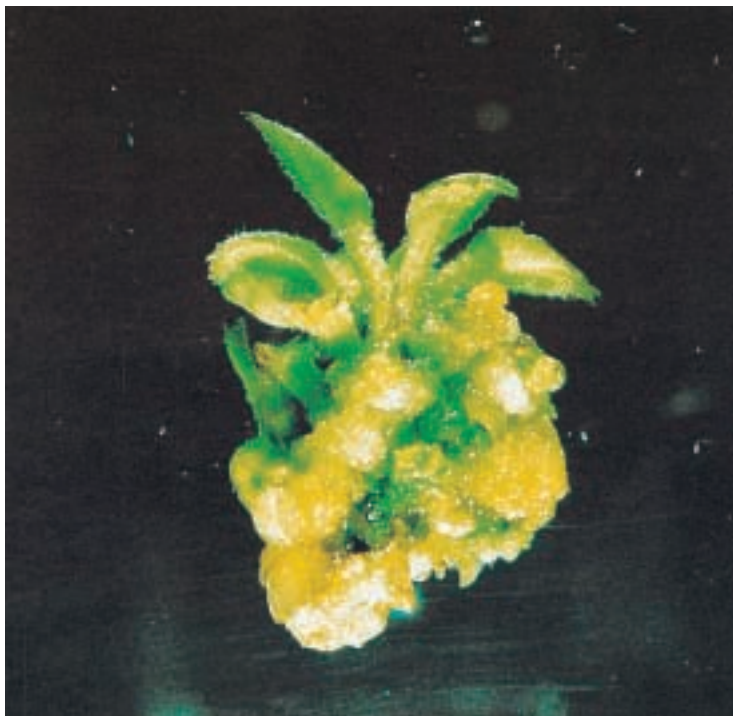
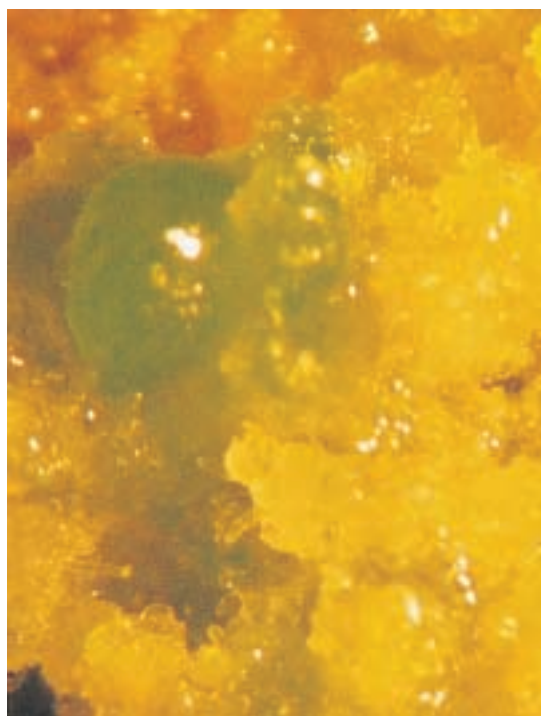
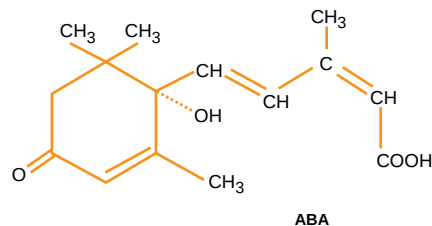
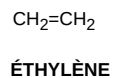
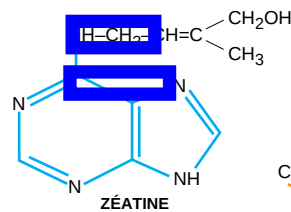
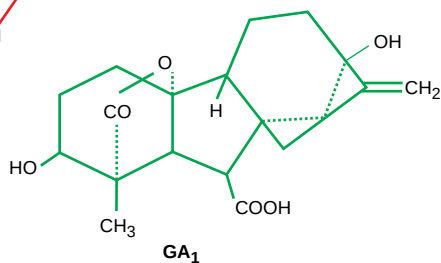
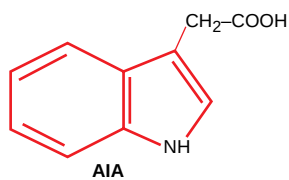
faculté des régulateurs végétaux à moduler la croissance, sont la source de la souplesse de la cellule végétale, la diversité et la richesse des phytorégulateurs. Les caractéristiques ont-elles déterminé les stratégies évolutives ? L'ensemble de messagers chimiques intercellulaires ? Les animaux et les plantes ont-ils des ancêtres communs où sont apparus les premiers mécanismes des réactions intracellulaires ?

## Détermination du rôle des hormones

Les hormones végétales participent à de nombreux mécanismes physiologiques et il n'est pas toujours aisé de déterminer l'effet d'une hormone seule ou si une combinaison d'hormones différentes intervient. Dès lors, comment étudier l'action d'une hormone dans un tel labyrinthe de fonctions ? Les chercheurs s'efforcent de mettre au point des dispositifs expérimentaux où une hormone déterminée joue un rôle unique ou prépondérant dans un mécanisme physiologique.

Pour cela, les physiologistes utilisent fréquemment des mutants dont la synthèse hormonale ou celle d'un élément de la chaîne des réactions est perturbée.

**1. HORMONES ET RÉGULATEURS de la croissance végétale se regroupent en familles, dont les cinq éléments les plus représentatifs sont indiqués dans la partie supérieure : auxines (AIA, acide indolacétique), cytokinines, gibbérellines (GA<sub>1</sub>), cytokinines (zéatine) et acide abscissique (ABA). Les clichés illustrent les effets des hormones végétales à l'échelle des cultures cellulaires. En faisant varier les proportions des hormones et des régulateurs, on peut obtenir des tissus peu différenciés (cal, zone jaune) ou déclencher la différenciation des bourgeons (zone verte, en haut, à gauche), des tiges (en haut, à droite et en haut, à gauche) et des racines (en bas, à droite).**



Les physiologistes déclenchent ainsi, soit une synthèse permanente, soit un blocage, partiel ou total, de l'hormone. Si les mécanismes des réactions sont modifiés, l'hormone n'est plus active, ou n'est active qu'un temps. Dans certains cas, la réaction est permanente, même en l'absence de l'hormone.

Les hormones et autres régulateurs commandent le programme de croissance des cellules végétales. Trois faits valident cette affirmation : les réactions des plantes aux changements de l'environnement déclenchées par les hormones ; les réactions, observées *in vitro*,

des cellules végétales à différentes phytohormones ; l'action de certains phytopathogènes.

Face aux changements de leur environnement, les plantes ne peuvent modifier que la vitesse de croissance et même leur programme de développement. Une plante qui croît dans une zone où la végétation est touffue et la lumière rare tend à s'affiner et à augmenter les distances internodales à la tige (les distances entre deux ramifications sur la tige). Lorsqu'elle atteint des zones plus lumineuses, les distances inter-

nodales diminuent. Selon l'environnement, le méristème apical continue à former de nouvelles feuilles et de nouveaux stiges, ou modifie son programme de développement pour se transformer en méristème floral. Cet accroissement des distances internodales et cette différenciation florale sont commandés par des hormones.

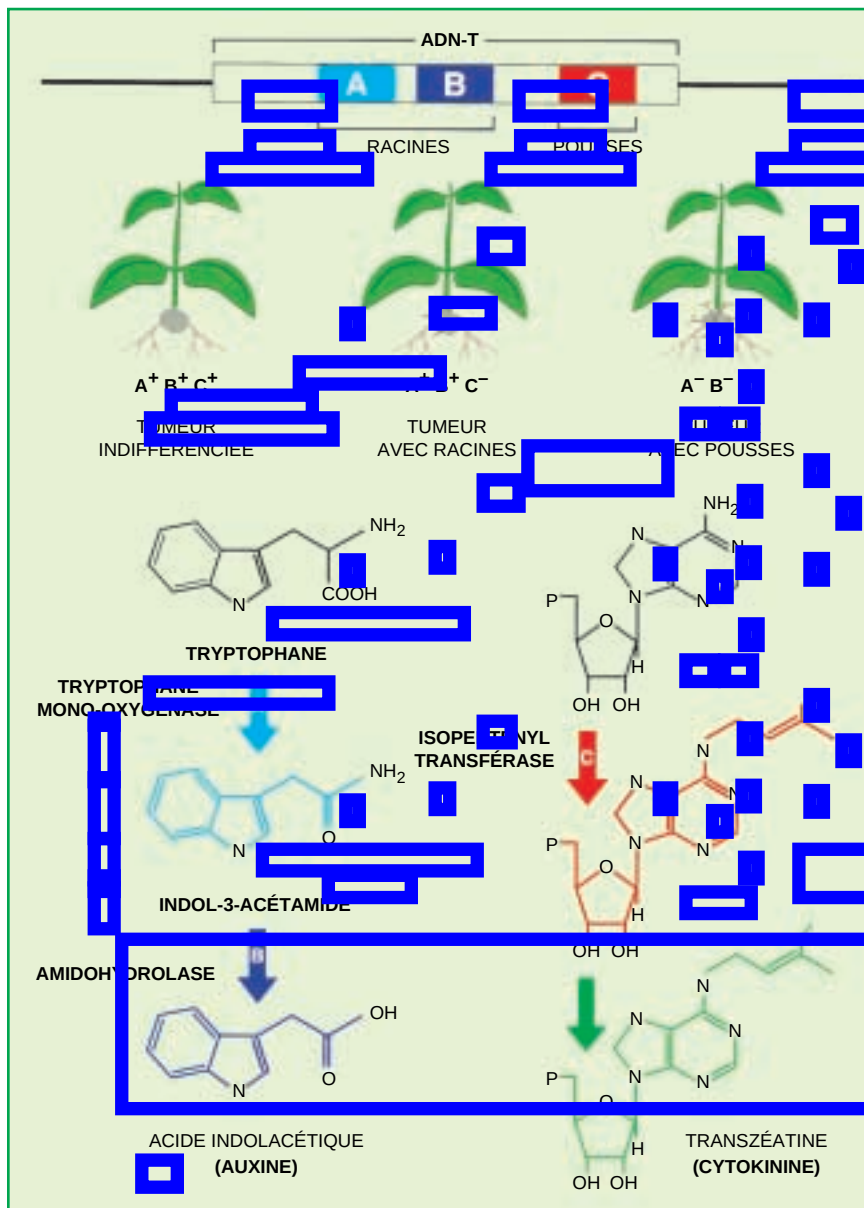
Les cellules des plantes sont dotées de la capacité spécifique de régénérer un organisme complet, même quand elles sont très différenciées. De surcroît, depuis les travaux novateurs de F. Skoog, de l'Université du Wisconsin, on sait que l'apport d'hormones ou de phytorégulateurs en quantités appropriées dans un milieu où croissent des cellules plus ou moins différenciées, peut déclencher la formation d'organes. Selon la proportion d'auxines et de cytokinines, les cellules donnent naissance à des stiges, à des racines ou à des tissus indifférenciés. Les proportions nécessaires diffèrent d'une espèce à l'autre : la régénération des plantes dépend des phytorégulateurs et des espèces sur lesquelles ils agissent.

## Le transfert des gènes

L'homme n'a pas été le premier à modifier le développement et la différenciation des plantes en perturbant les concentrations hormonales. Des millions d'années avant que l'homme ne découvre les hormones, certains pathogènes avaient développé des stratégies ingénieuses. Ainsi, lorsque la bactérie *Agrobacterium tumefaciens* infecte les plantes qui y sont sensibles, elle déclenche des tumeurs en incorporant de l'ADN-T (ADN transféré) dans certains chromosomes de la plante ; ce fragment est incorporé dans le plasmide bactérien inducteur de tumeurs.

Des expériences de mutagenèse menée sur l'ADN transféré ont démontré que trois gènes, A, B et C, déterminent le phénotype de la tumeur. Si le gène qui a été muté, on obtient une tumeur indifférenciée ( $a^+ b^+ c^+$ ), une tumeur avec des racines ( $a^+ b^+ c^-$ ), une tumeur avec des pousses ( $a^- b^+ c^+$ ). Des gènes portant la production des enzymes actives dans la biosynthèse des auxines et des cytokinines, et les concentrations de ces hormones déterminent le phénotype de la tumeur.

Les biologistes utilisent la bactérie *Agrobacterium tumefaciens* pour transférer de l'ADN dans des plantes qui y



**2. INFECTION D'UNE PLANTE par *Agrobacterium tumefaciens*.** L'organisme transfère aux cellules végétales un fragment d'ADN (l'ADN-T) contenu dans le plasmide bactérien inducteur de tumeurs. L'ADN transféré est porteur de gènes (A, B et C) qui permettent la synthèse d'acide indolacétique (auxine) et d'isopentényladénine, précurseur de la transzéatine (cytokinine), qui sont les hormones responsables du phénotype de la tumeur. Dans cette expérience, *Agrobacterium* conserve sa capacité de produire des tumeurs et, selon le gène qui est muté, les tumeurs ont des phénotypes différents.

sont sensibles, pour y introduire des gènes étrangers et créer des plantes transgéniques. Pour cela, ils emploient des plasmides «désarmés», c'est-à-dire des bactéries qui conservent les gènes permettant l'introduction d'ADN dans la plante, mais dont les gènes qui ont été remplacés par les gènes que l'on veut introduire. Les plantes transgéniques sont en tous points identiques aux plantes normales, hormis le caractère déterminé par le gène introduit. On a appliqué cette stratégie pour incorporer divers types de gènes, y compris ceux qui modifient la biosynthèse des hormones.

On détermine le mécanisme d'action d'une hormone par diverses stratégies expérimentales. On peut, par exemple, étudier le lien entre l'augmentation ou la diminution de la concentration endogène d'une hormone et un mécanisme physiologique particulier tel qu'un changement métabolique. Une deuxième stratégie consiste à inhiber la production d'une hormone, à observer quel mécanisme est perturbé, puis à tenter de rétablir le comportement normal grâce à l'apport exogène de cette hormone.

Avec la première stratégie, les botanistes ont étudié pourquoi une faible concentration en gibbérellines entraîne une distance internodale quasi nulle chez les pois nains. Que se passe-t-il quand nous ajoutons de l'acide gibbérellique? Les distances internodales augmentent et atteignent celles des plantes normales. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que, si de nombreux mécanismes sont perturbés par l'apport exogène d'hormones, les effets observés ne permettent pas toujours de déduire que l'hormone est présente à l'état naturel, et qu'elle joue un rôle physiologique.

permettent de nouvelles stratégies pour bloquer cette synthèse. Pour ce faire, on introduit un gène qui code une enzyme de la biosynthèse d'une hormone, mais cet ADN est tel qu'il produit un ARN antisens, complémentaire de l'ARN messager. L'ARN antisens se lie à l'ARN messager et la synthèse de l'hormone est inhibée.

Dans ce contexte, les chercheurs du laboratoire de l'Université d'Albany (États-Unis), ont introduit dans des plants de tomate un gène chimérique conçu pour bloquer la synthèse de l'éthylène (on bloque la synthèse de l'ACC synthase, l'enzyme qui synthétise l'acide amino- cyclopropane carboxylique, un métabolite précurseur de l'éthylène). Le gène utilisé est constitué de deux éléments : le promoteur

35S du virus de la mosaïque du chou-fleur (ou du gène *CaMV*) et le segment de l'ADN de la tomate, qui est transcrit en ARN antisens (l'ARN antisens bloque l'ARN messager de l'ACC synthase et inhibe la synthèse de l'enzyme). Le gène s'insère dans l'ADN-T d'un plasmide bactérien inducteur de tumeurs désactivé ce qui permet la transformation stable des plants de tomate.

Les tomates transgéniques synthétisent moins d'éthylène. Pourquoi? Parce que l'ARN antisens produit par l'ADN étranger se lie à l'ARN messager de l'ACC synthase, et la production de l'enzyme diminue. Sans précurseur, la production d'éthylène diminue.

moins pendant la période normale. En revanche, un apport d'éthylène déclenche la maturation. On en a déduit que l'absence de maturation est due à l'absence d'éthylène endogène, et non à d'autres facteurs qui auraient pu être perturbés au cours de l'expérience.

De même, D. Grierson, de l'Université de Nottingham, a bloqué la synthèse de l'ACC oxydase, l'enzyme qui catalyse la formation d'éthylène à partir de l'acide aminocyclopropane carboxylique. Ce blocage résulte lui aussi de l'introduction d'un gène antisens : la synthèse d'éthylène est inhibée, tandis que le précurseur ACC s'accumule.

On sait introduire des gènes qui codent des enzymes éliminant certains précurseurs de la synthèse d'une hormone : H. Klee et ses collègues ont introduit dans des plants de tomate le gène qui code l'ACC désaminase ; cette enzyme, qui catalyse la dégradation de l'ACC en acide oxaloacétique, n'est pas présente dans la tomate normale et bloque ainsi la transformation de la synthèse.

Le blocage de la synthèse de l'éthylène par l'une des procédures décrites empêche la maturation des tomates, ce qui démontre le rôle inducteur de l'hormone et la possibilité de contrôler la maturation par des techniques biologiques.



**3. UNE ABSENCE DE GIBBÉRELLINES** chez les plantes mutantes de pois *nana* provoque leur nanisme (à gauche). Chez les mutants *nana*, la synthèse de la  $GA_{12}$ -aldéhyde est bloquée et notamment celle de  $GA_1$ , la gibbérelline qui déclenche l'augmentation des distances internodales. Quand on ajoute à des plantes naines de l'acide gibbérellique ( $GA_3$ ), une autre gibbérelline active, les distances internodales augmentent, de sorte que les plantes *nana* traitées (au centre) atteignent la taille des plantes normales (à droite).

## La stratégie de l'inhibition

La synthèse hormonale a d'abord été inhibée expérimentalement par voie chimique, mais les progrès des techniques de génie génétique

La biosynthèse de l'éthylène est assez simple, et l'on connaît déjà bon nombre des éléments qui interviennent dans sa régulation. Il n'en est pas de même pour les gibbérellines, une superfamille de plus de 90 composants. L'étude de mutants de maïs par B. Phinney et son groupe de l'Université de Californie, et les travaux menés sur le riz et sur les pois ont permis d'établir que seules quelques gibbérellines (principalement GA<sub>1</sub> et GA<sub>3</sub>) ont un rôle d'hormones végétales.

Toutefois, la biosynthèse de la majorité des hormones reste à découvrir. Le nombre élevé de conjugués (des hormones agissant conjointement avec d'autres métabolites) rend difficile l'identification de leur rôle. Elles jouent un rôle direct sur le développement des plantes, et des molécules qui sont seulement des précurseurs d'hormones. En outre, il reste à identifier les enzymes régulatrices et, en définitive, les voies de synthèse *in vivo*. Ces formes conjuguées sont nombreuses tout comme celles qui sont transportées d'une zone à l'autre de la plante.

Parfois, ce sont des hormones actives qui migrent (c'est le cas de l'ACC). Les conjugués et les précurseurs sont-ils de véritables messagers intercellulaires ? Les hormones rapides et les plus nombreuses qui permettent à la plante de s'adapter aux changements de l'environnement, ou cette adaptation est-elle assurée par les hormones végétales elles-mêmes ?

Malgré la variété des tailles et des structures de l'éthylène, un gaz simple, aux gibbérellines (une molécule à la structure complexe), toutes les hormones végétales ont des masses molaires faibles et une structure rigide. Contrairement aux protéines et aux acides nucléiques, les hormones ne traitent pas l'information elles-mêmes : le signal est reconnu et transmis par les cellules cibles.

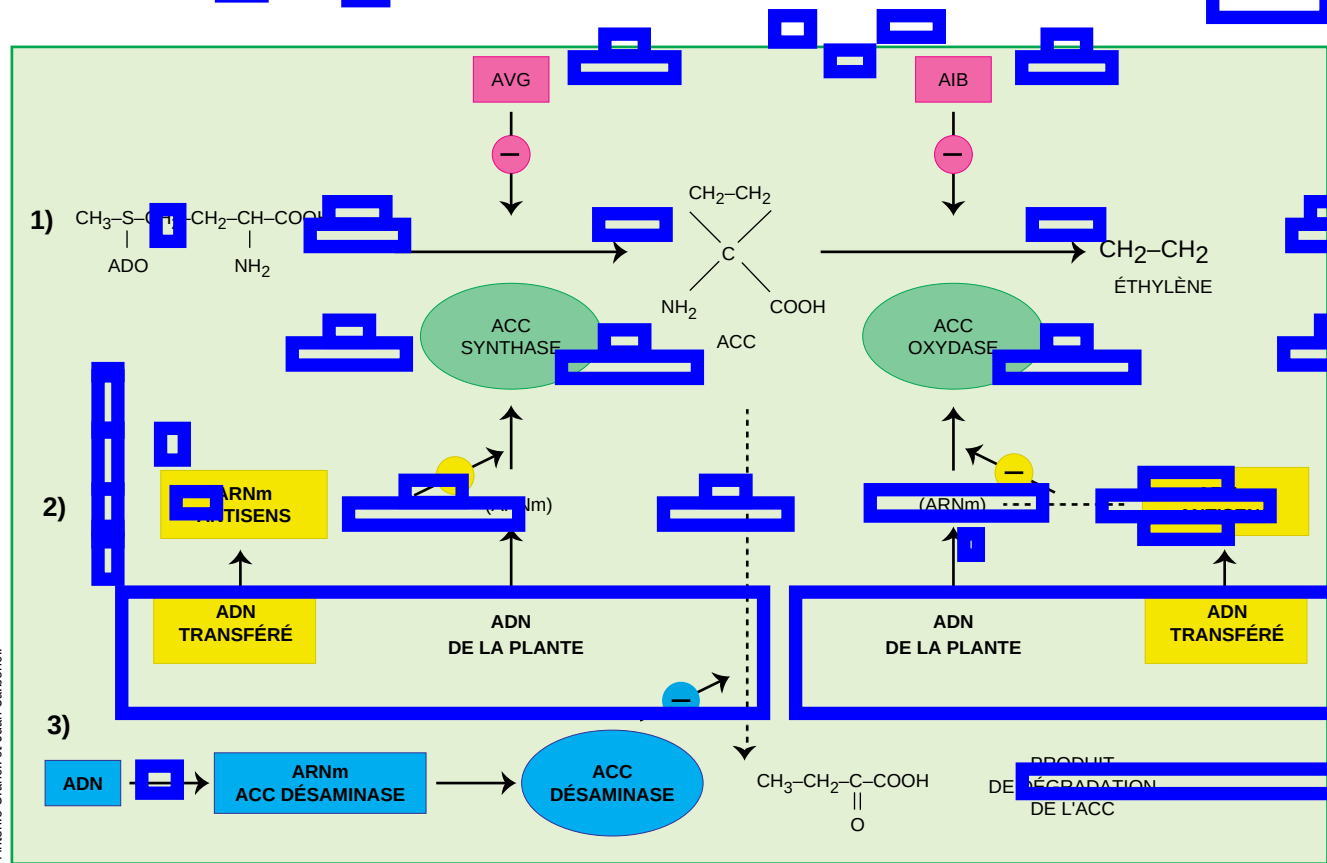
Les hormones animales interagissent avec un des récepteurs qui déclenchent la transduction du signal. Le signal reconnu, l'hormone active la chaîne des réactions aboutissant à la réponse physiologique. Différentes cellules peuvent transformer un même

signal en différentes informations, selon la batterie de récepteurs disponibles, leur localisation et la fonction qu'ils remplissent à un moment donné.

## Hormones et récepteurs

L'action hormonale dépend de la concentration de l'hormone, de la présence et de l'efficacité des récepteurs et des éléments de la chaîne de transduction du signal. Le complexe formé par le récepteur, c'est-à-dire le récepteur activé, est le premier maillon de la chaîne de transduction du signal qui déclenche la première réaction, laquelle active une série de changements qui constituent la réponse physiologique.

Comment étudier l'action hormonale chez les plantes. Premièrement, la recherche de récepteurs et d'éléments de transduction du signal hormonal ; pour cela, on identifie les protéines qui s'unissent à des hormones, ainsi que les gènes qui, lorsqu'ils sont mutés, perturbent l'action des hormones. Deuxièmement, l'analyse des gènes dont l'expression



4. L'INHIBITION DE LA BIOSYNTÈSE de l'éthylène peut être obtenue de diverses façons : 1) par traitement avec des substances chimiques, telles que l'amino-éthoxyvinylglycine (AVG) et l'acide α-amino-isobutyrique (AIB) ; 2) en bloquant l'expression des gènes de la biosynthèse de l'éthylène par des gènes antisens de

l'ACC synthase ou de l'ACC oxydase qui inhibent la production de ces enzymes indispensables à la synthèse de l'éthylène ; 3) on peut aussi introduire dans la plante le gène codant l'ACC désaminase, l'enzyme qui dégrade le précurseur de l'éthylène, l'acide amino-cyclopropane carboxylique (ACC).

est modifiée par des hormones ; pour ce faire, on caractérise les séquences régulatrices d'ADN, on identifie les protéines qui s'y lient et l'on examine l'expression des gènes dans les plantes transgéniques.

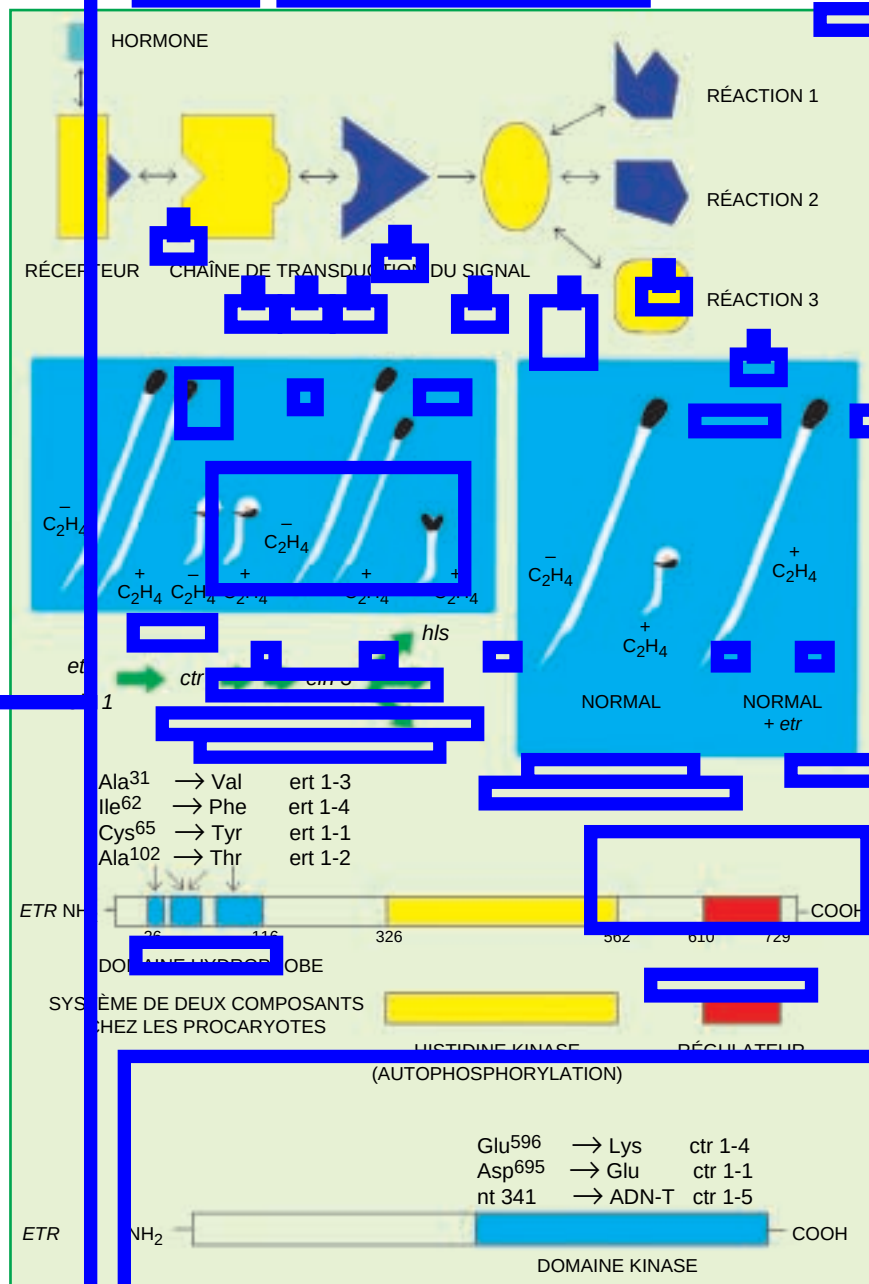
On a identifié les récepteurs hormonaux en isolant des protéines qui se lient à des hormones marquées. Pour localiser les récepteurs, on a également recours à d'autres molécules : des dérivés hormonaux modifiés par voie chimique, des dérivés photosensibles qui s'ancrent au récepteur lorsque leur structure est modifiée par la lumière et des anticorps anti-idiotypes (des molécules dont la structure est analogue à celle du complexe hormonal ; on les prépare en utilisant des anticorps dirigés contre le complexe hormonal et qui jouent alors le rôle d'antigènes).

Les hormones ne se lient pas seulement à leurs récepteurs : elles se fixent à d'autres protéines, à des enzymes et à des transporteurs. Dans le coléoptile du maïs, on a identifié et caractérisé la protéine qui se lie à l'auxine, le *ABP* (*Auxin-Binding Protein*) ; elle se situe dans le réticulum endoplasmique et dans la zone externe de la membrane plasmique. La séquence du gène codant l'ABP et celle de la protéine ont été identifiées.

Les anticorps préparés contre l'ABP bloquent l'hyperpolarisation membranaire des protoplastes du tabac déclenchée par les auxines. En outre, un peptide (la région carboxylique de l'ABP) modifie les canaux qui régulent l'entrée et la sortie des ions potassium à travers la membrane cellulaire. Ces modifications identiques à celles que produisent des concentrations élevées d'auxine, surviennent en quelques minutes et rendent le cytoplasme basique. On en déduit que l'ABP serait responsable de la réponse primaire à l'auxine, et que l'ABP est peut-être un régulateur.

Les progrès les plus importants en matière d'identification des éléments qui participent à la chaîne de transduction du signal hormonal ont été obtenus par l'analyse des gènes dont une mutation provoque des réactions aux hormones. Ils résultent de l'étude d'*Arabidopsis thaliana*, une plante dont le génome est minime.

Chez les plantes *Arabidopsis* poussant dans l'obscurité, l'éthylène déclenche une triple réaction : une inhibition de la croissance de l'hypocotyle (la partie de l'axe embryonnaire qui se trouve sous les cotylédons, et qui



5. UNE HORMONE VÉGÉTALE agit par l'intermédiaire d'un récepteur. L'interaction hormone-récepteur se transmet à une série d'éléments, les maillons de la chaîne de transduction du signal. Les réactions physiologiques des cellules ou des tissus effecteurs sont modifiées par des facteurs qui leur sont spécifiques. L'utilisation de mutants dans la réaction à l'éthylène ( $C_2H_4$ ) de la plante *Arabidopsis thaliana* a permis d'identifier certains éléments de la chaîne de transduction du signal hormonal. Les plantes normales d'*Arabidopsis* réagissent à l'éthylène en manifestant : 1) une inhibition de la croissance de l'hypocotyle et de la racine ; 2) un épaississement de l'hypocotyle ; 3) une accentuation de la courbure apicale. On utilise divers types de mutants : ceux qui sont insensibles à l'éthylène (*etr*, *ein1* et *ein2*) donnent toujours un phénotype qui croît en absence d'éthylène ; les mutants *etr1* et *etr2* ne présentent pas les trois réactions, même en absence d'éthylène exogène. Certains, comme le *hls*, ne développent que quelques-unes des caractéristiques des trois réactions. Lors d'expériences menées avec des mutants doubles, on peut établir la séquence d'activation des gènes. Les gènes identifiés qui participent à la chaîne des réactions à l'éthylène semblent avoir des fonctions similaires à d'autres gènes qui interviennent dans la chaîne de transduction du signal, dans d'autres organismes. L'analyse de la séquence du gène *ETR* indique qu'il code une protéine qui regroupe deux éléments semblables à un capteur et à un régulateur, deux protéines qui, chez les procaryotes, interviennent dans les systèmes de réactions aux signaux extracellulaires. La séquence de la protéine *CTR*, quant à elle, pourrait être comparée à celle des kinases Ser-Thr du type Raf présentes chez des animaux. Elle fait peut-être partie de la cascade des phosphorylations chargées de la transmission du signal hormonal.

Antonio Granell et Juan Carbonell

donne les racines) et de la racine ; un épaississement de l'hypocotyle ; une accentuation de la courbure apicale. Les chercheurs du laboratoire de J. Ecker, de l'Université de Pennsylvanie, ont isolé des mutants d'*Arabidopsis* dont la sensibilité à l'éthylène est modifiée.

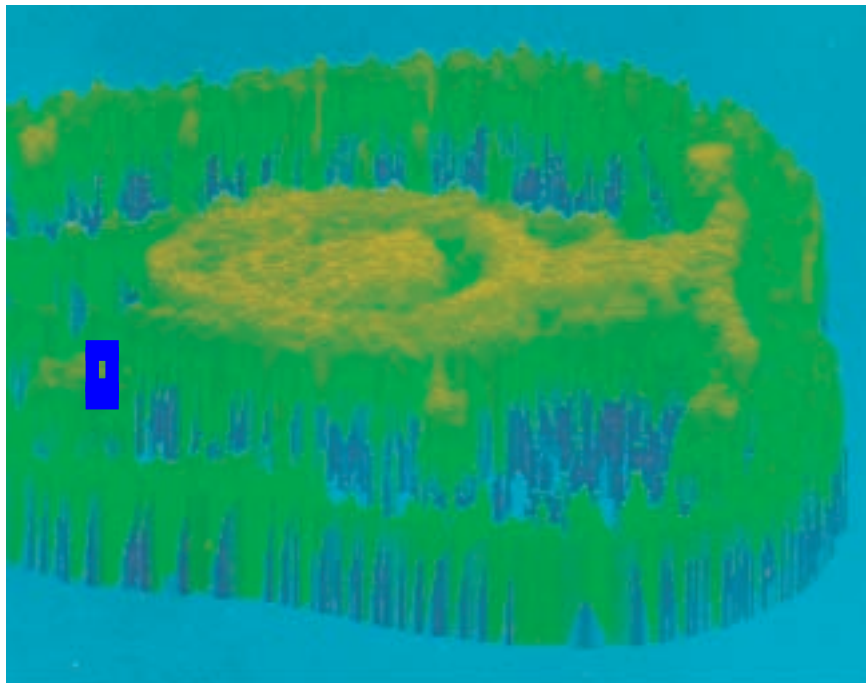
Parmi ces mutants, les types *ein* (*ethylene insensitive*, c'est-à-dire insensibles à l'éthylène) et les *ctr*, présentent toujours les trois réactions, même en l'absence d'éthylène. Dans un autre mutant, le *hls* (sans courbure apicale), une seule des réactions à l'éthylène est perturbée.

Les gènes semblent être activés dans l'ordre *Etr/Ein1 - Ctr - Ein3 - Hls*. On a identifié certaines de ces mutations en comparant les séquences correspondantes de l'allèle normal et des allèles mutés. La comparaison du gène *ctr* et d'autres gènes mutés a montré que la protéine qu'il code est une sérine-thréonine kinase, semblable aux protéines Raf. Ces protéines font partie de la cascade des kinases de la voie de la protéine Ras, une voie décisive dans la régulation de la croissance d'organismes aussi variés que les levures, les nématodes, les mouches ou les êtres humains. En outre, la protéine codée par le gène *EIN3* a une séquence semblable à celle de certains facteurs de transcription : elle participerait à l'activation d'une série de gènes qui, à leur tour, agiraient sur d'autres gènes, déterminant ainsi les réactions physiologiques.

L'analyse physiologique de mutants d'*Arabidopsis* qui ne présentent pas la triple réponse a permis l'identification du gène *ETR*, l'un de ceux qui lui commandent. La protéine codée par ce gène est formée de 738 acides aminés ; elle contient une région amino-terminale hydrophobe et deux régions qui ressemblent à deux protéines bactériennes. La première région, qui va de l'acide aminé 326 à l'acide aminé 562, présente une homologie avec une histidine kinase qui s'autophosphoryle (c'est-à-dire qui est capable, sans intervention extérieure d'ajouter un groupe phosphaté à un résidu d'histidine). La seconde région, qui va de l'acide aminé 610 au 729, présente les caractères d'un régulateur des systèmes de protéines. Ainsi, la protéine végétale est constituée de deux éléments qui, chez les procaryotes, assurent la détection et la transmission de signaux, de l'extérieur vers l'intérieur des cellules.

Quatre mutants *etr* d'*Arabidopsis* ont une région amino-terminale hydrophobe anormale, et la mutation est dominante. Les plantes, qui devraient

manifeste une triple réponse en atmosphère d'éthylène, sont insensibles au gaz après introduction du gène mutant *etr-1*. La protéine *Etr* est-elle un récepteur, ou fait-elle partie d'un complexe, récepteur de l'éthylène ? On l'ignore encore, mais on sait désormais qu'*Etr* et *Ctr* interviennent dans un mécanisme intracellulaire commun à toute une série d'organismes.



N. Harris



D. Ordáez

**6. L'EXPRESSION d'une thiolprotéase est contrôlée par des hormones dans des tissus floraux sénescents de pois. L'ARN messager de la thiolprotéase est localisé dans l'ovule et dans l'endosperme de l'ovaire (en jaune, en haut). On l'a détectée par une sonde ARN antisens qui s'hybride avec l'ARN messager de la protéase présente dans les cellules de ces organes. Le traitement de l'ovaire par l'acide gibbérellique inhibe l'expression de la protéase et provoque le développement du fruit. Pour étudier les gènes dont l'expression est commandée par les hormones, on construit un gène, qui contient un fragment du gène de la thiolprotéase associé à un gène marqueur (le gène de la  $\beta$ -glucuronidase de *Escherichia coli*). Cette combinaison est introduite dans les cellules de pétales de pois avec un canon à particules. Les cellules qui ont acquis le gène et expriment la thiolprotéase, expriment également la  $\beta$ -glucuronidase, que l'on détecte grâce à sa couleur bleue (en bas).**

## Analyse des gènes et activité hormonale

En analysant les gènes régulés par des hormones, on a précisé les mécanismes de régulation. On a commencé d'abord des polypeptides et des messagers dont la synthèse est déclenchée ou inhibée par une hormone; puis, on identifie et on isole des séquences régulatrices des gènes et des protéines qui s'y lient; enfin, on introduit dans des plantes des gènes spécifiquement commandés par des hormones, afin d'en découvrir la fonction.

Certains de ces gènes contiennent des séquences HRE qui réagissent aux hormones (HRE pour *Hormone Responsive Elements*); ces séquences sont localisées dans la région du promoteur. Au cours de l'étude des promoteurs, on a délimité des séquences qui sont communément reconnues par certaines protéines, dont la présence est nécessaire à la régulation du gène par l'hormone. La perte d'une séquence HRE, ou une mutation dans cette région, entraîne la perte partielle ou totale de la sensibilité à l'hormone: ces éléments agiraient comme des rhéostats modulateurs de l'expression du gène.

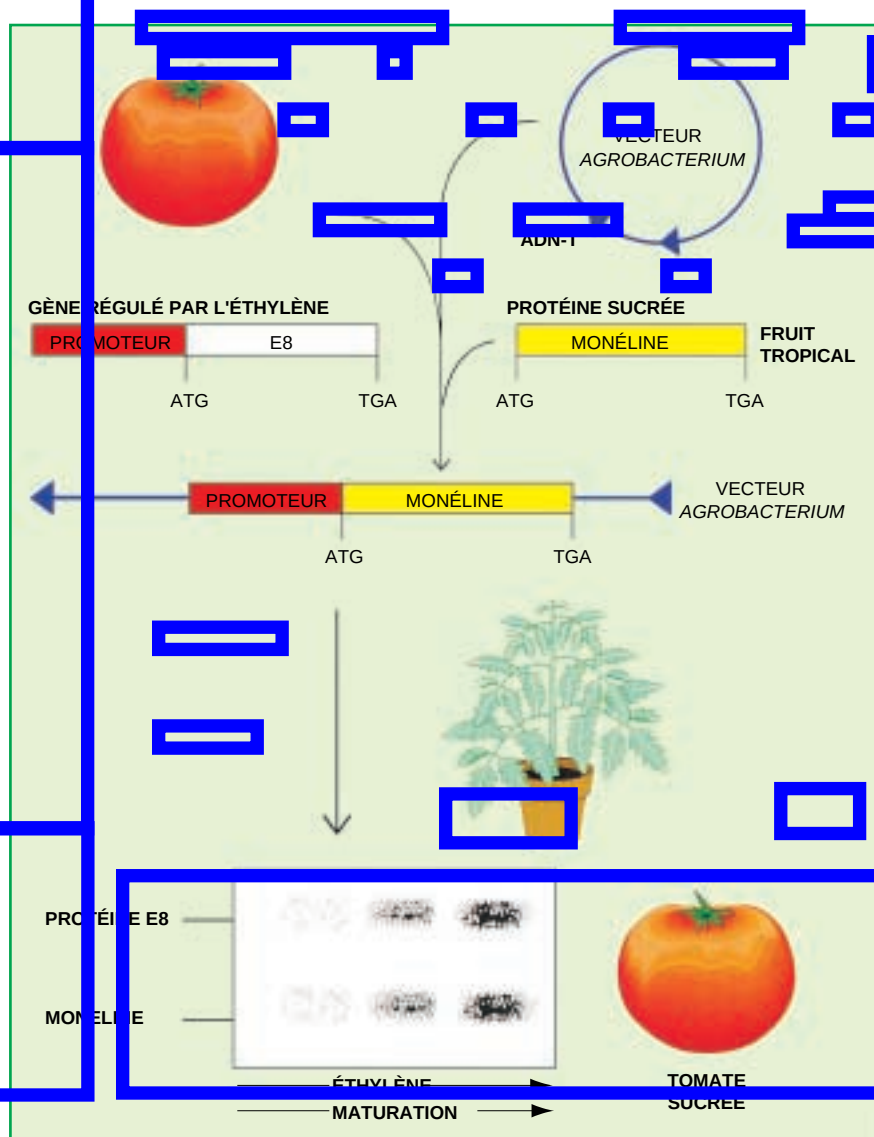
Dans notre laboratoire de l'Institut de biologie moléculaire et cellulaire des plantes, nous avons étudié l'expression du gène d'une thiolprotéase durant la sénescence d'ovaires de pois non pollinisés. L'application de gibbérellines sur l'ovaire évite sa sénescence et empêche l'expression du gène de la thiolprotéase. En revanche, elle favorise le développement de fruits sans graines. Pour observer l'expression du gène de la thiolprotéase, on construit un gène, par l'union d'une séquence régulatrice du gène de la thiolprotéase et du gène marqueur *gus* (qui code l'enzyme  $\beta$ -glucuronidase). Quand ce gène est présent dans les fleurs où s'exprime temporairement le gène de la thiolprotéase, on le détecte par la couleur bleue due à l'enzyme  $\beta$ -glucuronidase. On délimite ainsi les séquences responsables du contrôle hormonal de l'expression d'un gène.

L'étude de gènes contrôlés par les gibbérellines et par l'acide abscissique a permis l'identification de séquences régulatrices GARE (pour *Gibberellic Acid Regulatory Elements*) et ABRE (pour *Abscissic Acid Regulatory Elements*). L'identification d'ARN messagers et de protéines dont la production, très rapide, est commandée par des hormones a per-

mis l'identification de certains maillons de la chaîne de transduction du signal transmis par les auxines. Ainsi, l'expression de deux gènes (*IAA1* et *IAA2*) est-elle activée quatre ou huit minutes après l'application d'auxine? Parmi ces gènes, *IAA1* et *IAA2*, sont des protéines qui agissent dans le noyau dont la durée de vie moyenne est très courte (de six à huit minutes en moyenne); elles ressemblent à des facteurs de transcription présents chez les procaryotes. Ces protéines sont-elles l'autre extrémité de la chaîne de transduction du signal dû aux auxines?

Dès lors que les séquences cibles des hormones agissant sur l'ADN sont connus, nous pouvons chercher dans quelle cellule et dans quels tissus l'hormone s'accumule. On introduit, dans les cellules végétales, un mo-

teur d'un gène, contrôlé par des hormones et couplé à un gène marqueur. Par exemple, on construit un gène contenant le promoteur du gène *SAUR* du soja (un gène dont on ignore la fonction, mais qui est couplé aux auxines), lié à la séquence codante du gène *gus* (on introduit ce gène dans des plants de tabac grâce à *Agrobacte-*



7-158 RÉGIONS RÉGULATRICES des gènes contrôlés par des hormones commandent l'expression d'autres gènes chez des plantes transgéniques. Cette figure illustre l'expression d'un gène de tomate constitué par les séquences régulatrices du promoteur du gène *E<sub>8</sub>* et par la région codant la monéline, la protéine sucrée de la plante tropicale *Taumatococcus daniellii*. Durant la maturation du fruit, la régulation est assurée par l'éthylène. Le fragment d'ADN constitué du promoteur et du gène codant la monéline est introduit dans des plants de tomate par l'intermédiaire d'*Agrobacterium*. Dans ces plantes transgéniques, la monéline est produite durant la maturation du fruit déclenchée par l'éthylène. La présence de monéline confère un goût sucré aux tomates, sans augmenter la concentration en sucres.

*rium tumefaciens*). Les cellules qui contiennent des auxines activent le promoteur SAUR et le gène marqueur qui produit une couleur bleue.

## Hormones et rendements agricoles

La sélection d'espèces végétales d'intérêt agricole a été pratiquée selon des critères qui, sans qu'on le sache, correspondent à la présence ou à l'absence d'hormones végétales. Ainsi, en recherchant des variétés qui exigent moins d'engrais et dont les tiges restent bien droites, pour faciliter la récolte et pour éviter les attaques des prédateurs et des agents pathogènes, on sélectionne des plantes de blé naines, résistantes et dont les distances internodales sont courtes. Or, de telles plantes ont des concentrations élevées de gibbérellines. À l'inverse, une concentration élevée en certaines hormones endogènes (les auxines, certaines gibbérellines et les cytokinines) donne des fruits sans graines. Enfin, on a longtemps fait mûrir des fruits en atmosphère confinée et surchauffée, sans savoir que l'éthylène était le principe actif de la maturation.

Quant au rôle de certaines hormones et de divers régulateurs a été établi, on a tenté de reproduire les résultats en appliquant sur les plantes des phytohormones et des régulateurs. L'application d'une substance qui inhibe la synthèse de gibbérellines raccourcit la distance internodale et renforce la résistance des tiges de diverses variétés de blé, plus petites. De même, l'emploi d'auxines, de gibbérellines et de cytokinines a amélioré le développement et les caractéristiques de certains fruits. En outre, on utilise de l'éthylène pour faire mûrir les tomates. L'abscisique, un phytorégulateur, provoque la chute des fleurs de coton, ce qui facilite la cueillette. Enfin, les hormones végétales sont indispensables pour les cultures *in vitro*, pour l'obtention de plants sains, de plantes exemptes de virus ou de plantes qui produisent des sous-produits précieux.

Aujourd'hui, on dispose d'hormones qui commandent le développement des plantes. Les méthodes utilisées respectent mieux l'environnement, puisqu'elles évitent l'épandage de produits chimiques. Nous avons expliqué que la

synthèse de l'éthylène est inhibée par des gènes qui bloquent la production des enzymes qui synthétisent l'éthylène, réduisant la production de ses précurseurs. On peut aussi cueillir les fruits avant qu'ils ne soient trop mûrs : ils résistent mieux au transport, à un stockage prolongé et à de nombreux agents pathogènes qui s'attaquent aux fruits trop mûrs. On contrôle la maturation de ces fruits par application exogène de la phytohormone.

On peut aussi utiliser des promoteurs de gènes commandés par des hormones. La séquence nucléotidique du promoteur est liée à des gènes qui peuvent conférer de nouvelles propriétés, et on en déclenche l'expression par application de l'hormone. On a ainsi introduit un «goût sucré» dans des tomates sans en augmenter la concentration.

On a aussi inséré un gène avec le promoteur du gène E8 (on ignore la fonction du gène, mais son promoteur est activé dans les tomates au début de la maturation et par traitement à l'éthylène) et la séquence d'ADN qui code une protéine à la saveur très sucrée, la monéline (soignée d'un fruit tropical, *Taumatococcus daniellii*).

Les pièces du puzzle constitué par les hormones végétales commencent à s'assembler. La physiologie végétale ouvre de nouvelles perspectives, dont certaines ont déjà été appliquées : la première tomate transgénique résistante à la surmaturation est aujourd'hui sur le marché. C'est le «fruit» des recherches menées sur les mécanismes moléculaires de l'action des hormones végétales.

Antonio G. ANELL et Juan CARBONELL sont chercheurs à l'Institut de biologie moléculaire et cellulaire des plantes, à l'Université polytechnique de Valence.

*Fisiología y Bioquímica Vegetal*, sous la direction de J. Azcón-Bieto et M. Talón, chapitres 12 à 17, Interamericana McGraw-Hill, Madrid, 1993.

M. M. GOLDSMITH, *Cellular Signaling : New Insights into the Action of the Plant Growth Hormones*, in *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 90, pp. 11 442-11 445, 1993.

H.J. KLEE et C.P. ROMANO, *The Roles of Phytohormones in Development as Studied in Transgenic Plant*, in *Critical Reviews in Plant Science*, vol. 13, pp. 311-324, 1994.



# Les infections virales persistantes

JEAN-CLAUDE NICOLAS • VINCENT MARECHAL

*Après une infection virale, l'organisme semble sortir vainqueur du combat qu'il a mené contre le virus. La victoire n'est pas toujours définitive : parfois, le virus persiste dans l'organisme et déclenche une maladie, plusieurs années après l'atteinte initiale ; parfois même, il facilite l'apparition d'un cancer.*

Dès le 1<sup>er</sup> siècle avant notre ère, Hippocrate décrit des lésions cutanées localisées qui réapparaissent après avoir totalement disparu. Tel le serpent qui rampe et parfois se redresse, l'herpès tire sa dénomination du verbe grec, *ërpein*, qui signifie ramper. Puis l'ine l'Ancien, au 1<sup>er</sup> siècle de notre ère, Galien, au II<sup>e</sup>, ou encore Guy de Chauliac, chirurgien des papes d'Avignon, au XIV<sup>e</sup>, décrivent cette maladie de peau étonnante qui réapparaît quand on la croit guérie.

Le terme herpès a longtemps désigné des lésions dermatologiques qui n'avaient guère de lien avec l'herpès tel qu'on a commencé à en préciser les caractéristiques au XIX<sup>e</sup> siècle. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, on découvre le caractère contagieux de la maladie et l'on distingue l'infection exogène, qui correspond au premier contact avec le virus, nommé primo-infection, et l'infection endogène, périodes de réapparition des lésions herpétiques plus ou moins longtemps après la primo-infection. C'est seulement en 1972 que Jack Stevens et ses collègues de l'Université de Californie découvrent les organes où le virus se cache et survit, déjouant les défenses immunitaires.

Pour survivre, les virus doivent sans cesse se multiplier, soit en se propageant au sein des espèces hôtes sensibles, soit en survivant dans le milieu extérieur jusqu'à l'infection d'un nouvel hôte. Dans la plupart des cas, une infection virale commence par une phase aiguë, suivie de l'élimination du virus par le système immu-

nitaire. Toutefois, certains virus ont adopté des stratégies qui leur permettent d'établir des relations durables avec l'hôte infecté. Ces infections, dites persistantes, constituent le lit de maladies graves : le virus « silencieux » peut être responsable de lésions cellulaires ou encore prédisposer à diverses pathologies tumorales qui surviennent plusieurs années après l'infection initiale. La persistance d'un virus est le résultat d'un équilibre entre les défenses de l'organisme et les moyens mis en jeu par le virus pour échapper au système immunitaire. La maladie survient quand cet équilibre est rompu.

## La pérennité de l'information virale

Les virus entretiennent des rapports singuliers avec les cellules infectées. Les virus lytiques, dont la réplication entraîne le mort de la cellule hôte par éclatement, persistent à long terme dans l'organisme uniquement si les cellules hôtes sont assez nombreuses et remplacées à mesure de leur destruction ou si les lésions dues au virus sont modérées.

Le VIH, le virus de l'immunodéficience humaine, responsable du SIDA, illustre combien l'activité lytique d'un virus dépend aussi du type de cellule infectée. Ainsi, le VIH détruit les lymphocytes T infectés, mais se multiplie de façon durable dans les monocytes (des cellules du sang) et dans les macrophages (les « éboueurs » de l'organisme).

Comment le virus parvient-il à préserver son génome dans la cellule hôte ? Lorsque la cellule infectée se divise, elle transmet le génome viral aux cellules filles à condition qu'il ait été préalablement répliqué : ainsi, la première étape de la survie du virus est la réplication de son génome.

La réplication du génome viral est assurée par une coopération entre des protéines virales et des protéines cellulaires. Le cas le plus favorable – pour le virus ! – est celui où il intègre son génome dans le génome cellulaire. C'est notamment le cas des rétrovirus qui recopient en ADN leur génome constitué d'ARN. L'ADN viral est alors inséré dans l'ADN cellulaire. Ce provirus est recopié par la machinerie cellulaire en même temps que le matériel génétique de la cellule. Ainsi, les virus dont le génome est soit constitué d'ADN, soit converti en

**1. DIFFÉRENTS VIRUS** ont été photographiés au microscope électronique à transmission et colorés en fausses couleurs. Le virus de la rougeole et le VIH ont été photographiés au moment où ils sont libérés par une cellule infectée. Ils peuvent persister plusieurs années dans l'organisme. Le virus de l'herpès, de la varicelle ou le virus Epstein-Barr donnent des infections latentes, c'est-à-dire qu'ils se terrent dans des cellules pendant de longues périodes sans déclencher de signes cliniques. De temps à autre, ils se multiplient et réinfectent l'hôte. Le VIH et le virus de l'hépatite B (quand il persiste) sont responsables d'infections chroniques : des particules virales sont produites sans interruption et le patient est contagieux en permanence. Selon les cellules qu'il infecte, le papillomavirus donne une infection latente ou une infection chronique.

ADN, bénéficient des enzymes cellulaires pour leur réplication et leur persistance dans la cellule hôte. Le virus n'est pas infectieux tant que le génome viral n'est pas traduit en protéines, c'est-à-dire qu'il ne produit pas de protéines de structure permettant l'assemblage de nouvelles particules virales.

Quand le génome viral reste sous forme d'ARN, aucune enzyme cellulaire n'en assure la réplication, de sorte que ces virus ne persistent pas à l'état quiescent dans les cellules infectées. Ou bien ils disparaissent, ou bien ils doivent sans cesse produire des particules virales et infecter de nouvelles cellules cibles.

Ces mécanismes ont des conséquences notables sur le traitement

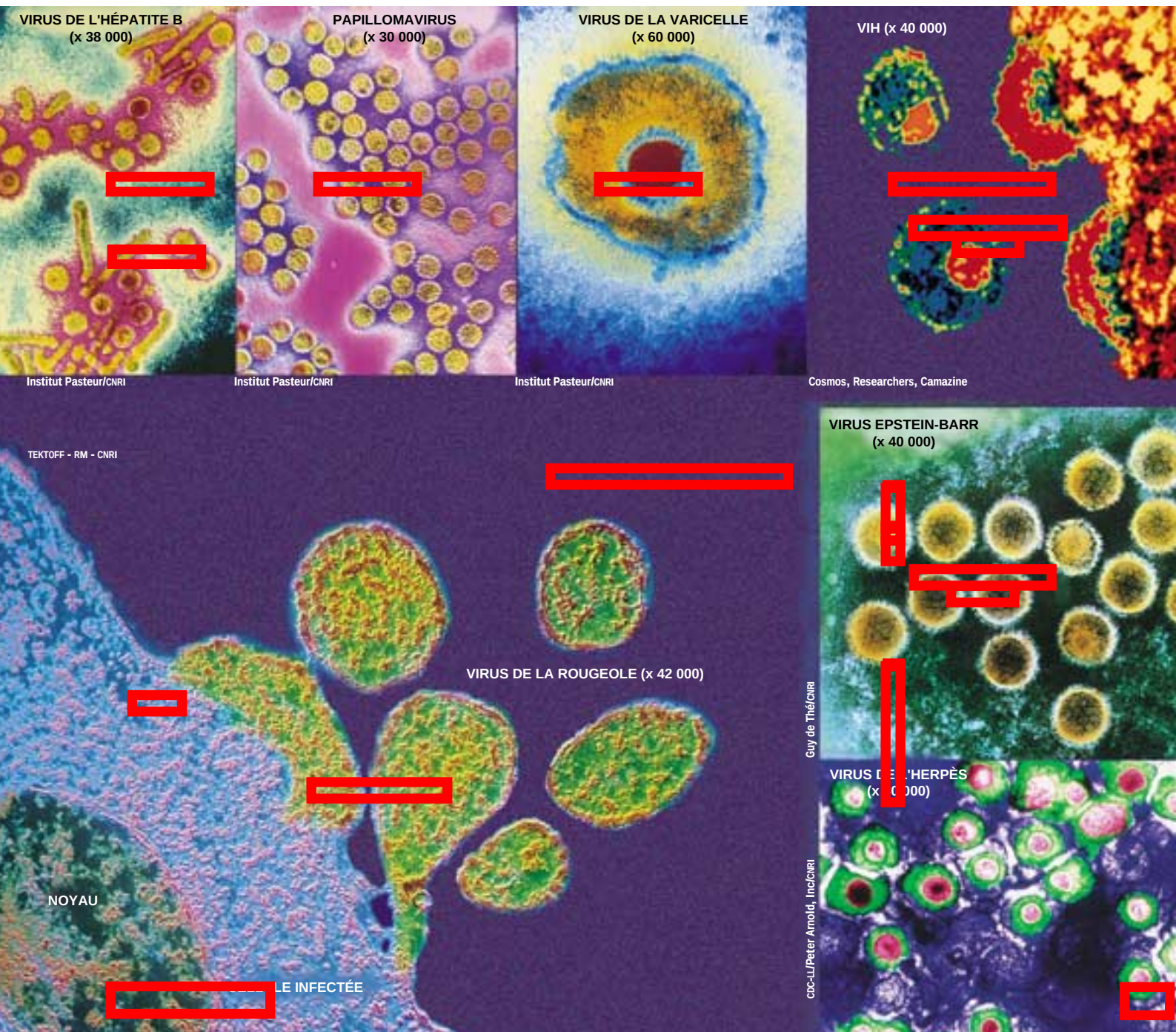
des différentes infections persistantes : quand l'ADN viral est intégré à l'ADN cellulaire, le virus est peu sensible aux agents thérapeutiques qui agissent sur la réplication virale ; au contraire, quand la persistance du virus dans les cellules infectées dépend d'un mécanisme de réplication fondé sur des protéines virales, ces dernières sont des cibles thérapeutiques potentielles.

### Les infections persistantes

Les infections persistantes sont soit latentes, soit chroniques. Dans les infections virales latentes, l'infection aiguë est suivie d'une période dépourvue de signes cliniques. Bien que le virus soit encore présent dans

l'organisme, aucune particule virale infectieuse ne peut être isolée. Sous l'influence de divers stimuli physiologiques, l'équilibre peut être rompu et le virus entre dans une phase de réactivation, où sont produites des particules virales infectieuses. L'ensemble des signes cliniques qui accompagnent la réactivation virale est nommé récurrence.

Au contraire, une infection chronique est caractérisée par la présence permanente de particules virales infectieuses, notamment dans le sang. Une personne ayant une infection chronique peut transmettre le virus en permanence, tandis qu'une personne ayant une infection latente n'est contagieuse qu'au cours des phases de réactivation.



Seuls quelques virus sont responsables d'infections persistantes.

Les deux composantes du système immunitaire (une composante spécifique du virus et une composante aspécifique) sont chargées de neutraliser et d'éliminer les agents infectieux au moment d'une infection et lors des rencontres ultérieures avec le virus. Le système immunitaire spécifique est constitué de cellules de surveillance, notamment des macrophages, qui digèrent les particules virales et exposent, à leur surface, des fragments de protéines virales.

Ces peptides sont présentés aux lymphocytes auxiliaires  $TCD_4$ , lesquels activent, à leur tour, les lymphocytes  $B$  et les lymphocytes  $TCD_8$  cytotoxiques. Les lymphocytes  $B$  produisent des anticorps qui neutralisent les particules virales. Les lymphocytes  $T$  cytotoxiques reconnaissent les antigènes viraux présents à la surface des cellules infectées, et ils détruisent ces cellules. L'ensemble de ces réactions constitue une mémoire immunologique, activée lors de chaque nouvelle rencontre avec l'agent infectieux.

Afin d'échapper au système immunitaire, les virus ont mis au point plusieurs stratégies : ils infectent des cellules peu accessibles, ils expriment peu de protéines virales susceptibles d'être reconnues par les lymphocytes

cytotoxiques, ou ils adoptent des stratégies encore plus complexes.

## Virus de l'herpès et latence stricte

Les virus de la famille des Herpesviridae illustrent les mécanismes de la latence virale. Il s'agit ici de latence stricte, puisque ces virus, au cours de leur cycle réplicatif, passent alternativement par une phase de persistance, où le génome viral, intracellulaire, ne produit aucune particule virale infectieuse, et une phase de réactivation, nécessitant la production et la dissémination du virus infectieux. La latence virale à l'échelle cellulaire coïncide avec la latence clinique : pendant cette phase, on constate une absence totale de symptômes. Des manifestations cliniques apparaissent (dans 50 pour cent des cas) pendant les phases de réactivation.

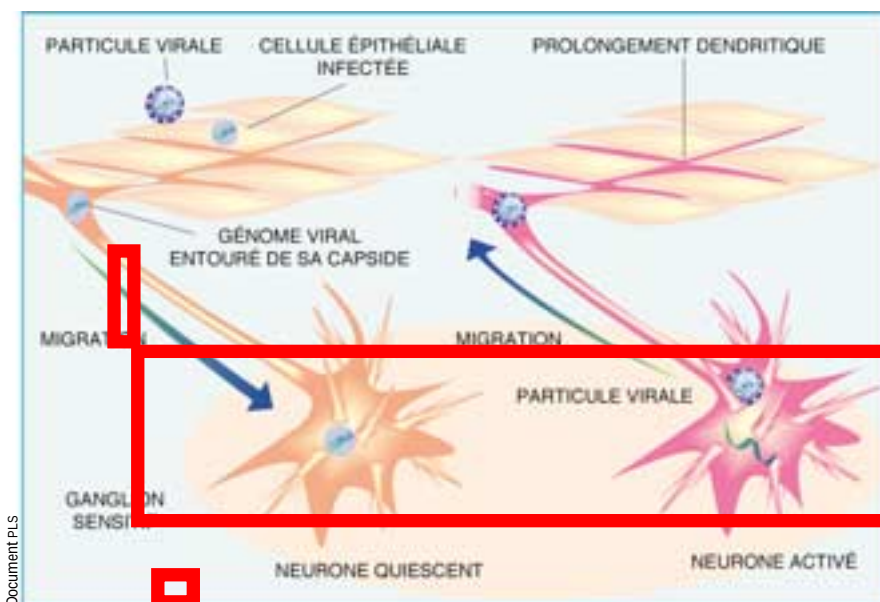
On distingue deux types de virus Herpès. Le virus HSV-1, qui se localise surtout dans la cavité buccale et dans les zones péri-buccales. Il se manifeste par des « boutons de fièvre », de petites vésicules localisées près de la bouche. Chez le jeune enfant, la primo-infection peut provoquer une gingivostomatite, c'est-à-dire une atteinte simultanée de la gencive et de la muqueuse buccale.

Le virus HSV-2 infecte plutôt les cellules épithéliales de l'appareil génital. Les lésions cliniques sont généralement les mêmes qu'avec le HSV-1. Le virus peut aussi être responsable d'atteintes congénitales du nouveau-né, si la mère est infectée. Toutefois, dans la majorité des cas, une primo-infection par le virus HSV-1 ou par le virus HSV-2 ne se manifeste par aucun signe clinique. La moitié des patients infectés voient apparaître périodiquement, sans que les facteurs déclenchant soient précisément identifiés, des vésicules riches en virus, au site de l'infection primaire (les autres, bien que ne présentant pas de signes cliniques, sont contagieuses pendant les phases de réactivation). Ainsi, le site de réapparition est toujours le même, le virus persiste durant toute la vie de l'hôte, mais on ne trouve pas trace de l'infection pendant les phases de latence. Ces constatations ont permis aux virologues de découvrir le site où le virus persiste pendant les périodes de latence : le ganglion nerveux innervant la région de primo-infection.

Chaque territoire de l'organisme est connecté à un ganglion nerveux qui assure le transfert des informations sensibles (le froid, le chaud, la douleur, par exemple) d'une zone de l'organisme au système nerveux central. Les terminaisons nerveuses sensibles sont prolongées par un axone qui peut être très long (plusieurs dizaines de centimètres). Les corps cellulaires des neurones sensitifs sont contenus dans un ganglion.

Au cours d'une primo-infection, des cellules épithéliales proches de la bouche sont infectées ; le virus HSV-1 s'y réplique, gagne le milieu extracellulaire et infecte les terminaisons nerveuses ; la particule virale est alors débarrassée de son enveloppe, et le génome, encore protégé par des protéines virales, « remonte » dans l'axone jusqu'au noyau du neurone, localisé dans le ganglion trijumeau (à la base du crâne). Le virus HSV-2, quant à lui, migre dans le ganglion sacré (proche de l'extrémité inférieure de la colonne vertébrale).

Le virus entre alors dans une phase de latence durant laquelle le génome persiste dans le noyau, sans s'intégrer à l'ADN cellulaire. L'établissement de la latence et sa persistance ne seraient pas commandés par des gènes viraux, mais par l'état physiologique du neurone, c'est-à-dire par divers fac-



**2. LE VIRUS DE L'HERPÈS infecte les cellules épithéliales ; quand la particule virale est débarrassée de son enveloppe, le génome entouré par sa capsid « remonte » l'axone jusqu'au noyau du neurone, localisé dans le ganglion sensitif. Le virus entre alors en latence : son génome persiste dans le noyau du neurone, sans s'intégrer à l'ADN cellulaire. Quand le neurone est activé, le génome viral est traduit en protéines, et des particules virales infectieuses sont produites. Les virions quittent le noyau neuronal, migrent dans l'axone et réinfectent les cellules épithéliales au site d'inoculation primaire du virus.**

| VIRUS                 | SIGNES DE LA PRIMO-INFECTION      | SITE DE LA PERSISTANCE                | FORME DE PERSISTANCE INFECTIEUSE | SIGNES DE LA RECOULENCE | CONSÉQUENCES POSSIBLES À LONG TERME          |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|
| VIRUS DE L'HERPÈS     | VÉSICULES OU AUCUN                | NEURONES                              | ADN                              | VÉSICULES               | AUCUN                                        |
| VIRUS DE LA VARICELLE | VARICELLE                         | NEURONES, CELLULES ENVIRONNANTES      | ADN                              | ZONA                    | AUCUNE                                       |
| VIRUS EPSTEIN-BARR    | MONONUCLEOSE INFECTIEUSE OU AUCUN | LYMPHOCYTES B, CELLULES ÉPITHÉLIALES  | ADN                              | AUCUN                   | LYMPHOME DE BURKITT, CANCER NASO-PHARYNGE    |
| PAPILLOMAVIRUS        | AUCUN                             | CELLULES ÉPITHÉLIALES                 | ADN ET VIRUS INACTIF             |                         | CARCINOME                                    |
| VIRUS DE LA ROUGEOLE  | ROUGEOLE                          | NEURONES ET/OU CELLULES ENVIRONNANTES | PARTICULES VIRALES IMMATURES     |                         | PANENCÉPHALITE SUBAIGUË SCLÉROSANTE          |
| HIV                   | AUCUN OU VARIABLES                | MACROPHAGES, CELLULES MICROGLIALES    | ADN ET VIRUS INACTIF             |                         | SIDA                                         |
| VIRUS DE L'HÉPATITE B | HÉPATITE OU AUCUN                 | CELLULES DU FOIE                      | VIRUS INACTIF                    |                         | HÉPATITE CHRONIQUE, CIRRHOSE, CANCER DU FOIE |

**3. LA MODALITÉ DE PERSISTANCE virale varie, selon le type de virus, chez la personne dont le système immunitaire fonctionne correctement. Les virus de l'herpès, de la varicelle et le virus Epstein-Barr sont des virus latents au sens strict (en ocra) : en dehors des périodes de réactivation, il n'y a pas de production de virus infectieux. Le papillomavirus**

**est responsable d'une infection latente dans les cellules basales de l'épiderme et d'une infection chronique dans les kératinocytes. Les virus de la rougeole, du SIDA et de l'hépatite B engendrent des infections chroniques (en vert), avec production ininterrompue de virus, même si, dans le cas de la rougeole, la production de virus est faible ou nulle.**

teurs cellulaires. Pendant la phase de latence, des ARN seraient exprimés, mais ils ne sont pas traduits en protéines ; leur présence ne serait pas indispensable à l'établissement de la latence, mais à la réactivation du virus. Comme les neurones ne se divisent pas, le virus n'a pas à dupliquer son génome pour assurer sa persistance durant la latence.

Le système immunitaire ne peut se débarrasser du virus latent, d'une part, parce que plusieurs barrières anatomiques gênent l'accès des cellules cytotoxiques aux neurones infectés et, d'autre part, parce que les neurones infectés ne présentent aucun antigène viral à leur surface. Sous l'influence de divers stimuli, tels le froid, le stress, les ultraviolets, la fatigue ou encore l'immunosuppression, la stimulation du neurone autorise le virus à se réactiver. Le virus synthétise alors les enzymes nécessaires à sa réplication et à l'élaboration de particules virales matures. Les virions quittent le noyau neuronal, gagnent les extrémités nerveuses et réinfectent les cellules épithéliales au site d'inoculation primaire du virus. Aujourd'hui, les médicaments utilisés pour lutter contre le virus de l'herpès ont pour cible la thymidine kinase, une enzyme utilisée lors de la réplication du virus. Cette enzyme n'étant pas exprimée durant la latence, le traitement des infections herpétiques limite la réactivation virale, mais est inefficace sur le virus latent.

## Varicelle et zona

La varicelle est l'expression clinique de la primo-infection par un autre virus de la famille des Herpesviridae, le virus de la varicelle et du zona, VZV. Le zona est la manifestation clinique de la réactivation de ce virus : c'est une dermatose caractérisée par une éruption unilatérale de vésicules groupées sur le territoire d'un nerf ; les douleurs associées persistent parfois longtemps après la guérison. On ne dispose pas de modèle animal de la varicelle, et les données disponibles sont toutes issues d'observations cliniques.

Le virus se réplique d'abord dans les cellules épithéliales de l'oropharynx (la cavité buccale et le pharynx), de l'appareil respiratoire supérieur et de la conjonctive (la muqueuse qui tapisse le globe oculaire), puis il gagne le système circulatoire et infecte les cellules endothéliales des capillaires. Il se réplique une seconde fois et atteint le territoire cutané en provoquant une éruption généralisée. Ensuite, le virus infecte comme le virus *Herpes simplex*, les terminaisons nerveuses des ganglions sensitifs où il entre en latence. Les modalités de réactivation du virus de l'herpès et du virus de la varicelle sont différentes : tandis que la probabilité que la maladie réapparaisse diminue avec l'âge pour le virus de l'herpès, elle augmente avec le virus de la varicelle. Par ailleurs, le zona ne

survient qu'une seule fois dans la majorité des cas, tandis que les récurrences du virus de l'herpès sont nombreuses. Enfin, en raison d'une infection primaire généralisée dans le cas du virus de la varicelle, le zona peut toucher tous les territoires cutanés ou éjecter une racine nerveuse, et le patient peut avoir un zona facial, ou un zona ophtalmique, ou encore un zona intercostal...

## Le virus Epstein-Barr

Le virus Epstein-Barr de la famille des Herpesviridae est aussi associé à des infections latentes. Ce virus a un comportement paradoxal : il est présent chez plus de 90 pour cent des adultes sans entraîner de signes cliniques, mais il peut aussi participer à la genèse de certains cancers. La primo-infection est généralement asymptomatique chez le sujet jeune, mais peut déclencher une mononucléose infectieuse chez l'adolescent ou chez l'adulte. Le virus se transmet par la salive : la mononucléose infectieuse est dénommée la « maladie du baiser ». Nous avons montré que le virus serait également transmis par voie transplacentaire, de la mère à l'enfant.

Le virus Epstein-Barr gagne les cellules de l'épithélium oropharyngé, où il se réplique activement. Il infecte les lymphocytes B circulants, en active la division et y entre en latence.

Contrairement aux neurones, les lymphocytes infectés prolifèrent, de sorte que le virus Epstein-Barr doit répliquer son génome à chaque division cellulaire. Durant la latence, les seules protéines virales exprimées sont des facteurs nécessaires à la réplication et au maintien du génome viral dans les cellules saines, d'une part, et à la stimulation des lymphocytes infectés, d'autre part.

Le virus Epstein-Barr persiste toute la vie ; il est périodiquement réactivé, assurant ainsi la réinfection de l'épithélium oropharyngé et la dissémination de nouveaux virions par voie salivaire.

## Le virus de la rougeole

Le virus de la rougeole, qui appartient à la famille des Paramyxoviridae, est également responsable d'infections persistantes. Cette maladie contagieuse est généralement bénigne dans les pays industrialisés, mais c'est une cause de mortalité infantile notable dans les pays en développement. Elle se manifeste par une éruption généralisée. Les complications les plus graves sont les encéphalites, notamment l'encéphalomyélite et la leuco-encéphalite subaiguë sclérosante de Van Bogaert. La première survient chez un enfant sur 1 000, cinq à sept jours après le début de la maladie. Au contraire, la leuco-encéphalite sclérosante est une maladie rare qui atteint l'enfant ou l'adolescent (un cas sur un million), entre cinq et dix ans après la primo-infection. Cette pathologie tardive prouve que le virus crée une infection persistante. Bien que la rougeole soit considérée comme une infection aiguë, le virus persiste chez 60 pour cent des personnes ayant été infectées.

Le virus de la rougeole, dont le génome est constitué d'une molécule d'ARN, se réplique exclusivement dans le cytoplasme des cellules. L'infection aiguë se déclenche dans l'épithélium de l'appareil respiratoire ou dans la conjonctive. Le virus se réplique dans la muqueuse et gagne les ganglions lymphatiques. Il infecte alors des cellules sanguines (les leucocytes). Durant la phase de dissémination, le virus atteint divers tissus et le système nerveux central (les neurones et les cellules gliales, les cellules immunitaires du cerveau), probablement après avoir infecté les différentes barrières qui protègent le système ner-

veux central : les méninges, la pie-mère et le plexus choroïde. Quand les cellules infectées ne sont pas éliminées par le système immunitaire, elles constituent un réservoir de virus. Les cellules infectées ne sont pas détruites, car le virus de la rougeole semble être capable d'empêcher l'expression de certaines molécules (les molécules du complexe majeur d'histocompatibilité de classes I et II, et les antigènes viraux) nécessaires à la reconnaissance des cellules infectées par les lymphocytes cytotoxiques.

Après l'établissement d'un état de persistance, la réplication du génome viral favorise l'apparition de mutations, qui empêcheraient la production de particules infectieuses matures. Pourtant au cours des cycles successifs de la réplication du génome viral, des souches plus virulentes apparaissent : elles sont responsables de la dégénérescence progressive du système nerveux central. Le vaccin antirougeole, parce qu'il empêche le virus de diffuser jusqu'au système nerveux central, a notablement réduit le nombre de cas de leuco-encéphalite subaiguë sclérosante de Van Bogaert.

## Infection chronique et VIH

Le virus de l'immunodéficience humaine, le VIH, engendre une infection chronique. Même si la quantité de particules virales circulantes varie selon le stade de l'infection, le virus est présent, dans le sang notamment, de la primo-infection aux stades avancés de la maladie. Cette maladie est caractérisée par une phase de latence clinique : même si, après la primo-infection, le patient ne présente pas de signes cliniques, le virus ne cesse de se reproduire, et le patient reste contagieux. Le virus persiste pendant des années dans le sang dans divers organes et fluides biologiques, tel le sperme.

C'est un virus à ARN simple brin appartenant à la famille des Retroviridae. Il infecte surtout les cellules qui portent le récepteur CD<sub>4</sub>, en particulier les lymphocytes T auxiliaires, les macrophages et les monocytes. Après son entrée dans la cellule cible, l'ARN génomique est converti par une enzyme virale, la transcriptase inverse, en une molécule d'ADN double brin. Cette dernière pénètre dans le noyau cellulaire et peut s'intégrer dans le génome des cellules cibles. Cette forme intégrée (le provirus) est transcrite par

des enzymes cellulaires (sous contrôle de diverses protéines virales), afin de produire de nouveaux génomes, la transcriptase inverse et les protéines de structure requises pour l'élaboration d'une nouvelle descendance virale.

Après être entré dans l'organisme, le VIH se réplique probablement dans les macrophages, puis gagne par voie sanguine ou lymphatique les organes lymphoïdes (notamment les ganglions lymphatiques et la rate), où il se concentre, infecte de nouvelles cellules qui portent le récepteur CD<sub>4</sub> et produit des particules virales. La primo-infection s'accompagne d'une production intense de particules virales libres qui circulent dans le sang. Ensuite, la charge virale sanguine (ou quantité de particules virales circulantes) diminue, probablement grâce aux réactions efficaces des lymphocytes cytotoxiques. La production d'anticorps dirigés contre le virus est plus tardive (environ huit semaines après l'infection) ; elle ne participe sans doute pas à la diminution précoce de la charge virale.

Après la primo-infection survient la phase asymptomatique. Plusieurs années après la primo-infection, les lymphocytes T CD<sub>4</sub> ont en grande partie été détruits. L'état général du patient se détériore en raison de la destruction massive des lymphocytes T CD<sub>4</sub>, de la multiplication des infections opportunistes et de l'augmentation de la charge virale ; c'est le début du stade SIDA. Chez les patients immunodéprimés, dix millions à un milliard de particules virales sont produites chaque jour, ces virions réinfectant et détruisant à leur tour près de deux milliards de lymphocytes T CD<sub>4</sub>. Au cours des phases précoces de la maladie, le système immunitaire est très actif, mais il ne parvient pas à éliminer totalement le virus.

La variabilité du génome viral, propre à tous les rétrovirus, explique l'émergence de variants viraux résistants aux traitements. Ces variants peuvent exprimer de nouveaux antigènes qui ne sont pas reconnus par le système immunitaire.

Au cours des phases avancées de la maladie, les lymphocytes T CD<sub>4</sub> auxiliaires sont massivement détruits. Or ces lymphocytes T CD<sub>4</sub> sont indispensables à l'activation des lymphocytes T CD<sub>8</sub> cytotoxiques ; leur destruction affaiblit l'efficacité des réactions cytotoxiques.

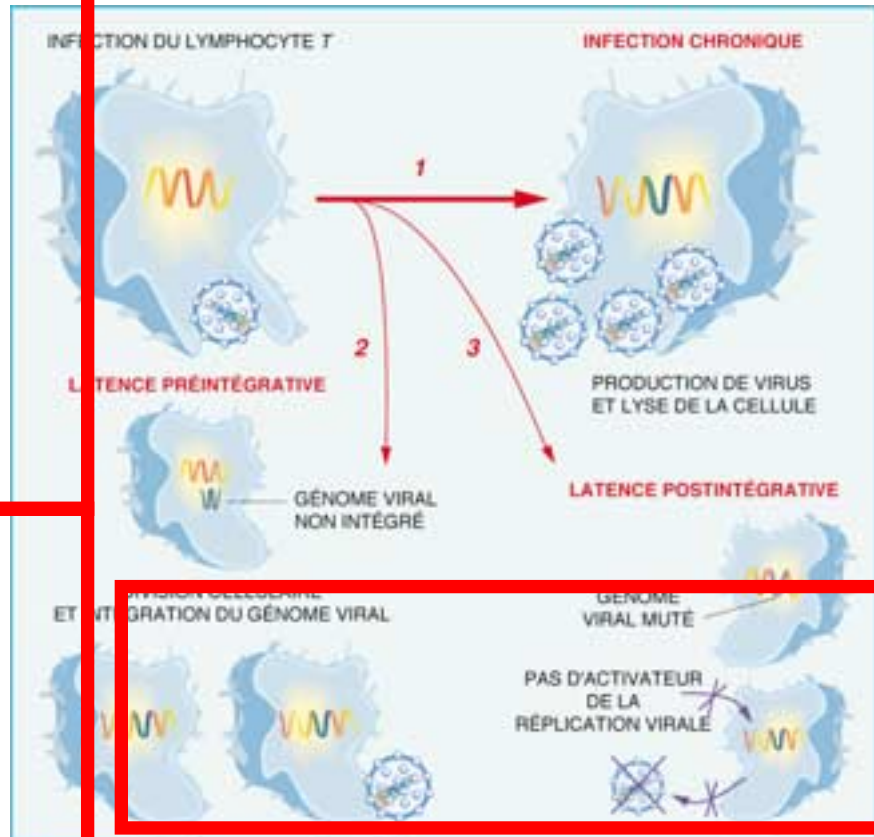
## Cellules productrices de virus et cellules silencieuses

Durant la phase asymptomatique de l'infection, on peut détecter, dans le sang et dans les organes lymphoïdes, des cellules qui contiennent le génome viral, mais qui ne produisent pas d'ARN viral ni de virions. Ces cellules contiennent ce qui a été défini comme des virus latents. Plusieurs questions restent ouvertes : quelle est la proportion, chez une personne infectée, de cellules produisant le virus, et de cellules latentes ? Cette proportion varie-t-elle au cours de la maladie ? Quels sont les mécanismes moléculaires de la latence dans ces cellules ? Plusieurs équipes ont montré que les cellules du sang et des organes lymphoïdes contenant un virus latent seraient 10 à 100 fois plus nombreuses que les cellules produisant le virus. Cette proportion semble évoluer lors des stades avancés de la maladie, les cellules productrices de virus devenant alors les plus nombreuses.

Deux formes de latence ont été décrites : la latence préintégrative et la latence postintégrative. Lors de la latence préintégrative, le génome viral est converti en ADN, mais il n'est pas intégré à l'ADN cellulaire. Cette forme de latence serait caractéristique d'une infection virale survenant dans des cellules quiescentes, c'est-à-dire qui ne se divisent pas. L'ADN viral pourrait persister sous cette forme de quelques heures à quelques jours. Il s'intègre à l'ADN cellulaire seulement quand la cellule entre dans une phase de division.

Dans le cas des lymphocytes T, l'activation des cellules contenant le virus latent non intégré se produit lors de la rencontre avec un antigène étranger (lors d'une infection parasitaire, virale ou bactérienne, par exemple) ou sous l'influence des cytokines produites lors des réactions immunitaires. L'activation d'un lymphocyte T entraîne sa division, puis l'intégration du génome viral dans l'ADN cellulaire et la réplication du virus. Aux stades avancés de la maladie, les personnes infectées sont très sensibles aux infections parasitaires, virales et bactériennes, ce qui activerait les lymphocytes T contenant un génome latent et accentuerait leur destruction par le virus.

Dans la latence postintégrative, le génome viral est intégré à l'ADN cellulaire, mais les cellules infectées ne produisent pas de virus infectieux.



4. LE GÉNOME DU VIRUS s'intègre dans l'ADN cellulaire. Cette sorte que les lymphocytes T infectés produisent des particules virales et que le sang des patients séropositifs, même quand ils sont asymptomatiques, contient des particules infectieuses (1). Toutefois, on a montré que le génome viral ne s'intègre pas toujours dans les lymphocytes T infectés cultivés *in vitro*. Ces cellules, tant qu'elles ne se divisent pas, créent une infection latente (2), concomitante de l'infection chronique : c'est la latence préintégrative. Le génome s'intègre au moment de la division cellulaire, et les lymphocytes produisent alors des virions. Enfin, dans certains cas, le génome viral s'intègre, mais les cellules infectées ne produisent pas de particules virales, parce que le génome est muté ou que la synthèse des activateurs de la réplication du virus est insuffisante : c'est la latence postintégrative (3).

L'étude de telles cellules, *in vitro*, a montré que cette latence postintégrative résulte de deux mécanismes : d'après le premier, les cellules produisent en quantité insuffisante les protéines virales qui commandent l'entrée du virus en phase de réplication (les protéines *env* et *lat*). Le site d'intégration du virus ou l'existence de mutations dans le génome viral expliqueraient les anomalies d'expression de ces protéines. D'après le second mécanisme, des mutations survenant dans le génome viral bloquent sa capacité à produire des particules virales matures.

La coexistence de cellules infectées de façon latente et de cellules productrices de virus favoriserait la constitution et l'entretien d'un réservoir de virus durant la période asymptomatique. La maladie résulterait d'un déséquilibre progressif entre les populations de cellules infectées de façon latente, majoritaires pendant la phase asymp-

tomatique de la maladie, et la population de cellules infectées de façon chronique majoritaires en fin de maladie et responsables de la destruction du système immunitaire. Les équipes de Robert Gallo et de Paolo Lusso, à l'Université de Bethesda, et de Reinhard Kurat, à l'Institut Paul Ehrlich, ont identifié plusieurs facteurs solubles produits par les lymphocytes T CD<sub>8</sub> qui inhibent la réplication du virus, *in vitro*. Ces facteurs, produits *in vivo* durant la phase de latence clinique, permettraient au virus d'entrer en phase de latence.

## Le virus de l'hépatite B

Chez cinq pour cent de personnes infectées, le virus de l'hépatite B persiste ; il est alors responsable d'une infection chronique pure. Le virus est transmis par l'intermédiaire de produits biologiques contaminés (sang, sperme). Il est également transmis de la mère au nouveau-né par voie

transplacentaire ou lors de l'accouchement. Chez 95 pour cent des adultes dont le système immunitaire est fonctionnel, l'infection évolue vers une guérison complète sans séquelles, le virus disparaissant de l'organisme. Chez les autres, le virus peut entraîner une infection chronique des cellules du foie. Pendant la phase de persistance virale, le virus se réplique dans les cellules hépatiques, mais son effet cytotoxique est modéré. Les réactions immunitaires contre le virus déterminent, en grande partie, l'évolution de la primo-infection. La production d'anticorps dirigés contre les protéines de surface du virus jouent un rôle déterminant dans l'évolution de l'infection et dans la protection contre une infection ultérieure. Ces anticorps sont également produits chez les patients en phase chronique, mais ils seraient inactivés, parce que complexés par un excès d'antigènes viraux circulants (ces antigènes, produits en grande quantité, sont libérés dans le sang).

La physiopathologie de l'infection par le virus de l'hépatite B présente un aspect tout particulier lors des infections néonatales, parce que la plupart des enfants infectés deviennent porteurs chroniques. Une infection

virale précoce, survenant avant ou pendant la maturation du système immunitaire aboutirait à l'élimination des cellules cytotoxiques dirigées contre le virus, considéré alors comme un antigène du soi.

Nous verrons que ce virus responsable de infections chroniques peut, dans quelques cas, favoriser l'apparition d'un cancer du foie.

### Infection latente et infection chronique

Les papillomavirus, dont on a décrit plus de 30 types, sont de petits virus à ADN à double brin non enveloppés. Ils sont généralement responsables de verrues cutanées, mais certains sont associés au cancer malin du col de l'utérus (papillomavirus de types 16 et 18). Le virus pénètre dans l'épithélium au gré de lésions cutanées et il gagne les cellules de la couche basale, les cellules qui, après plusieurs divisions, donnent les cellules superficielles de l'épithélium, les kératinocytes. Toutefois, les cellules basales n'assurent pas la réplication du virus, et seuls quelques gènes viraux précoces y sont exprimés. Néanmoins, ces protéines viraux peuvent stimuler la division des cellules basales et assurer la réplication et le maintien

du génome viral sous forme extra-chromosomique.

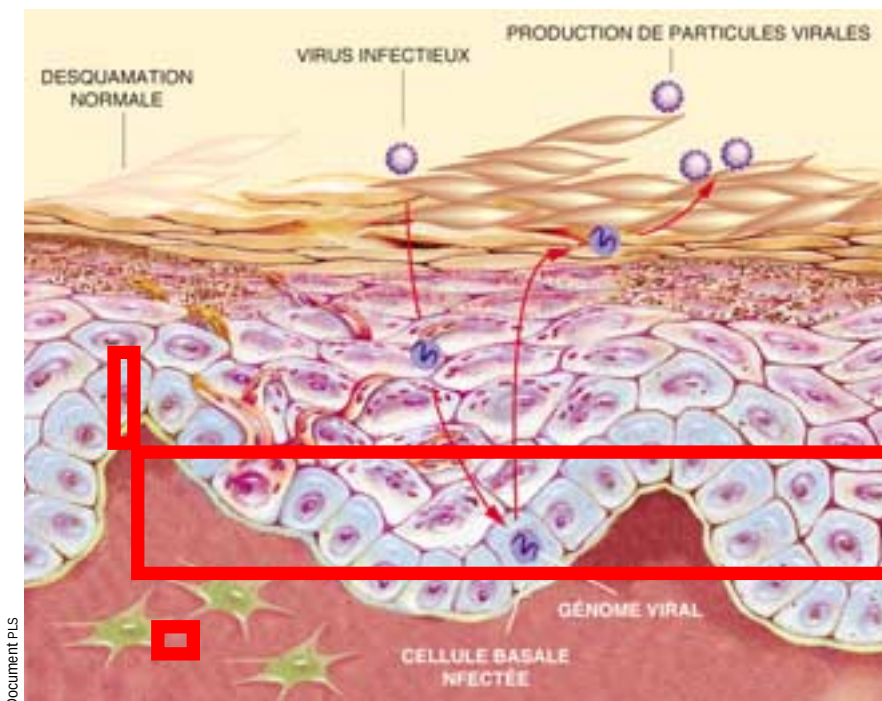
Lors de la différenciation des cellules basales en kératinocytes, les cellules assurent la réplication du génome viral et la production de particules virales matures. Les cellules finissent par être détruites. Cette phase lytique aboutit à la libération des virions infectieux dans les couches superficielles de la peau. Bien que la réaction cytotoxique contribue sans doute au contrôle des infections à papillomavirus, on ignore pourquoi le système immunitaire ne parvient pas à éliminer totalement le virus. De surcroît, l'infection productive a lieu dans les couches superficielles de l'épithélium, dans des sites inaccessibles aux cellules cytotoxiques.

Ainsi, les papillomavirus engendrent-ils une infection persistante située à mi-chemin entre infection latente (infection abortive dans la couche basale) et infection chronique (dans les couches superficielles).

### Infections persistantes et cancer

Il y a une trentaine d'années, on a commencé à supposer que les infections virales ont un rôle dans la genèse des cancers humains. Dans les années 1950, Denis Burkitt, un chirurgien missionnaire anglais exerçant en Afrique, s'intéressa à une forme de lymphomes (proliférations anormales de lymphocytes) particulièrement fréquente dans toute l'Afrique équatoriale. En 1965, Tony Epstein et Yvonne Barr, de l'Université de Londres, démontrent que ces lymphomes sont systématiquement associés à un virus de la famille des Herpesviridae, le virus Epstein-Barr.

Au cours des années qui ont suivi, plusieurs équipes ont établi que ce virus immortalise remarquablement bien les lymphocytes B, *in vitro*, c'est-à-dire que les cellules infectées se divisent indéfiniment, tandis que les cellules non infectées meurent après quelques divisions. Le virus Epstein-Barr est associé à plusieurs pathologies tumorales chez l'homme : le lymphome de Burkitt, endémique en Afrique équatoriale ; le carcinome du nasopharynx, en Afrique du Nord et en Chine du Sud ; la maladie de Hodgkin, des lymphomes des lymphocytes T et B chez les patients immunodéprimés.



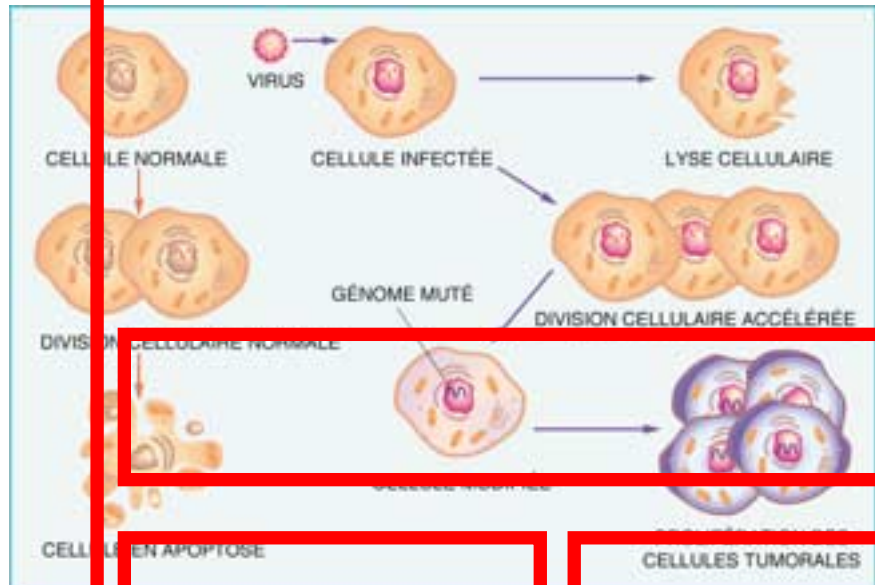
5. LE PAPILOMAVIRUS pénètre dans l'épiderme, et le génome viral gagne les cellules basales. Ces cellules n'assurent pas la réplication du virus, qui y persiste sous forme latente. Au contraire, les kératinocytes, issus de la différenciation des cellules basales, assurent la réplication du génome viral ; ils finissent par être détruits et par libérer des particules virales. Ainsi, dans les couches superficielles de l'épiderme, l'infection est chronique, avec production de virus.

Comment un virus peut-il participer aux mécanismes tumoraux? Tous les gènes viraux requis pour l'immortalisation des lymphocytes B et pour leur transformation sont des gènes exprimés durant la latence. On en a identifié 11, et, parmi eux, cinq jouent un rôle direct ou indirect dans l'immortalisation cellulaire : EBNA2, EBNA3A, EBNA3C, EBNA5 et LMP-1. Une autre protéine, EBNA1, est nécessaire au maintien du génome viral durant la division des lymphocytes B infectés de façon latente, puisqu'elle assure la réplication synchrone de l'ADN viral et de l'ADN cellulaire durant la mitose. La protéine EBNA2 est indispensable à la transformation tumorale : c'est une protéine nucléaire qui active plusieurs gènes cellulaires, notamment le proto-oncogène *c-myc* (un proto-oncogène est un gène cellulaire qui, activé, devient un oncogène, un gène du cancer). La protéine EBNA2 active la division des cellules infectées et empêche leur apoptose (normalement, l'apoptose oblige les cellules anormales à se «suicider»).

La protéine EBNA5 empêcherait les gènes suppresseurs de tumeurs *p53* et *Rb* d'agir. Ces protéines agissent en synergie pour activer la division des lymphocytes B infectés et empêcher leur mort par apoptose. La conjugaison de ces mécanismes provoque une prolifération incontrôlée des lymphocytes et favorise l'émergence de mutations dans le génome cellulaire. Les mécanismes tumoraux se mettent progressivement en place dans la cellule modifiée, laquelle se multiplie au détriment des cellules environnantes.

Chez les personnes immunodéprimées, par exemple chez les patients infectés par le VIH ou ayant reçu une greffe d'organe, les lymphocytes contenant le virus Epstein-Barr se multiplient sans être éliminés par le système immunitaire. Toutefois, on s'interroge : comment un lymphome peut-il se développer chez une personne qui n'est pas immunodéprimée? Le virus Epstein-Barr agirait comme un interrupteur, activant temporairement la division des cellules infectées au gré d'une immunodépression passagère, par exemple. L'évolution de cette prolifération déclenchée par un virus vers un mécanisme tumoral requiert nécessairement plusieurs étapes au cours desquelles un ou plusieurs proto-oncogènes cellulaires sont activés et plusieurs anti-oncogènes inhibés.

Le virus de l'hépatite B et les papillomavirus peuvent aussi participer à



**6. APRÈS S'ÊTRE DIVISÉE plusieurs fois, une cellule normale finit par s'autodétruire, par un mécanisme d'apoptose. Lorsqu'une cellule est infectée par un virus, elle est généralement détruite par un mécanisme de lyse. Toutefois, des cellules infectées peuvent persister. Quand le virus active la division cellulaire et bloque les mécanismes d'apoptose, des mutations du génome cellulaire risquent de se produire, et les cellules modifiées peuvent survivre : quand une cellule dont le génome est muté se multiplie de façon incontrôlée, une tumeur apparaît.**

l'apparition de cancers. L'infection chronique par le virus de l'hépatite B prédispose au cancer du foie. La régénération intensive des cellules hépatiques, due à l'élimination des cellules infectées par les lymphocytes cytotoxiques, serait à l'origine de la genèse des tumeurs.

L'infection persistante due au papillomavirus peut aussi jouer un rôle déterminant dans l'émergence de pathologies tumorales : dans le cas des cancers du col de l'utérus associés aux papillomavirus de types 16 et 18, l'intégration accidentelle du génome viral dans l'ADN cellulaire peut déclencher une expression renforcée des protéines virales *E6* et *E7*. Parce qu'elles neutralisent les deux gènes suppresseurs de tumeurs *p53* et *Rb*, ces deux protéines entraînent la cellule vers une prolifération incontrôlée et favorisent le développement d'un cancer.

Ainsi, les infections virales persistantes, dont l'expression clinique reste longtemps silencieuse, sont parfois le lit d'affections plus graves qui témoignent soit de l'action cancérogène du virus, soit de son action délétère sur une population cellulaire particulière. Les infections chroniques ou latentes se manifestent cliniquement quand l'équilibre entre le virus et l'hôte est rompu. Le traitement des infections persistantes repose sur des agents thérapeutiques qui enrayent le cycle répli-

catif de ce virus sans perturber la physiologie des cellules saines.

Ces traitements inhibent temporairement les réactivations virales et réduisent la quantité de virus produit lors des infections chroniques, ce qui diminue à la fois le potentiel contagieux des patients infectés et les effets du virus sur l'organisme. Cependant, la spécificité d'action de ces molécules explique l'émergence de variants viraux résistants, et l'échec, à long terme, des traitements disponibles aujourd'hui.

Jean-Claude NICOLAS dirige le Service de virologie de l'Hôpital Rothschild, à Paris. Avec Vincent MARÉCHAL, il mène des recherches sur les mécanismes de tumorigenèse déclenchée par les virus chez les patients immunodéprimés.

*Virus et cancer humain*, sous la direction de J.-C. Nicolas et V. Maréchal, in *Revue française de laboratoires*, vol. 265, 1994. J. M. MCCONE, *Viral Latency in HIV Disease*, in *Cell*, vol. 82, pp. 183-188, 1995.

*Le virus Epstein-Barr, biologie et clinique*, sous la direction de J.-C. Nicolas et V. Maréchal, in *La lettre de l'infectiologue*, tome X, n° 5, 1995.

R. AHMED, L.A. MORRISON, D.M. KNIPE, *Persistence of Viruses*, in *Fields Virology*, third edition, pp. 219-249, 1996.

# La dynamo stellaire

ELISABETH NESME-RIBES • SALLIE BALIUNAS  
DMITRY SOKOLOFF

*Les cycles des taches solaires observées sur le Soleil et sur d'autres étoiles aident les astronomes à comprendre les cycles d'activité magnétique du Soleil et leur impact sur le climat de la Terre.*

En 1801, méditant sur les caprices du climat anglais, l'astronome William Herschel observa une relation entre le prix du blé et la disparition des taches solaires. Toutefois, cette relation ne dura pas, de sorte que les scientifiques la reléguèrent parmi les nombreux mythes d'une correspondance entre événements terrestres et solaires. Les variations de l'éclat du Soleil et l'action du Soleil sur le climat de la Terre n'étaient pas démontrées.

Aussi, lorsque trois satellites d'étude du Soleil révélèrent simultanément une diminution du rayonnement solaire, les astronomes crurent d'abord à une panne forcuite des trois détecteurs. Cependant, lorsque la mesure du rayonnement augmenta conjointement dans les trois appareils, il fallut admettre que le hasard devenait excessif : le Soleil se refroidissait et s'échauffait proportionnellement au nombre de taches visibles à sa surface.

Ces dernières années, l'un de nous (S. Baliunas) a observé que d'autres étoiles ont également un éclat variable. Ces études ont permis de proposer l'existence de la «dynamo» qui produit le champ magnétique du Soleil et des autres étoiles. De surcroît, elles ont révélé un lien entre les «taches stellaires» et la luminosité, confirmant les découvertes effectuées dans le cas du Soleil. Toutefois, la signification des cycles solaires et leur influence sur le climat terrestre restent débattues.

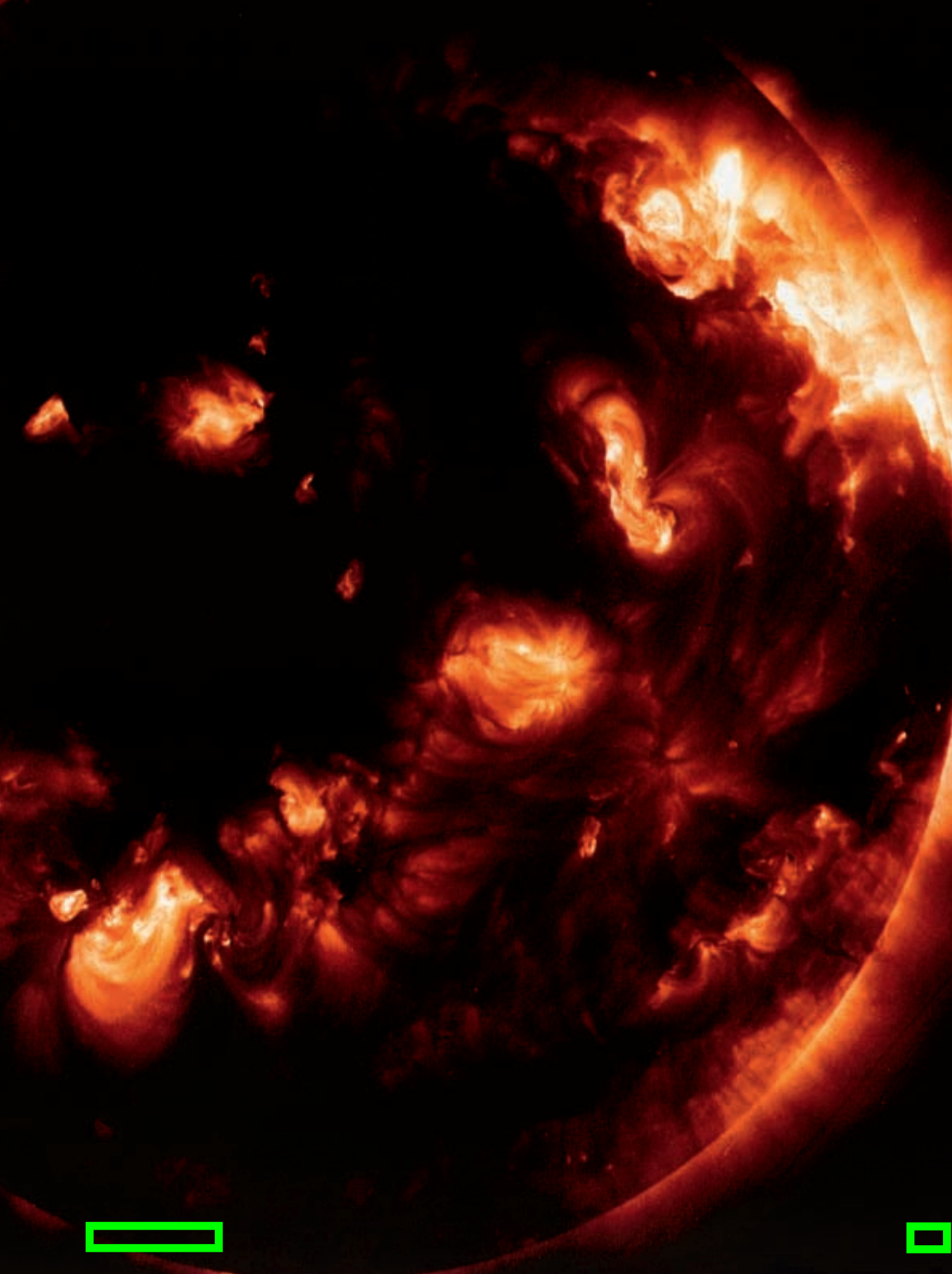
## Les taches solaires

Il y a 2 000 ans, les astronomes chinois avaient déjà observé les taches solaires à l'œil nu. Cependant, il fallut l'invention de la lunette astronomique, au début du XVII<sup>e</sup> siècle, pour que David Fabricius, Thomas Harriot, Christoph Scheiner et Galilée fissent une étude systématique de ces taches. En 1843, l'astronome allemand Samuel Heinrich Schwabe détecta une périodicité d'environ dix ans dans le nombre de taches solaires. Puis, au début du XX<sup>e</sup> siècle, George Hale, de l'Observatoire du mont Wilson en Californie, découvrit que ces taches sombres étaient le siège de champs magnétiques dont l'intensité était des milliers de fois supérieure à celles du champ magnétique terrestre.

Les taches solaires ont un aspect sombre car leur température est de 2 000 degrés inférieure à celle de la surface solaire environnante ; sur un fond noir, elles apparaîtraient rouge orangé. Ces taches sont des lieux d'intenses champs magnétiques. Comme le mouvement ascendant (de convection) du gaz du Soleil bloque localement le transport de chaleur provenant de l'intérieur du Soleil, la température est bloquée et le champ magnétique est intense. C'est pourquoi il se forme des régions froides et sombres : les taches. Les lignes de champ magnétique émergent à la surface du Soleil sous la forme de boucles, les deux «pieds» d'une boucle correspondant à une paire de taches. Autour

**1. LE CHAMP MAGNÉTIQUE à la surface du Soleil est délimité, sur cette photographie en rayons X, grâce aux contours incurvés des éruptions solaires. Les lignes des champs magnétiques qui émergent de la surface solaire chauffent les gaz de la couronne environnante jusqu'à 25 millions de degrés, ce qui les rend brillantes. Les éruptions sont plus fréquentes lorsque les taches solaires sont nombreuses.**

IBM Research and Smithsonian Astrophysical Observatory



**2. UN CYCLONE dans l'atmosphère terrestre (à gauche) ressemble à un cyclone dans l'atmosphère solaire (à droite). Les astromécaniciens pensent que de tels mouvements existent aussi sous la surface du Soleil, dans la zone convective.**

des taches solaires, on peut observer également des plages brillantes, les facules. L'ensemble des taches et des facules dans une zone donnée constitue une région active.

Au début de chaque cycle de 11 ans, les taches et les facules apparaissent d'abord autour de 40 degrés de latitude, dans les deux hémisphères; puis, au cours de la progression du cycle, elles se forment de plus en plus près de l'équateur, qu'elles atteignent au minimum du cycle. Outre le champ magnétique local qui relie des paires de taches et de facules, le Soleil possède un champ magnétique global dipolaire analogue à celui d'un barreau aimanté). À l'intérieur d'une région active donnée, la tache solaire de tête, c'est-à-dire celle qui apparaît la première à la surface du Soleil, quand le Soleil tourne, est de polarité opposée à celle de son pôle le plus proche; la tache de queue est de polarité opposée. Les paires de taches orientées Est-Ouest ressemblent à des aimants dont les polarités sont opposées dans chaque hémisphère. En outre, l'orientation des paires de taches s'inverse tous les 11 ans, de sorte que le cycle magnétique total dure 22 ans.

Le comportement du Soleil n'a pas toujours été aussi régulier. Après la fondation de l'Observatoire de Paris, en 1667, les astronomes observèrent systématiquement le Soleil, accumulant plus de 8 000 jours d'observation en 70 ans. Cependant, jusqu'en 1852, on ne comptait qu'une très faible activité de taches, bien inférieure à celle observée aujourd'hui. Cette découverte ne prit toute son importance qu'à partir de 1852, lorsque Johann Rudolf Wolf reconstitua l'histoire du cycle solaire à partir des archives disponibles. Cependant les résultats de Wolf furent mis en doute par des astronomes modernes qui lui

reprochaient de n'avoir utilisé qu'une partie des archives existantes.

Vers la fin des années 1880, Gustav Spörer et Walter Maunder remarquèrent la coïncidence entre l'anomalie solaire du XVII<sup>e</sup> siècle et un refroidissement du climat en Europe. Cette observation étonnante retomba dans l'oubli pendant plus d'un siècle. Ce n'est qu'en 1976 que John Eddy, du Groupement universitaire pour l'étude de l'atmosphère à Boulder, rouvrit le débat; dix ans plus tard, l'un d'entre nous (E. Nesme-Ribes) et ses collègues examinèrent les archives de l'Observatoire de Paris et confirmèrent l'existence de cette anomalie que J. Eddy nomma alors le minimum de Maunder.

J. Eddy remarqua aussi que la quantité de carbone 14 dans les cernes de croissance des arbres augmentait pendant les périodes de minimum de taches solaires. Le carbone 14 est un isotope radioactif que les rayons cosmiques galactiques (essentiellement des protons) produisent quand ils heurtent l'azote de l'atmosphère terrestre. Or le flot de particules cosmiques est dévié par le vent solaire et le champ magnétique général associé; ceux-ci varient au cours du cycle, de sorte que la production de carbone 14 est plus élevée pendant les périodes de maximum de taches solaires. En particulier, il se forme davantage de carbone 14 lors du minimum du cycle de 11 ans et des anomalies de type minimum de Maunder. La forte augmentation de carbone observée dans les

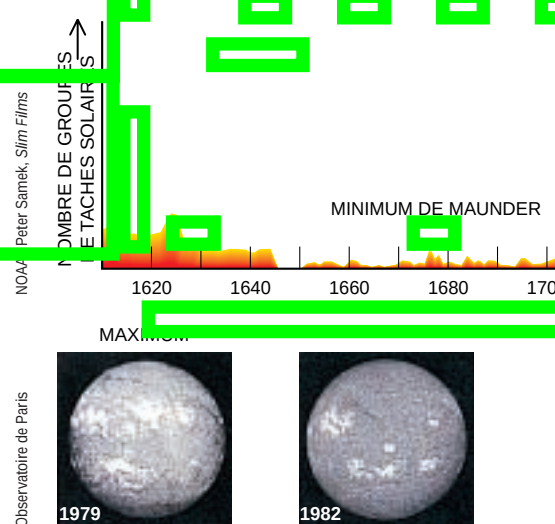
années 1960 et 1970 pendant le minimum de Maunder renforce le lien entre le minimum des cycles de onze ans et les grandes anomalies solaires.

Les archives de Paris révélèrent un autre fait étrange : entre 1661 et 1705, les quelques taches observées sont apparues essentiellement dans l'hémisphère Sud, et elles ont traversé plus lentement le disque du Soleil que les taches visibles

aujourd'hui. Le Soleil ne reprit son apparence actuelle qu'au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, avec des taches réparties assez également entre les deux hémisphères.

## La dynamo solaire

Comment interpréter ces observations? Si le champ magnétique du Soleil prend naissance dans la zone convective, cette couche de 200 000 kilomètres d'épaisseur située juste sous la surface solaire (la rayon du Soleil est égal à 700 000 kilomètres soit plus de 100 fois le rayon terrestre). Dans la zone convective, la matière se déplace pour transférer l'énergie de l'intérieur du Soleil à la surface, où la convection se manifeste sous des formes visibles à l'œil nu. Sur le Soleil, on observe toujours un ensemble de granules dont le diamètre atteint 1 000 kilomètres mais dont la durée de vie n'est que de quelques minutes. On a également observé des « supergranules » de 20 000 à 50 000 kilomètres de diamètre et même des écoulements méridiens (de l'équateur vers les pôles) de plusieurs centaines de kilomètres.



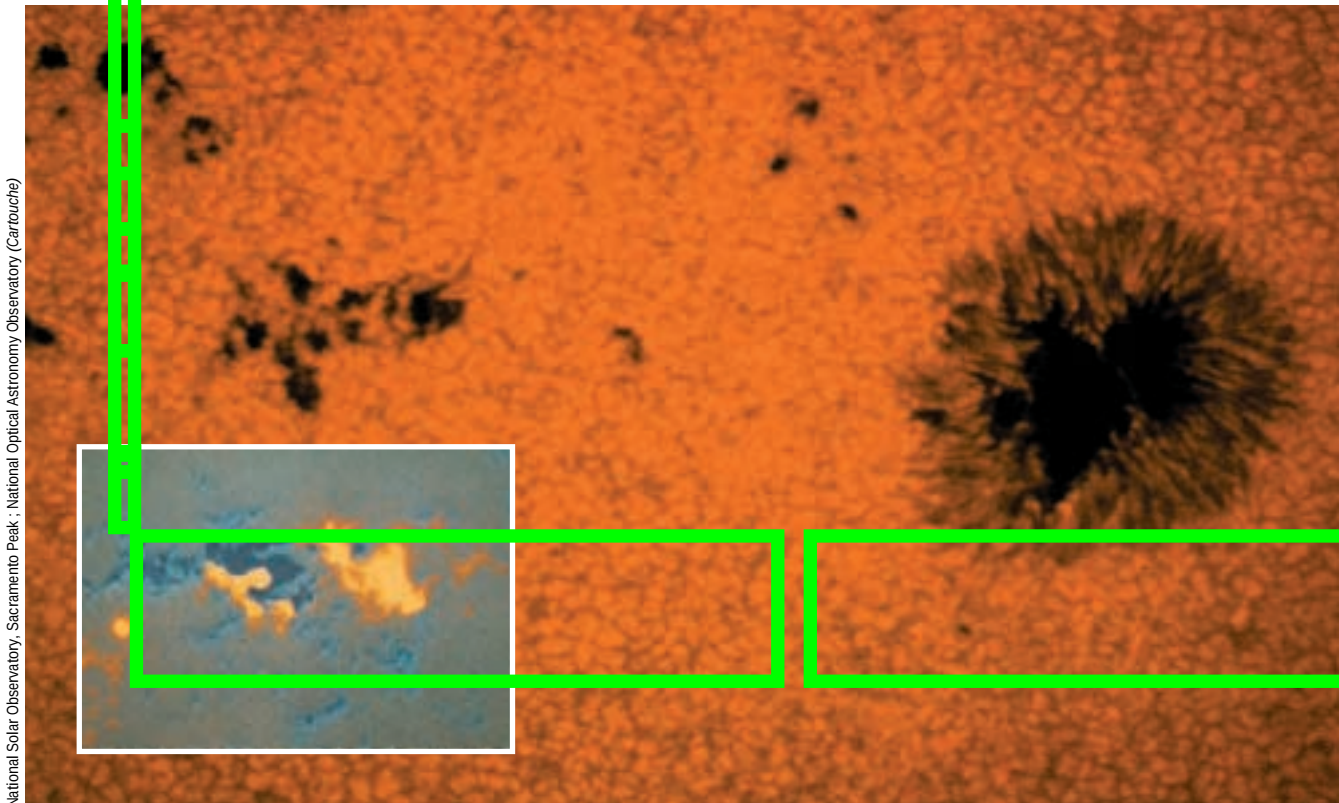
Dans l'atmosphère de la Terre, les forces qui créent les cyclones que l'on connaît bien depuis les observations des satellites MÉTÉOSAT (satellites européens de météorologie) : les mouvements cycloniques s'effectuent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud et dans le sens inverse, dans l'hémisphère Nord. Des mouvements cycloniques semblables à

ceux de l'atmosphère terrestre existent dans l'atmosphère du Soleil. On suppose qu'ils se prolongent sous la surface du Soleil (voir la figure 2).

Sous la zone convective, l'énergie émise dans le cœur du Soleil est transportée directement par les photons, c'est la zone radiative qui occupe 500 000 kilomètres et qui semble tourner comme un corps rigide. Plus profondément encore, le cœur du Soleil

est le siège des réactions nucléaires qui produisent l'énergie du Soleil.

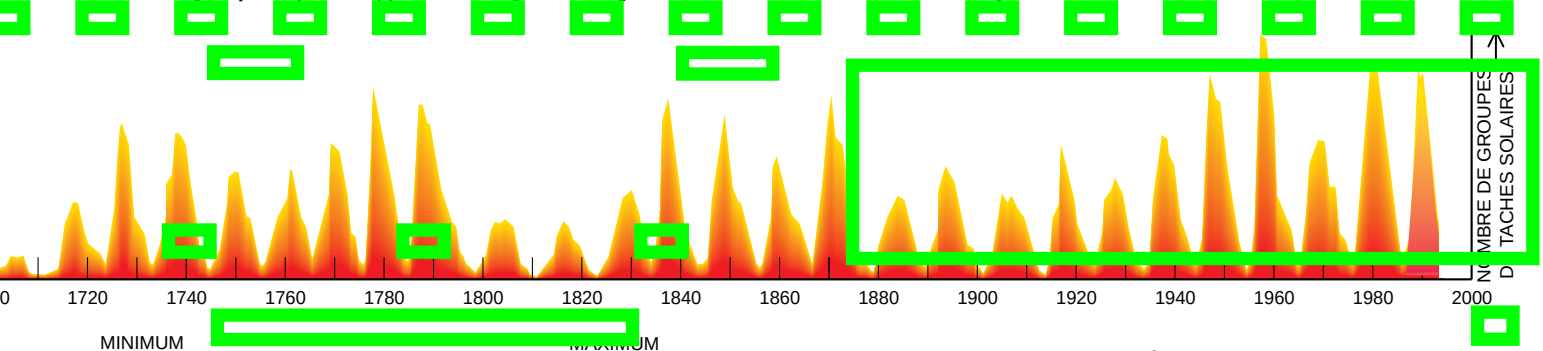
En 1955, à l'Université de Chicago, Eugene Parker expliqua pour la première fois comment le champ magnétique est créé à l'intérieur du Soleil. En raison de la température élevée qui y règne, les atomes d'hydrogène et d'hélium du Soleil ont perdu leurs électrons et forment un plasma, électriquement chargé. Or le déplacement des parti-



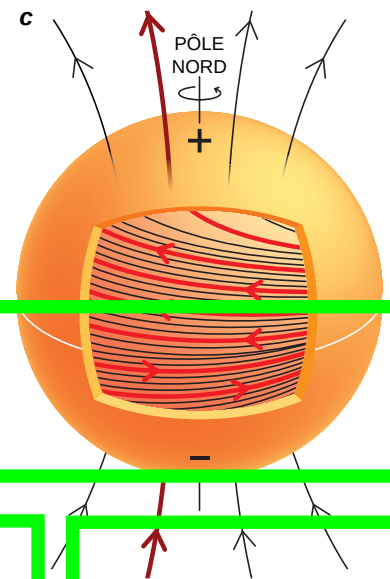
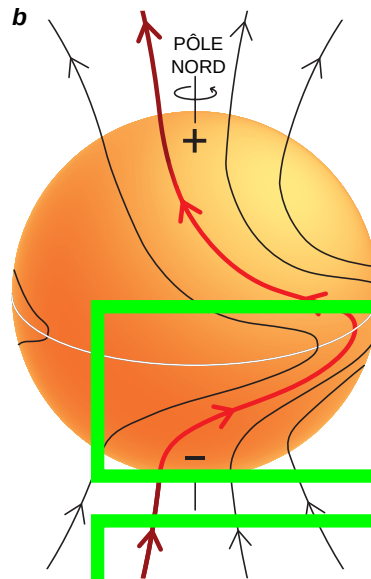
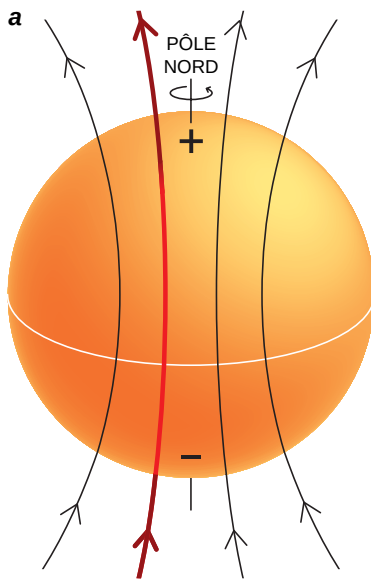
National Solar Observatory, Sacramento Peak; National Optical Astronomy Observatory (Cartouche)

**3. LES TACHES SOLAIRES** sont des régions relativement froides, qui se forment là où les champs magnétiques suppriment les mouvements de convection ascendants. Ailleurs sur la surface, la convection se manifeste sous la forme de cellules jointives, les granules. Autour des taches solaires, le champ magnétique oriente le mouvement du gaz, provoquant l'apparition de lignes analogues à celles

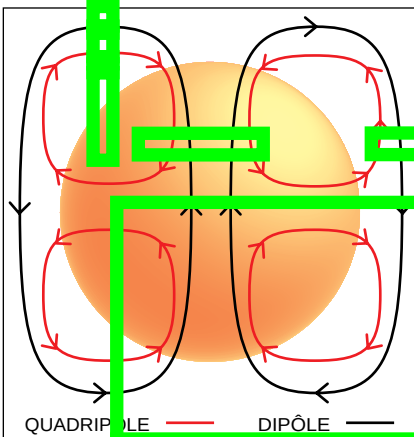
qui sont formées par de la limaille de fer posée près d'un aimant. Le magnétogramme (cartouche) montre les régions de forte concentration de champ magnétique (la couleur bleue et la couleur jaune indiquent les orientations opposées du champ) ; selon l'activité du Soleil, on observe une centaine à un millier de telles paires de taches au cours d'un cycle d'activité normal.



**4. LES CYCLES DE ONZE ANS** de l'activité solaire furent interrompus entre 1645 et 1710. Cette baisse du nombre de taches solaires, le minimum de Maunder, coïncida avec un refroidissement de l'Europe septentrionale, indiquant que le climat terrestre réagit aux fluctuations de l'activité solaire. L'oscillation régulière actuelle de l'activité du Soleil a été observée depuis 1919 à l'Observatoire de Paris. Les photographies correspondant à un cycle sont reproduites ici (à gauche). Ces photographies enregistrent la lumière violette émise par le calcium ionisé.



5. LA DYNAMO SOLAIRE engendre le champ magnétique du Soleil et provoque aussi son changement d'orientation tous les 11 ans. Supposons que le champ magnétique initial (a) ressemble à celui d'une tige aimantée dont le pôle positif (+) soit au pôle Nord géographique du Soleil. Les lignes de champ magnétique sont solidaires des gaz électriquement chargés qui constituent le Soleil. La rotation plus rapide à l'équateur, déforme ces lignes de champ (b) jusqu'à ce qu'elles soient serrées à la surface du Soleil (c). Les lignes de champ finissent par résister à cette déformation. Elles se détendent, s'appro-



Peter Samek, Slim Films

cules chargées crée, à son tour, un champ magnétique. C'est le principe même de la dynamo. Les champs magnétiques sont matérialisés par des lignes de champ magnétique dont la densité est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique, tandis que leur orientation révèle la direction du champ.

Le plasma solaire étant un excellent conducteur électrique, il se déplace avec le champ magnétique qu'il crée (les lignes de champ sont «gelées» dans le plasma). Ainsi, sous l'effet des mouvements convectifs, des champs magnétiques locaux sont créés, tordus, amplifiés ou annihilés, par les mouvements du plasma. Nous verrons comment.

Les mouvements du plasma convectif font et défont périodiquement les entrelacs magnétiques pour produire des champs magnétiques variables au cours du temps.

La dynamo solaire possède deux ingrédients essentiels : les cyclones convectifs, que nous avons déjà considérés, et la rotation non uniforme du

Soleil. Au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, un astronome amateur anglais Richard Carrington observa que les taches solaires naissant près de l'équateur tournent environ deux pour cent plus vite que celles apparaissant près des tropiques. Comme les taches solaires, manifestement liées au champ magnétique, sont solidaires du plasma, cela signifie que la surface solaire ne tourne pas uniformément, d'où le nom de rotation différentielle donné à ce phénomène. La période de rotation est d'environ 25 jours à l'équateur, 28 jours à 40 degrés de latitude, et plus longue encore près des pôles. On sait aujourd'hui que la rotation différentielle persiste dans toute la zone convective.

Supposons que la forme initiale du champ magnétique solaire soit celle d'un dipôle orienté Nord-Sud. À l'équateur, les lignes de champ du dipôle sont étirées dans la direction Est-Ouest, en raison de la rotation différentielle. Plus on s'approche des pôles, plus les lignes de champ sont comprimées.

Dans la zone convective, ces lignes de champ (ou boucles magnétiques) sont ensuite poussées à la surface du Soleil et donnent naissance aux régions actives. Les taches représentent les pieds des boucles magnétiques qui apparaissent par paires (voir la figure 5).

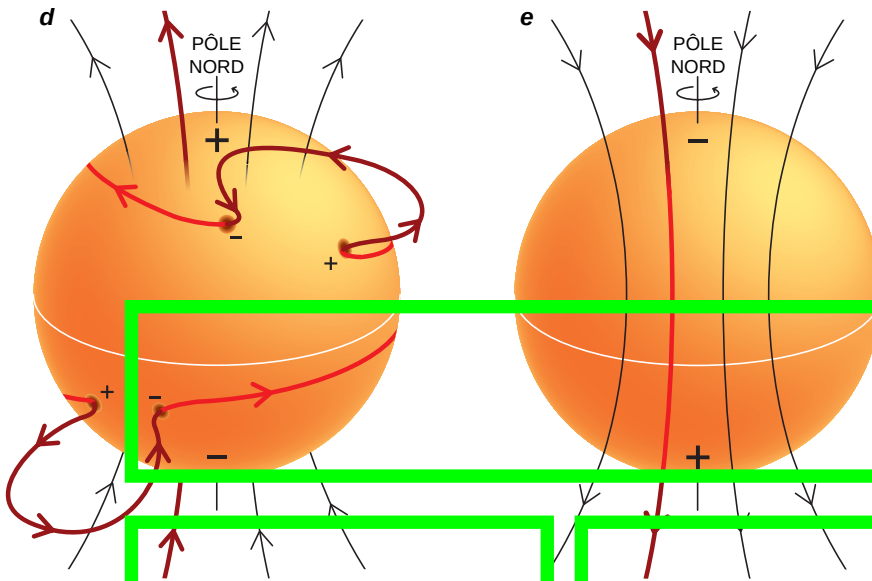
Les cyclones organisent les taches de sorte qu'une tache de queue, dans

l'hémisphère Nord par exemple, se trouve placée à une latitude légèrement supérieure à celle de la tache de tête correspondante. Les taches disparaissent rapidement (en moins de 30 jours), mais le champ magnétique des facules associées subsiste beaucoup plus longtemps (plusieurs mois, voire une année). La phase «active» du champ magnétique associé à la facule située à l'arrière de la région active migre lentement vers les pôles, renverse le champ magnétique général et le cycle recommence.

Cette description qualitative nécessite d'être confrontée aux résultats d'héliosismologie, la science des tremblements du Soleil : on vient de découvrir, d'après les observations des oscillations solaires, que la vitesse de rotation près de l'équateur diminue avec la profondeur. Des expériences d'héliosismologie comme GONG et SOHO (GONG est un réseau terrestre américain d'observation des oscillations solaires et SOHO est un satellite américain européen qui étudie le Soleil depuis 1995) fournissent

des informations précises sur les mouvements internes du Soleil et permettront d'affiner la théorie de la dynamo.

Que s'est-il passé durant le minimum de Maunder ? Pour expliquer cette accalmie, deux d'entre nous (E. Nesme-Ribes et D. Sokoloff) ont imaginé que le champ magnétique général pouvait avoir une composante



chent de la surface et en émergent, créant des paires de taches solaires (d). Ces taches meurent rapidement, mais le champ magnétique intense qui leur est associé demeure. La polarité de la tache de queue arrive en premier vers le pôle et inverse le champ global (e). En plus du champ dipolaire ci-dessus, le Soleil possède probablement un champ «quadripolaire» (en rouge sur le schéma intérieur de la page ci-contre) dont les oscillations, couplées à celles du champ dipolaire, provoquent le minimum de Maunder, au XVII<sup>e</sup> siècle.

quadripolaire comme si le champ magnétique général était produit par deux barreaux aimantés placés tête-bêche, une dissymétrie de l'activité solaire, au profit d'un hémisphère. Cette dissymétrie entre les deux hémisphères est observable aujourd'hui. En outre, au cours des quatre derniers siècles, des nombres différents de taches solaires sont apparus, dans les deux hémisphères, à certains cycles solaires, et le phénomène semble se

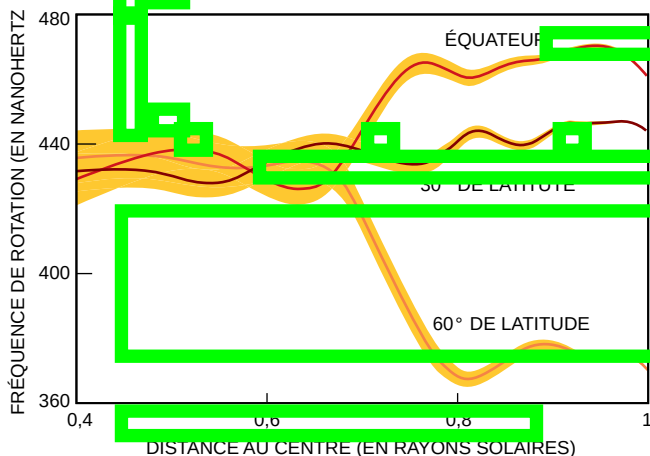
répéter chaque siècle, exactement comme si le dipôle oscillait avec un quadripôle plus faible. Si le dipôle et la quadripôle sont présents et de faible intensité, l'activité sera faible et localisée dans un seul hémisphère. C'est précisément ce qu'observèrent des astronomes au XVII<sup>e</sup> siècle pendant le minimum de Maunder.

Nous décrivons la relation complexe entre les champs dipolaires et quadripolaires par le «nombre dynamo»  $D$ . Ce nombre est le produit de l'hélicité, une mesure de la torsion des cyclones, par une mesure de la rotation différentielle du Soleil. Lorsque le nombre dynamo  $D$  est faible, le champ magnétique est rapidement dissipé. À partir d'un seuil, le dipôle et le quadripôle apparaissent, mais les champs créés sont stationnaires. Lorsque le nombre  $D$  augmente encore, la dynamo devient périodique, oscillant régulièrement.

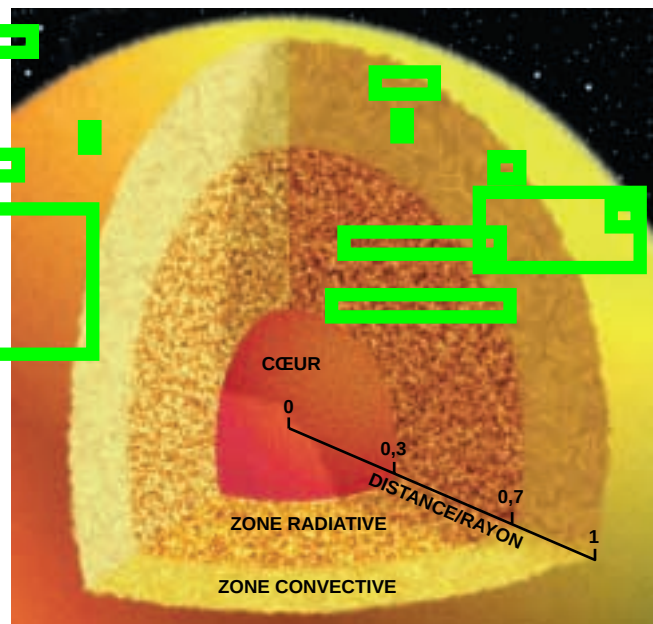
On trouve le Soleil aujourd'hui en faible champ quadripolaire oscillant en phase avec le champ dipolaire, conduisant à des cycles courts et intenses. Un champ quadripolaire plus fort, légèrement déphasé par rapport au dipôle, allonge et affaiblit le cycle des taches solaires. Bien que le cycle des taches solaires soit un chaos s'installe.

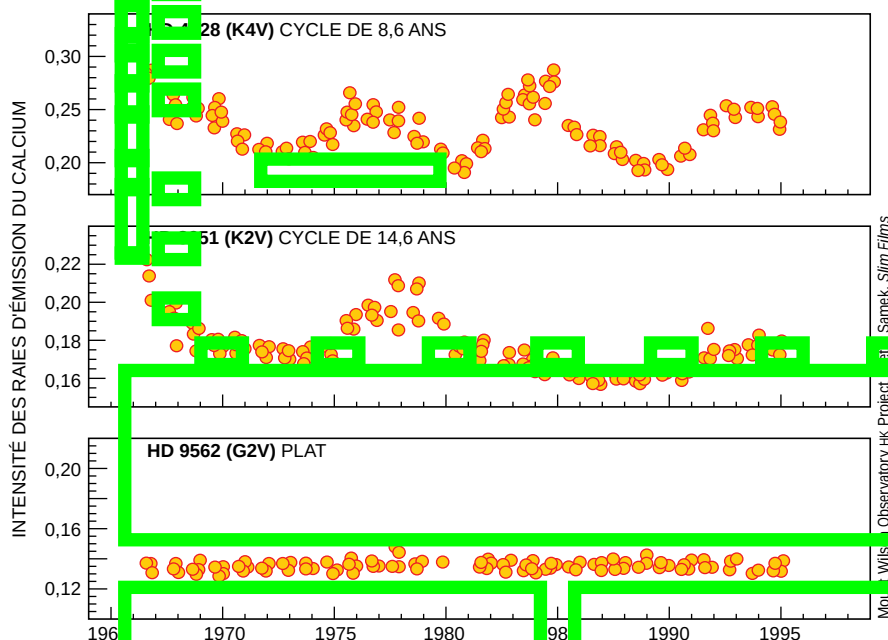
## Des étoiles dynamiques

Nous savons aujourd'hui que l'éclat du Soleil varie avec l'activité magnétique, au cours des cycles : les facules brillantes entourant les taches renforcent l'éclat du Soleil en période de forte



6. LA SURFACE SOLAIRE tourne plus rapidement à l'équateur que près des pôles. Cette rotation différentielle semble exister dans la couche convective. Le cœur du Soleil, où la fusion nucléaire produit l'énergie qui alimente la dynamo, ainsi que la zone radiative, tournent très probablement à vitesse angulaire constante, comme un corps solide.





**7. LES CYCLES STELLAIRES**, c'est-à-dire les variations d'activité magnétique dans les étoiles analogues à notre Soleil, sont révélés par les émissions du calcium dans la région violette du spectre lumineux. Les trois étoiles considérées ici présentent un comportement magnétique semblable à celui du Soleil : des cycles bien marqués (*en haut*), un cycle suivi d'un minimum de type Maunder (*au centre*), et un état totalement calme, comme le minimum de Maunder (*en bas*). L'étude de ces étoiles indique que la luminosité du Soleil peut varier bien plus qu'elle ne le fait actuellement.

activité (lorsque l'éclat du Soleil croît ou diminue, son énergie totale est sans doute redistribuée sous d'autres formes : cinétique, magnétique, thermique ou potentielle). Au cours des 16 dernières années d'observation par satellite, l'émission totale d'énergie par le Soleil a varié d'environ 0,1 pour cent au cours du cycle, entre la phase plus brillante, de forte activité magnétique, et la phase

Les observations par satellite sont si récentes que nous ignorons la variabilité de l'éclat du Soleil avant 1978. Cette information est néanmoins cruciale pour évaluer l'influence que le Soleil exerce sur la Terre. L'examen des cycles de «taches stellaires», sur d'autres étoiles que le Soleil, aide à comprendre ce lien.

L'étude de la surface des étoiles n'est pas facile, car elles sont si éloignées qu'elles nous apparaissent sous la forme de points. Si l'on ne voit pas les taches

(aux longueurs d'onde de 396,7 et de 393,4 nanomètres) est proportionnelle à l'intensité et à l'étendue des champs magnétiques. L'intensité de ces raies mesure donc le magnétisme de surface d'une étoile.

En 1966, à l'Observatoire du mont Wilson, Ossin Wilson entreprit de déterminer l'activité magnétique d'une centaine d'étoiles de la séquence principale,

l'hydrogène, comme le Soleil (plus tard, lorsque l'hydrogène s'épuise, l'étoile gonfle et forme une géante rouge). Les émissions violettes du calcium ont révélé que la plupart de ces étoiles sont magnétiquement actives. Les fluctuations varient en amplitude et en durée, principalement selon l'âge et la masse de l'étoile.

Toutes ces étoiles ont un nombre dynamo supérieur à la valeur critique nécessaire pour engendrer des champs magnétiques. Les étoiles plus jeunes

(moins de 100 millions d'années) ont une courte période de rotation (environ 10 à 15 jours); leur nombre dynamo élevé correspond à des fluctuations chaotiques d'activité magnétique sur des intervalles aussi courts que deux ans, sans cycles bien définis. Les fluctuations se répètent parfois, avec des périodes comprises entre 2 et 20 ans, et qui s'allongent avec l'âge de l'étoile.

En vieillissant, les étoiles ralentissent, puis que leur moment cinétique est dissipé par le vent stellaire; le nombre dynamo  $D$  diminue. Un cycle dynamo apparaît alors, avec une période d'environ six à sept ans et, parfois même, avec deux périodes indépendantes. Plus tard, lorsque la valeur de  $D$  a encore diminué, une des deux périodes devient prépondérante, s'allonge avec l'âge de l'étoile, jusqu'à 8 à 14 ans; des minimums de Maunder apparaissent parfois. Pour les étoiles très vieilles, dont la vitesse de rotation a encore diminué, nous prédisons que le champ magnétique est stationnaire. L'échantillon de O. Wilson contient quelques étoiles très vieilles, mais elles présentent encore des cycles indiquant qu'une dynamo stationnaire ne serait pas atteinte en dix milliards d'années, juste avant que l'étoile ne devienne une géante rouge.

Afin de mieux comprendre la dynamo solaire, S. Baliunas et ses collègues du mont Wilson et de l'Université du Tennessee n'ont conservé du vaste échantillon de O. Wilson que les étoiles semblables au Soleil par la masse et par l'âge. Ce groupe contient une trentaine d'étoiles, dont 30 ans. La plupart d'entre elles ont des cycles analogues à ceux du Soleil, en amplitude et en période. Environ un quart des données montre que les étoiles sont dans un état calme, qui ressemble au minimum de Maunder solaire. Aussi les étoiles de type solaire passeraient-elles le quart de leur vie dans un état calme.

Nous venons de découvrir une étoile, HD 3651, en transition entre la phase cyclique et le minimum de Maunder. HD 3651 a eu un comportement périodique pendant environ 12 ans, puis, lorsqu'elle a cessé d'être active, son activité magnétique de surface a continué. L'apparition de son minimum de Maunder fut étonnamment rapide. Ainsi les étoiles de type solaire observées pendant quelques décennies nous offrent-elles des «instantanés» de la variabilité solaire que nous obtenons à peine à l'observatoire du Soleil.

Nous pouvons aussi comparer l'éclat de ces étoiles de type solaire avec leur activité magnétique. En 1984, des observations photométriques de certaines des étoiles de O. Wilson commencèrent aux Observatoires Lowell et du pic Sacramento; depuis 1992, ces observations sont automatisées. Toutes

les étoiles sont plus brillantes à l'approche de leur activité magnétique maximale. Certaines étoiles ont une variation d'éclat aussi faible que le Soleil—0,1 pour cent sur le dernier cycle de 11 ans—alors que la variation d'éclat d'autres étoiles atteint 0,6 pour cent lors d'un cycle. Aujourd'hui le Soleil varierait donc moins que par le passé.

Grâce aux observations stellaires des dernières années, les astrophysiciens ont retracé l'évolution des étoiles de type solaire. Les étoiles jeunes ont une période de rotation relativement courte, de quelques jours, et une activité magnétique intense et irrégulière. Des variations d'éclat de quelques pour cent accompagnent ces variations d'activité magnétique. Les étoiles jeunes sont toutefois moins lumineuses lors du pic d'activité, sans doute parce que les taches sombres sont si grandes qu'elles diminuent l'éclat global, qui les empêche de briller. Quand les étoiles vieillissent, leur rotation ralentit et leur activité magnétique décroît. Des minimums de l'activité apparaissent pour ces étoiles «plus vieilles». Leur éclat est maximum lorsque leur nombre de taches est élevé. La luminosité peut alors varier de un pour cent au cours d'un cycle.

## Quelle influence sur la Terre?

Ces résultats indiquent un changement de luminosité d'au moins 0,4 pour cent entre la phase cyclique et le minimum de Maunder. Cette valeur correspond à une décroissance de l'émission nette d'énergie du Soleil de un watt par mètre carré au sommet de l'atmosphère terrestre. Des simulations effectuées au Laboratoire de météorologie dynamique, à Paris, montrent qu'une telle accalmie, s'elle dure plusieurs décennies, peut refroidir la température moyenne de la Terre de un ou deux degrés. Ainsi s'expliquerait le refroidissement observé durant le minimum de Maunder.

Toutefois, les gaz à effet de serre libérés par l'activité humaine au début de la Révolution industrielle, à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, peuvent réchauffer la Terre, en piégeant la chaleur qui autrement serait rayonnée vers l'espace. Ce réchauffement équivaut à l'apport de deux watts par mètre carré au sommet de l'atmosphère. Le Soleil n'a apparemment fourni qu'entre 0,5 et 1 watt par mètre carré à la Terre ces

derniers siècles. Si le chauffage direct est le seul moyen par lequel le Soleil fait varier le climat terrestre, le rôle des gaz à effet de serre devrait être dominant et avoir supplanté toute influence de l'activité solaire.

Le lien entre climat et taches solaires semble néanmoins persistant. Au cours des 100 dernières années, les températures sur la Terre ont varié parallèlement aux cycles solaires. En outre, les cernes de croissance des arbres révèlent que, au cours des 5 000 à 6 000 dernières années, six minima du magnétisme solaire sur sept coïncident avec des périodes de refroidissement terrestre. Et le cycle des taches solaires est corrélé à la circulation des vents stratosphériques, pour des raisons encore mystérieuses. Ainsi le Soleil influencerait aussi la Terre par des voies indirectes, mais puissantes.

Les variations des émissions ultraviolettes solaires, par exemple, peuvent modifier la quantité d'ozone dans la haute atmosphère, de même que sa dynamique. Des simulations récentes indiquent également que des vents dans la stratosphère inférieure peuvent répercuter des variations de l'éclat du Soleil jusqu'à la surface terrestre, et interagissent plus directement avec le système climatique. Ces sujets sont maintenant vigoureusement débattus. La découverte des moyens par lesquels le Soleil réchauffe la Terre fournit des informations cruciales concernant le rôle joué par l'humanité—et le rôle joué par le Soleil—dans le mécanisme de modification du climat.

Elisabeth LESME-RIBES est astronome à l'Observatoire de Paris. Sallie BALIUNAS est chercheur au Centre d'astrophysique de Cambridge (Massachusetts). Dmitry SOKOLOFF est professeur de mathématiques au Département de physique de l'Université de Moscou.

Jean-Claude PECKER, *Sous l'étoile Soleil*, Fayard, 1994.

Peter FOULKE, *Le Soleil : une étoile variable*, in *Pour la Science* n° 150, avril 1990.

Robert SADOURNY, *Le climat de la Terre*, Dominos Flammarion, 1994.

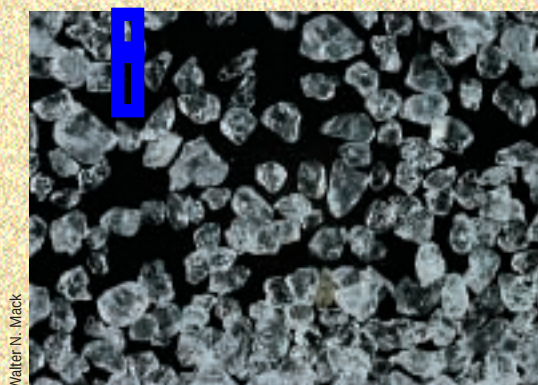
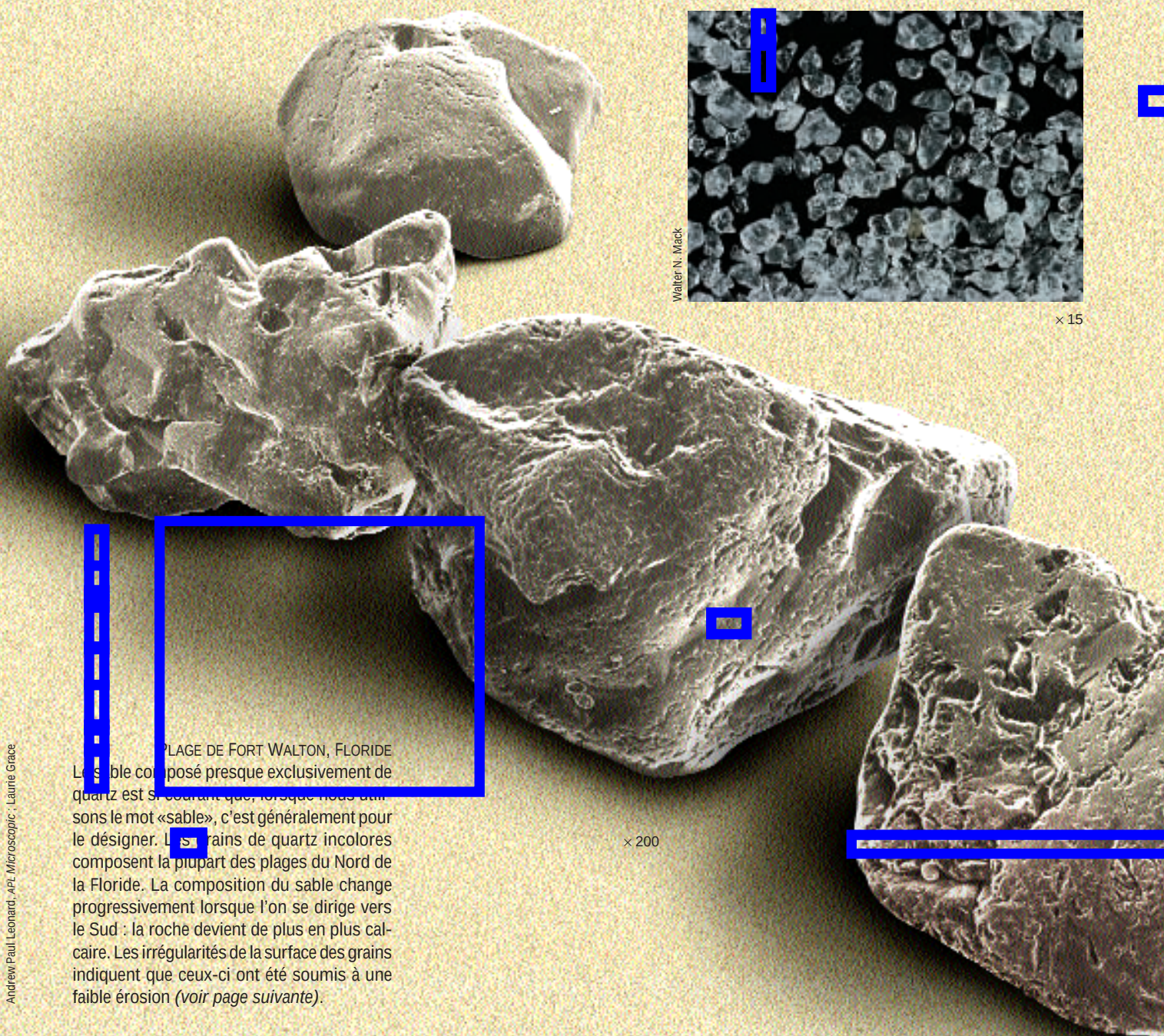
Kenneth J.H. PHILLIPS, *Guide to the Sun*, Cambridge University Press, 1992.

Helen WRIGHT, *Explorer of the Universe : A Biography of George Ellery*, American Institute of Physics Press, 1994.

# Les sables du monde

WALTER MACK • ELIZABETH LEISTIKOW

*Le sable est l'un des matériaux les plus banals à la surface de la Terre. C'est aussi l'un des plus variés.*



Walter N. Mack

× 15

× 200

PLAGE DE FORT WALTON, FLORIDE

Le sable composé presque exclusivement de quartz est si courant que, lorsque nous utilisons le mot «sable», c'est généralement pour le désigner. Les grains de quartz incolores composent la plupart des plages du Nord de la Floride. La composition du sable change progressivement lorsque l'on se dirige vers le Sud : la roche devient de plus en plus calcaire. Les irrégularités de la surface des grains indiquent que ceux-ci ont été soumis à une faible érosion (voir page suivante).

Aussi, lorsque vaincu il est enfin du sable, l'eau n'y pénètre pas exactement comme à la poussière. Gardant alors toutes les traces, sauf justement celles du littoral, il se borne à pouvoir effacer sur lui celles qu'y font les autres, il laisse à travers lui passer toute la mer, qui se perd en sa profondeur sans pouvoir en aucune façon faire avec lui de la boue.

### *Le galet, Le parti pris des choses* Francis PONGE

tagnes. Une partie du sable atteint le littoral, l'autre partie se dépose sur le trajet. Il faut

**L**e sable qui recouvre les plages est le produit d'une longue transformation géologique. En examinant les particules de sable sous un microscope, nous reconstituons des millions d'années d'histoire, des roches au sable, en passant par les rochers et les galets.

La plus grande partie du sable est formée de grains de roches continentales – principalement du quartz et du feldspath – sont fracturées en rochers et en galets par des contraintes mécaniques (mouvements des glaciers, cycles de gel et de dégel). Les attaques chimiques de la végétation et de l'humidité les fragmentent en grains. Les géologues nomment «sable» les fragments de roche dont le diamètre est compris entre 0,05 et 2 millimètres. Les particules les plus grosses sont les «graviers», les plus petites le «limon».

Le ruissellement entraîne les grains dans les cours d'eau, où ils roulent et rebondissent au fond, puis s'accumulent, dans une zone de tourbillons ou à l'abri d'un rocher. Ils y restent parfois plusieurs années avant de poursuivre leur voyage : charriés par la rivière, ils s'éloignent alors des mon-

tagne. Une rivière de taille moyenne pour déplacer ses dépôts sablonneux de 100 kilomètres. Pendant tout ce temps, le courant et les éléments chimiques contenus dans l'eau polissent les grains et les rendent brillants. Le vent, qui transporte aussi le sable. Partout où la végétation est clairsemée, il déplace les particules, qui sautent et tourbillonnent, s'élevant parfois jusqu'à 30 centimètres du sol. Ces grains déplacés par le vent ne sont pas polis ; leur surface devient opaque et rugueuse.

Les galets sont des fragments de roches arrachés aux montagnes. Certaines sont composées de particules de calcaire, issues de la mer ou de la côte. Là où l'eau est chaude et l'activité biologique importante, des restes d'invertébrés marins, plus ou moins fragmentés, se déposent aussi sur les plages. Les grains de «sable» de ces plages sont de loin les plus intéressants à observer au microscope : ce sont quelques-unes des œuvres d'art les plus colorées et les plus délicates fabriquées par la nature.



DÉSERT DU SAHARA,  
ENTRE LE CAIRE ET ALEXANDRIE  
Ce sable a été érodé par le vent. Les surfaces ternes et opaques des grains sont le produit de l'érosion que subissent ces derniers lorsque le vent les déplace. Les particules transportées par le vent sont plus rugueuses que celles transportées dans l'eau, qui les polit : elles frottent les unes sur les autres. Les chocs subis par les grains de sable sont aussi plus violents que dans l'eau. Autre différence manifeste : les tailles des grains de sable des déserts sont généralement plus variées. L'eau tamise les sédiments plus sélectivement que l'air, déposant les particules de taille proche les unes à côté des autres.



× 7

Walter N. Mack

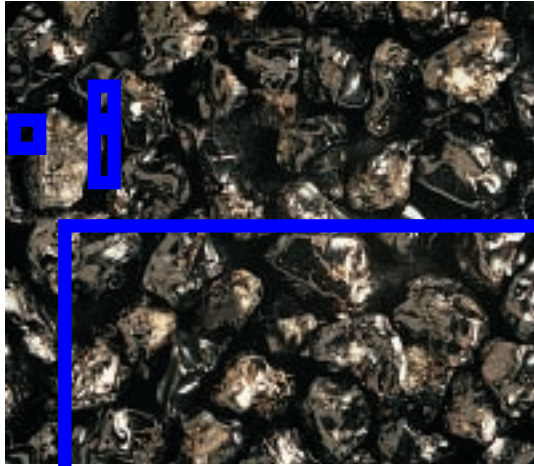


Walter N. Mack

× 5

#### INDIAN KEY, FLORIDE

Tous les coraux et tous les coquillages de cet échantillon ont perdu leur éclat : leur face extérieure est terne, piquée et couverte de calcaire. L'eau de mer chaude, la lumière directe du soleil et les pluies contribuent au transport vers la mer des carbonates contenus dans les végétaux morts et dans les squelettes d'animaux. L'image montre quatre coquilles de gastéropodes fusiformes et une coquille de gastéropode globulaire, ainsi que les restes d'au moins deux coquillages bivalves.



Walter N. Mack

× 6,5

#### PUNALUU, HAWAII

Le sable des plages noires d'Hawaï est composé d'obsidienne, verre volcanique formé par l'immersion soudaine de magma dans la mer. Le refroidissement a provoqué une vitrification ; puis l'eau et les vagues ont érodé des fragments de ce verre et les ont transformés en sable fin, de couleur noire.



Walter N. Mack

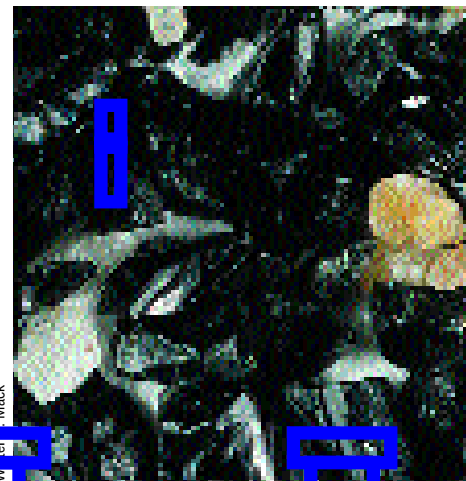
× 30

#### RIVE SUD DU LAC SUPERIEUR, MICHIGAN

Sur de nombreuses plages, des bandes noires marquent le niveau maximal des marées. Elles ne sont pas composées de débris organiques ni de sable gorgé de pétrole : elles contiennent des particules de magnétite. Plus lourdes que les grains qui les entourent, ces particules dures et magnétiques restent au bord de l'eau, tandis que les vagues poussent les fragments de quartz, plus légers, plus loin sur la plage (les grains rose et blanc sont du quartz ; les grains rouge foncé, probablement du grenat). Les navigateurs du XII<sup>e</sup> siècle plaçaient de la magnétite, qu'ils nommaient « pierre d'aimant », dans un roseau creux ; déposé à la surface d'un récipient plein d'eau, ce roseau s'alignait suivant l'axe Nord-Sud, formant une boussole rudimentaire.

#### LAC NORTHERN LIGHT, ONTARIO, CANADA

Toutes les plages noires ne sont pas composées d'obsidienne ni de magnétite. Les plages du lac Northern Light sont constituées d'un dépôt de fins cristaux d'hornblende (un simérite). Le lac et sa plage d'hornblende sont des vestiges laissés par le retrait de la calotte glaciaire Nord-américaine à la fin de la dernière glaciation.



Walter N. Mack

Échantillon grandeur nature



Dan Wagner

PLAGE  
DE FORT WALTON  
Floride



DÉSERT DU SAHARA  
Entre Le Caire et Alexandrie



INDIAN KEY  
Floride



PUNALUU  
Hawaï

Certaines des plages blanches les plus photogéniques et les plus étincelantes sont situées le long du golfe du Mexique et dans les îles des Bahamas. Leur sable est composé de particules de calcaire polies, aussi dures que de la porcelaine, appelées oolithes (du grec *oolos*, œuf). Comment ces grains en forme d'œuf se forment-ils? Les vagues roulent des particules d'argile ou de sable fin sur le fond ondulé. Dans l'eau peu profonde, saturée en carbonates de calcium et de magnésium, ces particules sont recouvertes de couches concentriques de carbonates.

Au microscope électronique à balayage, la coupe partielle d'un grain d'oolithe révèle les couches successives de carbonate de calcium et de magnésium, empilées autour du noyau de la particule (encore caché ici par des carbonates).

Walter N. Mack



× 87

× 23



× 18

Walter N. Mack

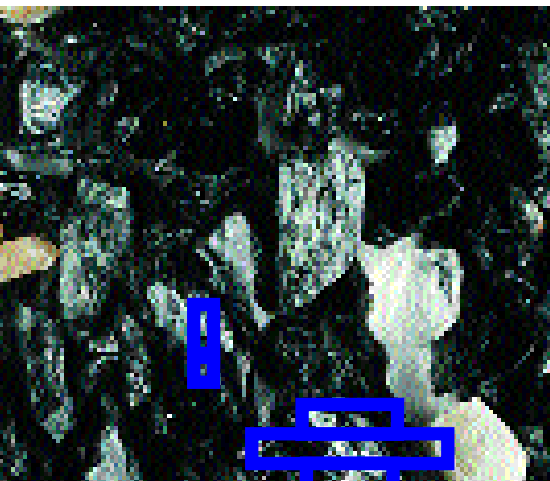
#### PLAGE DE SILVER SANDS, GRAND BAHAMA, BAHAMAS

Ce «sable» est constitué presque exclusivement de morceaux de corail provenant des récifs rochers. On observe en outre deux spicules en forme de cigare, la coupe transversale d'un ver marin, deux coquilles de gastéropodes et deux grands foraminifères rouges et ronds.



× 6

Walter N. Mack



× 23

#### SEAFORD, ANGLETERRE

La ville de Seaford est située au Sud de l'Angleterre, sur la Manche, où les courants sont forts et l'eau assez froide. Un échantillon de sable de la plage révèle une vie animale étonnamment nombreuse. Les grains bleu foncé et bruns sont des fragments de coquillages bivalves. Une coquille blanche de gastéropode (en bas à gauche) présente deux spires. Trois blocs de grains de sable sont vraiment agglomérés (à l'extrême gauche, au centre et à l'extrême droite). Les classiques grains de quartz sont dépolis; toutefois, l'un d'eux (à l'extrême droite) est anguleux et sa surface est lisse, comme s'il avait été ajouté récemment aux grains les plus usés par l'érosion.

Dan Wagner



RIVE SUD  
DU LAC SUPÉRIEUR  
Michigan

LAC NORTHERN LIGHT  
Ontario, Canada



HAWKBILL CAY  
Exuma, Bahamas



PLAGE DE SILVER SANDS  
Grand Bahama, Bahamas

## Le sable au musée

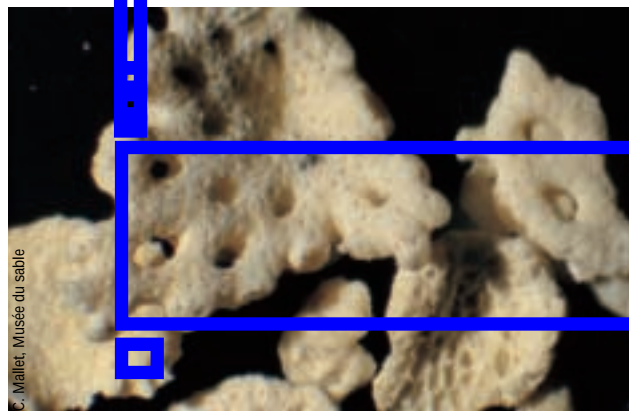
L'étude du sable fait appel à de nombreuses disciplines scientifiques. C'est ce qui a motivé, en 1987, la création d'un musée du sable, au collège Jean Monnet de Château-d'Olonne, en Vendée. Sa collection, rassemblée au départ par les élèves, puis par un réseau de plus en plus grand de bonnes volontés, est aujourd'hui, avec ses 4 300 échantillons, le plus important de France. Elle a été récemment transformée en musée public.

La détermination de la composition d'un échantillon de sable requiert des connaissances en minéralogie et en biologie (il contient des restes de coquillages). La géologie, la géographie, la physique, la chimie, la biologie, le transport sont nécessaires à la compréhension de son histoire. La compréhension des mouvements du sable, enfin, permet d'aborder la mécanique, en particulier la « physique des tas de sable ».

Le projet ne s'intéresse pas seulement au sable « en bouteille ». Nous suivons aussi, sur la plage voisine, les mécanismes de dépôt et d'enlèvement naturels du sable. Nous pouvons ainsi rassurer les industriels du tourisme : les dunes resteront encore longtemps !

Jean-Claude DANIEL, Musée du sable

× 16



FALUNS D'ANJOU, MAINE-ET-LOIRE

Les débris coralliens fossiles qui constituent le sable que l'on trouve dans la région d'Angers, à plus d'une centaine de kilomètres de la côte la plus proche, rappellent que ces terres ont été immergées et sous un climat chaud pendant le Miocène, il y a entre 5 et 25 millions d'années.

× 20



× 17

SAINT-TROPEZ, VAR

Au large de Saint-Tropez, les récifs abritent de nombreux animaux dont les coquilles sont rejetées sur la plage par les vagues. Un prédateur affamé a percé des trous dans une coquille conique de gastéropode. L'entrée d'autres coquilles est bouchée par des débris profondément enfoncés. La longue coquille courbée et tubulaire appartenait à un mollusque du genre *Caecum*. Cette créature est initialement un minuscule escargot enroulé, qui grandit ensuite dans une seule direction. Au-dessous de lui, on aperçoit la corne blanche, légèrement érodée, d'un *Skeneopsis planorbis*.



× 20

CAVALAIRE-SUR-MER, VAR

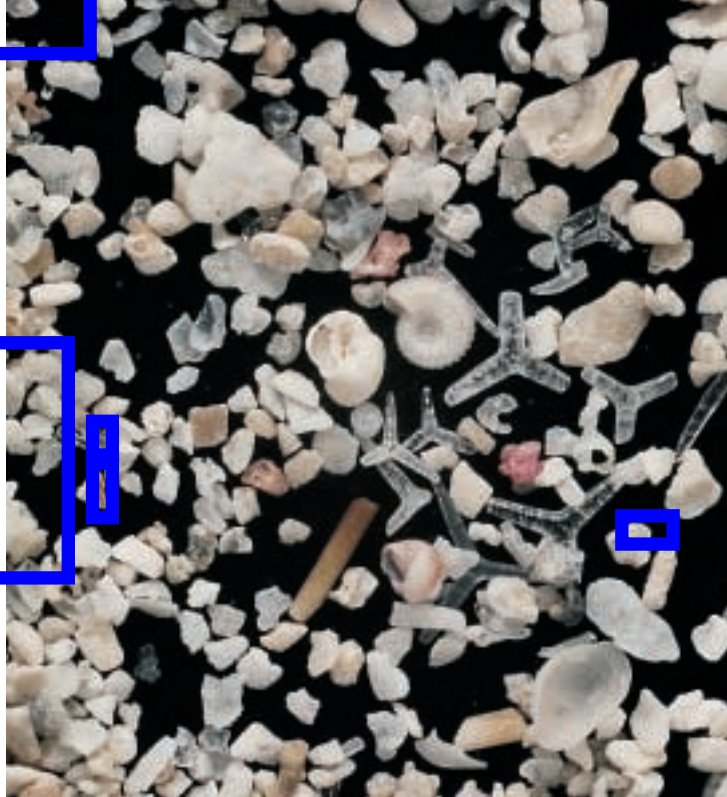
Les grenats et les disthènes (silicates d'aluminium noirs) de cet échantillon proviennent de roches métamorphiques, formées en profondeur lors du plissement des Alpes pendant l'ère tertiaire. L'érosion a mis ces roches à nu, puis les a réduites en grains.

PLAGE DU TANCHET, CHÂTEAU-D'OLONNE, VENDÉE

Le sable de la plage la plus proche du musée du sable est constitué en majorité de grains de quartz. On y observe aussi quelques débris de coquilles de moules. Les grains de quartz des plages vendéennes proviennent presque tous... du Massif central ! L'écoulement les a d'abord transportés jusque dans la Loire, par laquelle ils ont gagné l'Atlantique. Les courants marins côtiers les ont ensuite répartis sur le littoral.

# PLAGE DE SEVEN MILE, DONGARA, AUSTRALIE

Au large de la plage de Seven Mile, dans le canal de Geelvink, un plateau continental grouille de vie, avec des espèces typiques de l'océan Indien. On distingue de nombreux coraux et coquillages minuscules. Les éléments les plus originaux sont des «squelettes» d'éponges triaxiales, qui ressemblent à des glaçons, ainsi que des coquillages bivalves et des gastéropodes globulaires et discoïdes immatures.

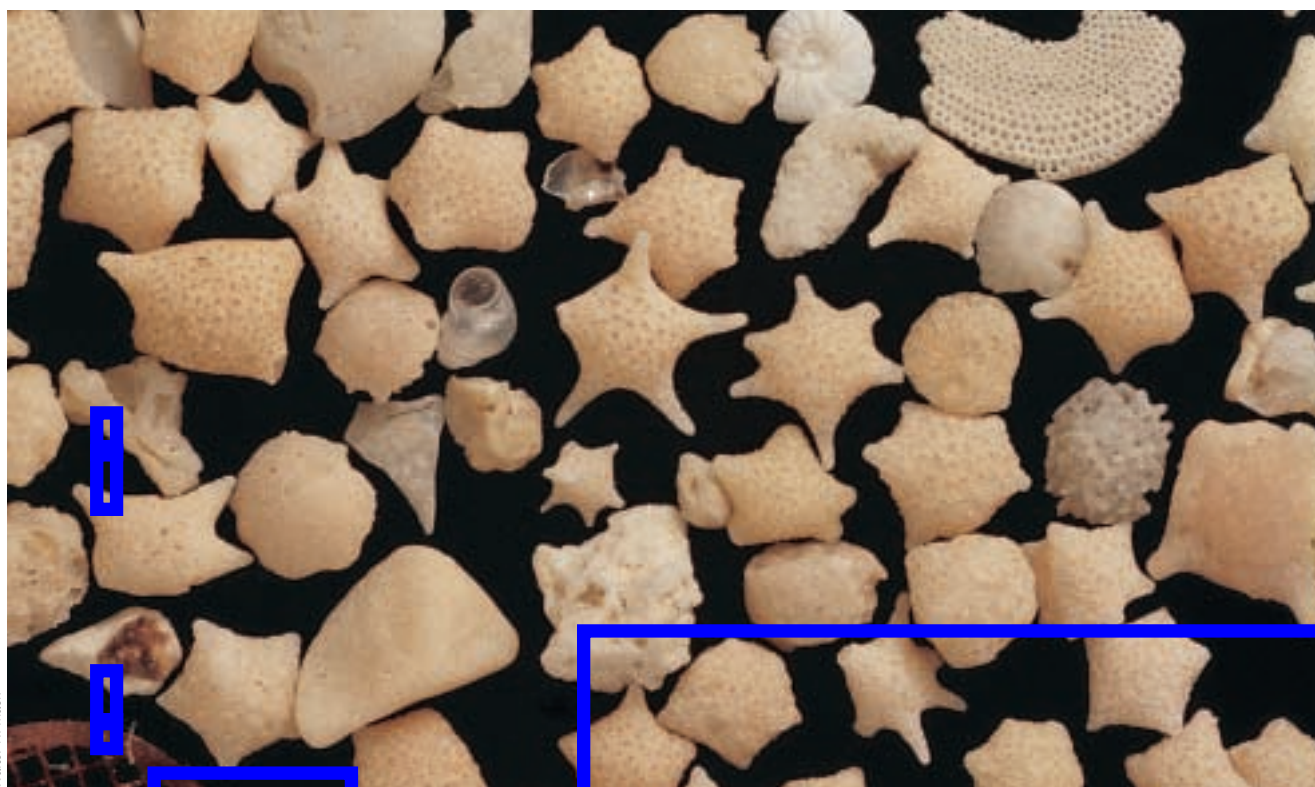


× 21,5

# TAKETOMI SHIMA, ÎLES DE RYUKYU, JAPON

Quelques îles méridionales du Japon ont un sable étoilé, formé de tests de foraminifères, les enveloppes complexes avec de nombreux petits compartiments que fabriquent ces animaux unicellulaires. On classe ces animaux d'après la forme de leur test. L'échantillon montré ici contient essentiellement *Baculogypsina sphaerulata*. On voit aussi une coquille ronde d'*Amphistegina madagascariensis* (en haut à droite) et une coquille de gastéropode en forme de spirale.

Walter N. Mack



× 15

Walter N. Mack

Dan Wagner



TAKETOMI SHIMA  
Îles de Ryuku, Japon

Walter MACK a été professeur à l'Université du Michigan. Il collectionne des sables du monde entier. Elizabeth LEISTIKOW travaille pour la Société FSH/Mayo Health Systems.

Raymond SIEVER, *Sand*, Scientific American Library, Freeman, 1988.

Sur Internet, un musée japonais du sable est à l'adresse : <http://www.yo.rim.or.jp/~smiwa/museum/e-museum.html>.

# La supraconduction à haute température

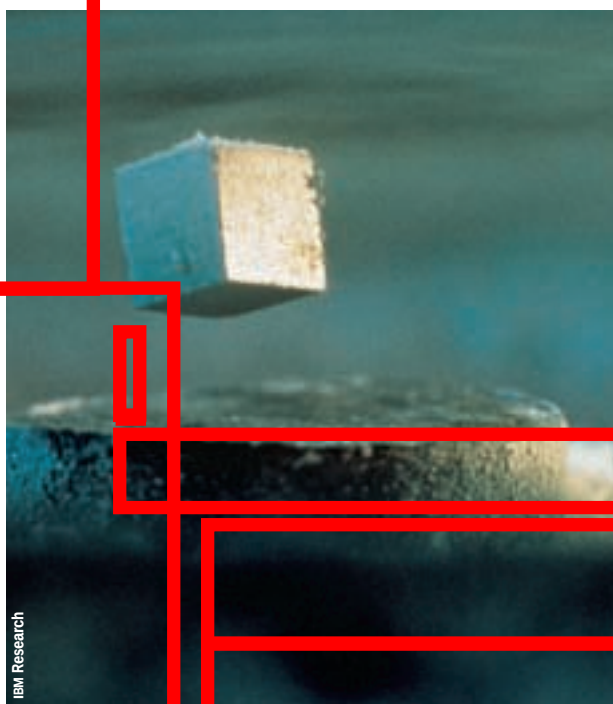
JOHN KIRTLEY • CHANG TSUEI

*Des expériences qui testent des phénomènes quantiques dans les matériaux conduisent vers une explication de la supraconduction à haute température.*

Le 18 mars 1987, dès 19 heures 30, la salle de réception de l'hôtel Hilton de New York est comble. Plus de 2 000 physiciens s'y pressent, entassés jusque dans les couloirs, pour assister à une séance de communications du congrès de la Société américaine de physique. L'atmosphère est programmée à la va-vite en raison du grand nombre de communications envoyées en dernière minute, se prolonge jusqu'à trois heures du matin, sans que l'attention des participants faiblisse. Ceux-ci parleront ensuite d'un «Woodstock de la physique».

Quelques mois avant, à la fin de 1986, Georg Berdnoz et Alexandre Müller, de la Société IBM à Zurich, ont fait sensation en annonçant qu'un oxyde de cuivre, de baryum et de lanthane devient supraconducteur (il perd toute résistance électrique) au-dessous de la température critique de 35 kelvins ( $-238^{\circ}\text{C}$ ). Quoique basse, cette température est supérieure de plus de dix degrés aux températures critiques les plus élevées des supraconducteurs classiques.

Depuis, d'ailleurs, rapidement, des équipes se sont passionnées pour le phénomène ; leurs explorations les ont conduites à des matériaux nouveaux dont les températures critiques sont supérieures à 90 kelvins ; des rumeurs de supraconduction à 130 ou à 240 kelvins se sont même répandues. Cette animation est compréhensible : la décou-



**1. LA LÉVITATION D'UN PETIT AIMANT au-dessus d'un supraconducteur à base d'yttrium préfigure peut-être des applications industrielles telles que la lévitation des trains.**

verte d'un matériau qui serait supraconducteur à la température ambiante (autour de 300 kelvins) bouleverserait l'électricité et l'électronique.

Dès le mois de mars 1987, des physiciens présentent donc leurs résultats sur les nouveaux supraconducteurs. Les utilisations potentielles de ces matériaux ne sont pas leur seule motivation. Certains d'entre eux craignent aussi que ces oxydes de cuivre, nommés cuprates, ne livrent leurs secrets à d'autres collègues ; le prix Nobel de physique a déjà été attribué quatre fois (un record pour un seul sujet) pour des

travaux sur la supraconduction.

La théorie de la supraconduction à haute température seraient certainement honorés de cette distinction (quelques mois plus tard, G. Berdnoz et A. Müller reçoivent effectivement le prix Nobel de physique pour leur découverte).

Aujourd'hui, presque dix ans ont passé, mais des milliers de physiciens essaient encore de comprendre pourquoi et comment les cuprates sont supraconducteurs à de si hautes températures. Ces questions restent ouvertes, mais les progrès ont été considérables. Des expériences récentes montrent des différences fondamentales entre les cuprates et les supraconducteurs classiques : leurs résultats contribuent à réduire le nombre de

théories possibles. Elles indiquent en particulier que l'une d'entre elles mérite l'attention des physiciens : la théorie de l'onde de spin, selon laquelle la supraconduction est liée à l'excitation collective des moments magnétiques.

L'idée que le magnétisme soit à l'origine du phénomène est incompatible avec la théorie classique de la supraconduction à basse température. Cette dernière apparaît lorsque les électrons s'apparient en «paires de Cooper» (d'après Leon Cooper, de l'Université de l'Illinois, qui a introduit ce concept). Contrairement aux

électrons isolés, les paires de Cooper n'interagissent pas avec le milieu perturbées par les défauts du milieu conducteur : leur mouvement ne rencontre aucune résistance. Dans un métal refroidi jusque dans l'état supraconducteur, au-dessous de la température dite critique, un courant électrique circule sans qu'aucune tension ne soit appliquée. Une fois en boucle, il persiste indéfiniment.

L'existence de paires d'électrons dans les supraconducteurs est un phénomène remarquable : deux particules chargées négativement devraient se repousser. Dans les années 1950, L. Cooper et ses collègues John Bardeen et Robert Schrieffer ont expliqué ce phénomène en élaborant la

théorie BCS (en l'honneur de leurs noms). Selon cette dernière, une partie de la charge négative de chaque électron est masquée par le déplacement des autres électrons : la force de répulsion entre les électrons d'une paire de Cooper est alors réduite.

### Un échange de phonons

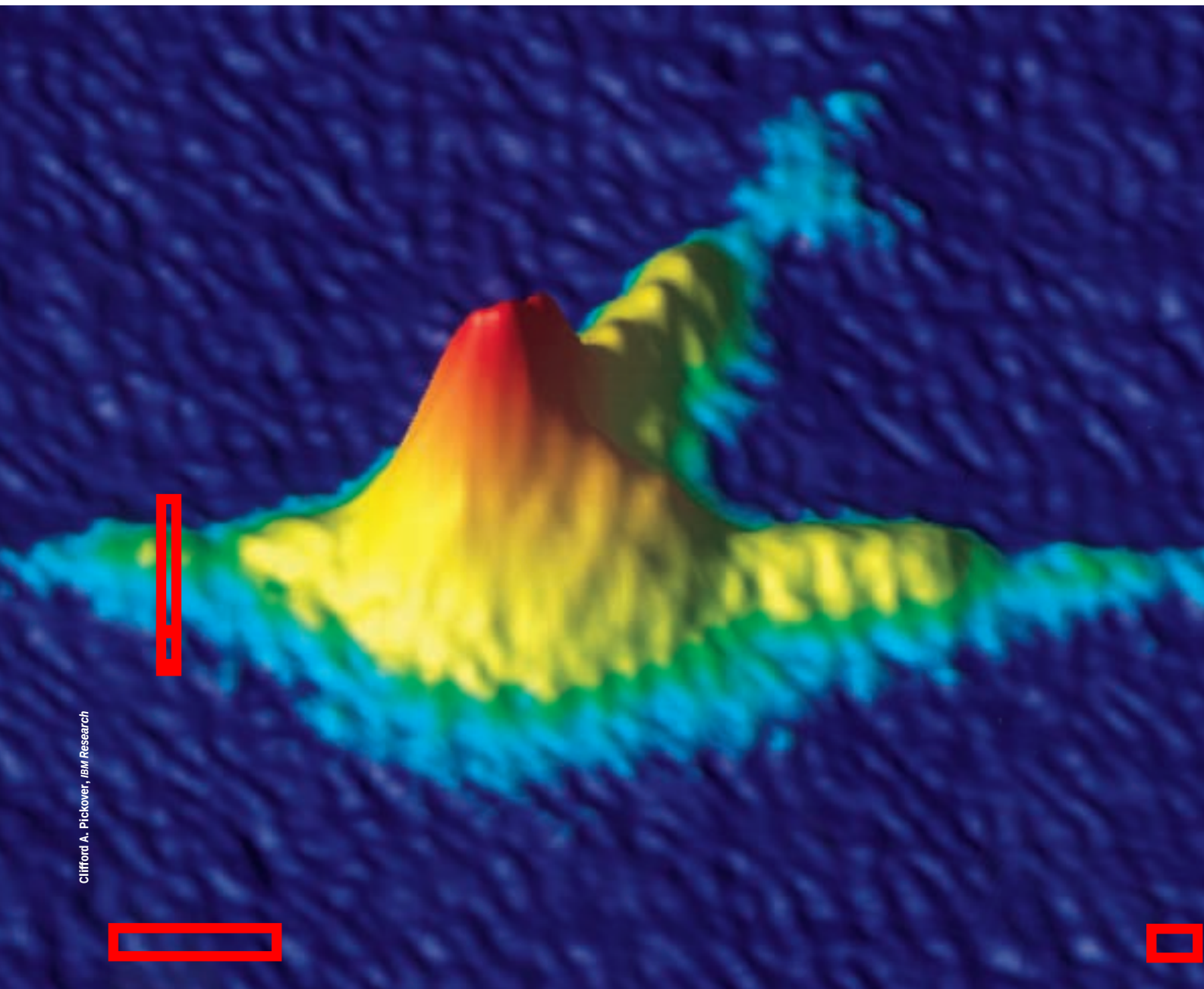
D'autre part, les ions positifs qui constituent le métal (les atomes neutres, deviennent des ions positifs après avoir libéré les électrons de conduction), servent d'intermédiaires dans l'appariement. Lorsqu'il se déplace, un électron modifie légèrement la position des ions situés sur son parcours. Ces distorsions, nommées phonons, créent de petites

trous dans la paire. Ce phénomène ressemble à ce qui se produit lorsque l'on pose deux boules de bowling sur un lit : la déformation du matelas créée par la première boule favorise le rapprochement de la seconde. L'analogie est toutefois partielle : les électrons, à la différence des boules de bowling, se déplacent à des vitesses proches de la

D'autres physiciens expliquent que les électrons restent appariés en échangeant des phonons, comme deux joueurs de rugby progressent sur le terrain en se passant le ballon pour éviter les plaquages. Le mécanisme des phonons, une fois inclus dans la théorie BCS, explique parfaitement la supraconduction des matériaux classiques.

**2. EN MESURANT LE CHAMP MAGNÉTIQUE** dans un contour supraconducteur posé à la jonction de trois cristaux, on étudie le comportement des charges électriques dans le matériau. De telles

expériences montrent que le mécanisme de la supraconduction à haute température serait complètement différent de celui de la supraconduction classique.



J. Bardien a proposé une autre analogie pour les paires de Cooper : ces dernières sont comme de petits groupes de personnes accrochées les unes aux autres dans une foule dense. Une telle foule en mouvement est difficile à arrêter car, pour arrêter une personne, il faut briser l'élan de tout un groupe. Le flot d'individus s'écoule autour des obstacles sans se briser.

Toutefois plusieurs équipes pensent que l'échange de phonons entre les électrons dans les cuprates n'explique pas l'appariement dans les oxydes de cuivre à haute température : dans les supraconducteurs de température critique élevée, les interactions des électrons et des phonons devraient être si fortes qu'elles déformeraient la structure du matériau et lui feraient perdre sa supraconductivité, voire sa conductivité.

En outre, la théorie BCS suppose que l'énergie des électrons est supérieure à celle des phonons. Comme les électrons se déplacent plus vite que les phonons, le premier électron est loin de l'ion qu'il a déplacé lorsque le second électron arrive. La distance ainsi introduite entre les électrons réduit leur répulsion mutuelle. Dans les cuprates, au contraire, électrons et phonons auraient des vitesses voisines, ce qui réduirait la distance entre les électrons.

Jusqu'ici, nous avons considéré que la conduction électrique était assurée par les électrons. Dans la plupart des cuprates, ce sont en fait les trous, les zones chargées positivement, qui sont par le départ des électrons, qui créent un courant en se déplaçant. Des trous apparaissent lorsqu'on ajoute au matériau des atomes supplémentaires nommés dopants, qui captent des électrons. Dans la suite de cet article, nous désignerons sous le nom de « porteurs » toutes les particules qui forment les paires de Cooper.

Dans les cuprates (où l'on observe effectivement la formation de paires de Cooper), quel « ballon de rugby » les porteurs d'une paire de Cooper échan-

gent-ils ? Les ions et les autres porteurs de charge au milieu desquels ils évoluent ? D'autres théories considèrent que la liaison de deux particules dont l'une transporterait la charge électrique et l'autre le moment magnétique : ces deux particules, dissociées dans les cuprates, se trouveraient entre les couches du matériau. Les couches de plusieurs couches isolent la principale couche conductrice (celle de l'oxyde de cuivre).

Aucune expérience ni aucun résultat n'ont été admis par l'ensemble des physiciens comme des preuves irréfutables en faveur d'un mécanisme ou d'un autre. On comprend toutefois mieux la symétrie de l'état supracon-

ducteur, et l'on espère que ce progrès permettra de tester les théories concurrentes.

## La symétrie des paires

La symétrie d'une paire de Cooper est celle de la « fonction d'onde », avec laquelle on décrit mathématiquement l'état supraconducteur. La fonction d'onde caractérise notamment les mouvements relatifs des deux porteurs d'une paire de Cooper. Elle indique la probabilité de présence d'un porteur en fonction de sa position par rapport à l'autre.

Dans les supraconducteurs classiques, la fonction d'onde des paires de Cooper est parfaitement symétrique : elle est sphérique. En d'autres termes, dit, la probabilité de trouver l'un des porteurs de la paire de Cooper décroît de la même façon exponentielle dans toutes les directions à mesure que l'on s'éloigne de l'autre porteur. La représentation graphique de la fonction d'onde, centrée sur l'un des porteurs de la paire, est une sphère (voir la figure 3).

Les fonctions d'onde de symétrie *d* sont moins symétriques que les fonctions d'onde sphériques : elles forment graphiquement quatre lobes dans un plan, comme les feuilles d'un trèfle à quatre feuilles. Chaque lobe représente les positions possibles de l'un des deux porteurs d'une paire de Cooper par rapport à l'autre.

Comment les physiciens étudient-ils la formation des paires de Cooper à l'aide de la symétrie de l'état supraconducteur ? Les différents mécanismes proposés sont classés en deux catégories.

La première catégorie concerne la symétrie. Les théoriciens sont divisés en deux camps principaux. Les premiers modifient la théorie BCS et proposent des mécanismes pour lesquels la symétrie des états supraconducteurs est sphérique. Les seconds proposent des mécanismes complètement nouveaux, qui conduisent à des états de symétrie *d*.

Dans la deuxième catégorie, la théorie est celle de l'onde de spin,

principalement soutenue par Douglas Scalapino, de l'Université de Santa Barbara, et David Pines, de l'Université de l'Illinois. Le mécanisme en est le suivant : une charge en mouvement modifie l'orientation des spins (les moments cinétiques) des ions constitutifs du cristal supraconducteur ; elle laisse ainsi



**3. LA SYMÉTRIE SPHÉRIQUE et la symétrie *d*** Les deux types de symétrie possibles de la fonction d'onde d'une paire de porteurs de charge qui transporte le courant dans un supraconducteur. La fonction d'onde représente la probabilité de présence d'un porteur par rapport à l'autre. Dans la symétrie sphérique, l'un des porteurs de charge d'une paire de Cooper est dans une sphère centrée sur son partenaire. Pour une fonction d'onde de symétrie *d*, le porteur est dans l'un des quatre lobes centrés sur l'autre porteur.

dans son sillage une perturbation magnétique, l'onde de spin. Cette perturbation attire le second porteur de la paire de Cooper. Comme elle a une courte durée de vie, l'onde de spin est aussi nommée fluctuation de spin.

La connaissance de la symétrie de l'état supraconducteur permettrait pas, seule, de trancher entre toutes les théories (contrairement à l'espoir de nombreux physiciens), différents mécanismes conduisent à la même symétrie. En revanche, elle en éliminerait d'autres. La théorie d'Anderson devrait être abandonnée si l'on démontrait que l'état supraconducteur n'est pas de symétrie  $d$ .

### Des directions privilégiées

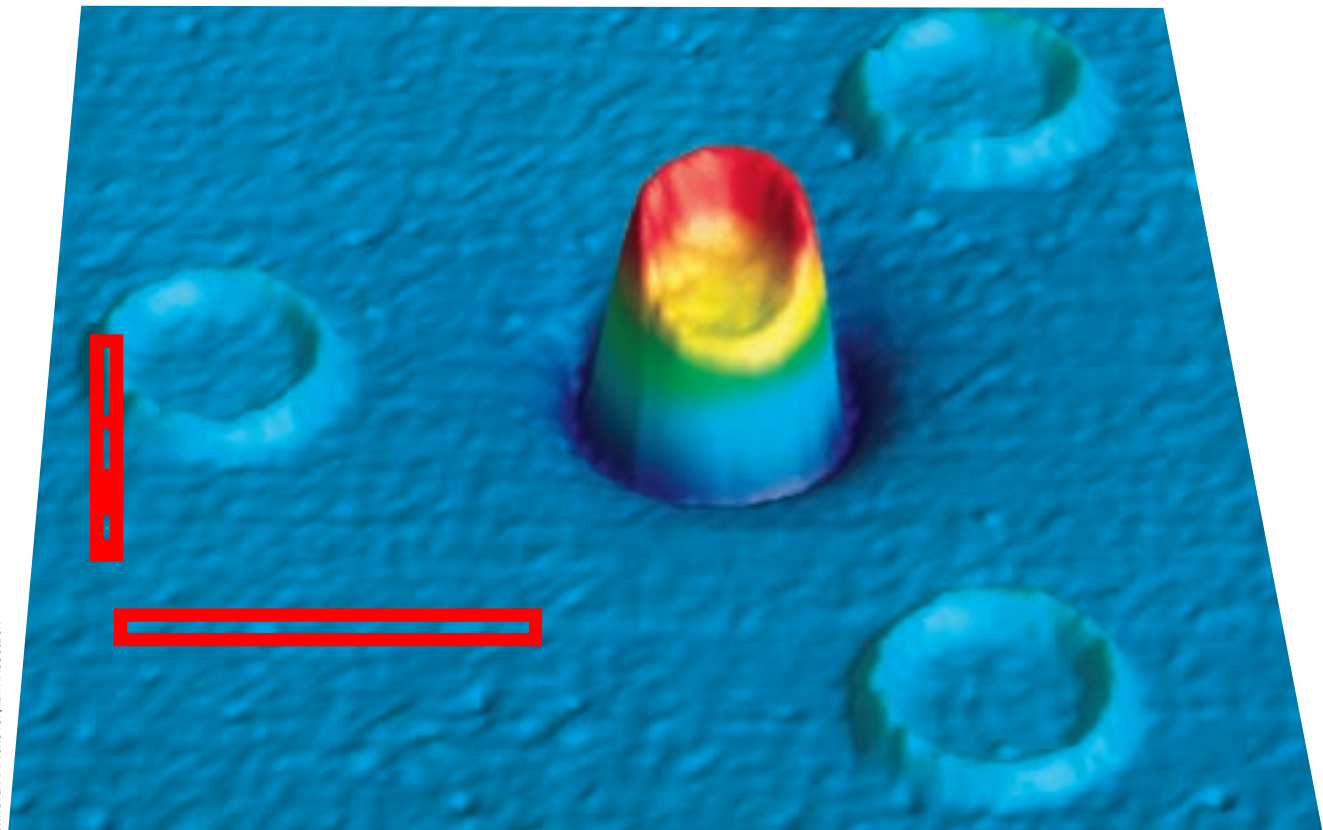
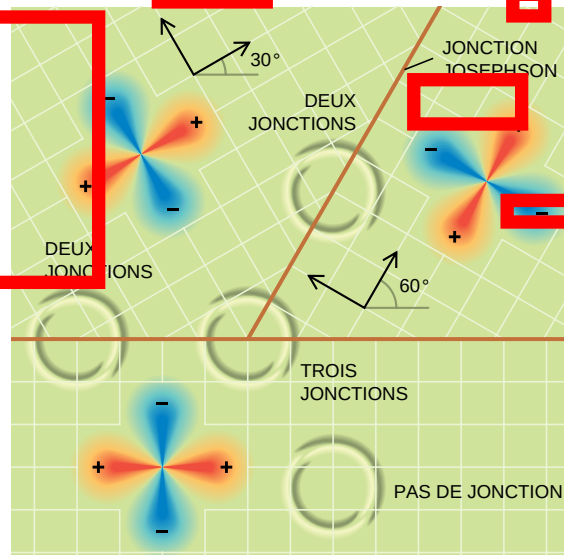
Si la fonction d'onde est de symétrie  $d$ , les paires de Cooper sont plus faiblement liées dans certaines directions

du réseau cristallin du supraconducteur. Les porteurs isolés se déplacent alors en suivant ces directions. Les expérimentateurs ont recherché ces porteurs isolés de plusieurs façons : étude de la pénétration d'un champ magnétique dans le supraconducteur, mesure de la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température de ce dernier. Ces expériences qui indiquent généralement la présence de porteurs isolés à des températures bien inférieures à la température de transition (les porteurs devraient être appariés),

il ont toutefois pas convaincu les physiciens, car les mesures indirectes sont souvent compatibles avec d'autres types de symétrie, par exemple des symétries sphériques modifiées.

**4. UNE EXPÉRIENCE SUR UN ANNEAU SUPRACONDUCTEUR** déposé sur trois cristaux adjacents indique que la fonction d'onde des porteurs de charge des oxydes de cuivre (qui décrit leur position relative) serait de symétrie  $d$  (à droite). Trois cristaux de supraconducteur à base d'yttrium sont tournés les uns par rapport aux autres et séparés par des barrières isolantes. On y grave quatre anneaux, de sorte que l'un d'entre eux traverse trois jonctions et les autres deux ou zéro. Si les fonctions d'onde des porteurs de charge avaient une symétrie  $d$ , on devrait observer un demi-quantum de flux magnétique dans l'anneau aux trois jonctions et rien dans ceux ayant un nombre pair de jonctions. La détection du demi-quantum de flux (ci-dessous) conforte l'hypothèse de la symétrie  $d$ .

D'autres équipes ont alors cherché comment la force de cohésion des paires de Cooper varie selon les directions. Plusieurs sortes d'expériences ont été menées : arrachement de porteurs arrachés du matériau par un rayonnement ultraviolet de fréquence élevée, mesure du décalage en fréquence de la lumière lors de sa traversée du matériau, étude du passage des électrons, par effet tunnel, à travers de minces couches isolantes, de divers matériaux vers des cuprates à différentes compositions.



Ces expériences ont montré une variation angulaire de la force de couplage, mais elles restaient insuffisantes, car le signe de la fonction d'onde des états de symétrie  $d$  n'est pas connu. On passe d'un lobe à l'autre, en tournant dans leur plan. Les deux lobes situés sur le même côté de l'axe de symétrie, opposé à celui des deux lobes situés sur l'axe perpendiculaire. Comme les expériences réalisées ne détectaient pas ces différences de signe, elles ne prouvaient pas irréfutablement que la symétrie était de type  $d$ .

Comment déterminer le signe des lobes? Nous avons utilisé la capacité d'un anneau supraconducteur à pié-

ger les champs magnétiques dans le disque qui l'inscrit. Dans le cas des supraconducteurs classiques, caractérisés par les fonctions d'onde à symétrie  $s$ , la densité du champ multiplié par l'aire du disque inscrit est quantifiée. Cette constante est nommée quantum de flux magnétique (un quantum de flux est égal au rapport entre la constante de Planck et deux fois la charge de l'électron). Les anneaux contiennent un nombre entier de quanta de flux.

Selon des calculs d'énergie et de flux magnétique, des anneaux supraconducteurs où la symétrie de paires

de Cooper serait de type  $d$  peuvent, dans certaines conditions, piéger des nombres demi-entiers de quanta de flux. La présence ou l'absence de demi-quantum de flux permet de déterminer si les lobes changent de signe.

Dieter Wohlleben, à Cologne, est le premier à avoir réalisé la quantification particulière de nouveaux supraconducteurs. Puis notre équipe a obtenu les premières images de ces demi-quanta de flux par observation directe. Pour cela, nous avons fabriqué des anneaux de supraconducteur par des barrières isolantes assez minces pour que les paires de Cooper les traversent par effet tunnel. Ce phénomène est

## Une expérience ne fait pas un modèle

Il faut souligner l'astuce et l'élégance des expériences de John Kirtley et de Chang Tsuei, effectuées sur plusieurs supraconducteurs (on compte aujourd'hui avant de trois types de structures ; on compte aujourd'hui environ 20 structures cristallines et 50 composés différents). Ces expériences sondent à la fois le signe et l'orientation des lobes de la fonction d'onde de l'état supraconducteur : leurs résultats prouveraient que la symétrie est  $d$  et que la fonction d'onde est représentée par un « trèfle à quatre feuilles » dont les lobes sont orientés selon les axes cristallographiques du composé. Quelle est la force démonstrative de ces observations?

Une première objection est d'ordre expérimental. Les résultats d'expériences réalisées par d'autres équipes sur le même composé à base d'yttrium sont aussi en faveur d'une symétrie  $d$ . Toutefois les expériences du groupe de Robert Dynes, à San Diego, confirmées par Jérôme Leclercq, à Orsay, montrent qu'un courant Josephson passe à travers une jonction Josephson classique, le plomb, décrit par une fonction d'onde de symétrie sphérique. Comme la mécanique quantique interdit formellement le passage de paires de Cooper d'un état à symétrie sphérique vers un état à symétrie  $d$ , la fonction d'onde de l'état supraconducteur dans ce cuprate contiendrait donc une composante sphérique non négligeable. C'est d'ailleurs ce qu'ont montré théoriquement Marie-Thérèse Béal-Monod, d'Orsay, et Kasumi Maki, de Los Angeles.

Toujours sur le plan expérimental, les propriétés d'une jonction Josephson sont très sensibles à la façon dont on sépare les deux cristaux supraconducteurs. J. Kirtley et C. Tsuei considèrent que, dans leur expérience, toutes les jonctions ont un isolant et que le réseau cristallin n'est pas déformé localement. Ils n'ont toutefois pas de certitude expérimentale de ces faits. D'autres expériences, qu'ils qualifient d'insuffisantes parce qu'elles ne permettent pas de déterminer le signe de la fonction d'onde, sont plus fiables. Ainsi celles qui mesurent la pénétration du champ électromagnétique (comme nous le faisons à

l'École normale supérieure) n'utilisent pas de jonctions tunnel et sont beaucoup moins sensibles aux effets de surface. Dans le composé à l'yttrium, les expériences du groupe de Vancouver, au Canada, confirmées par les nôtres, sont d'ailleurs en faveur d'une symétrie  $d$ .

Une autre objection est d'ordre théorique. Tous les cuprates supraconducteurs possèdent des plans formés d'atomes de cuivre et d'oxygène : un, deux ou trois plans rapprochés, selon les structures. Deux groupes de plans sont séparés par des blocs « réservoirs », qui alimentent les plans en porteurs de charge. Ces porteurs sont majoritairement des trous, mais dans un composé à base de monodrome, de cérium et de cuivre, les porteurs sont des électrons. Ce composé, qui n'a qu'un plan cuivre-oxygène par maille élémentaire (semblable en cela au matériau découvert par G. Berndnorz et A. Müller (baryum, lanthane, cuivre) ou au système au thallium, baryum, cuivre examiné par J. Kirtley et C. Tsuei), semble présenter une symétrie  $s$ . Si les trous et les électrons sont bien équivalents, comme les physiciens l'admettent communément, alors la présence d'un seul plan cuivre-oxygène par maille élémentaire ne suffit pas pour définir la nature de la supraconduction. Cela affaiblirait la théorie de l'onde  $s$  en tant que théorie microscopique générale de la supraconduction à haute température critique.

Rappelons enfin que la symétrie  $d$  n'est pas la signature incontestable d'un appariement par les fluctuations magnétiques. En particulier, celui de Roland Combescot, à l'École normale supérieure, a montré que des résultats expérimentaux apparemment incompatibles. Il est donc exact, ainsi que le rappellent les auteurs à la fin de leur article, qu'il faut encore des études sur les nombreux cuprates. Nous ajouterons aussi la nécessité de croiser les différentes approches expérimentales avant d'infirmes des hypothèses ou de conforter un mécanisme.

Nicole BONTEMPS, École normale supérieure, Laboratoire de physique de la matière condensée

connu sous le nom d'effet Josephson, d'après Brian Josephson, qui a prévu son existence en 1962.

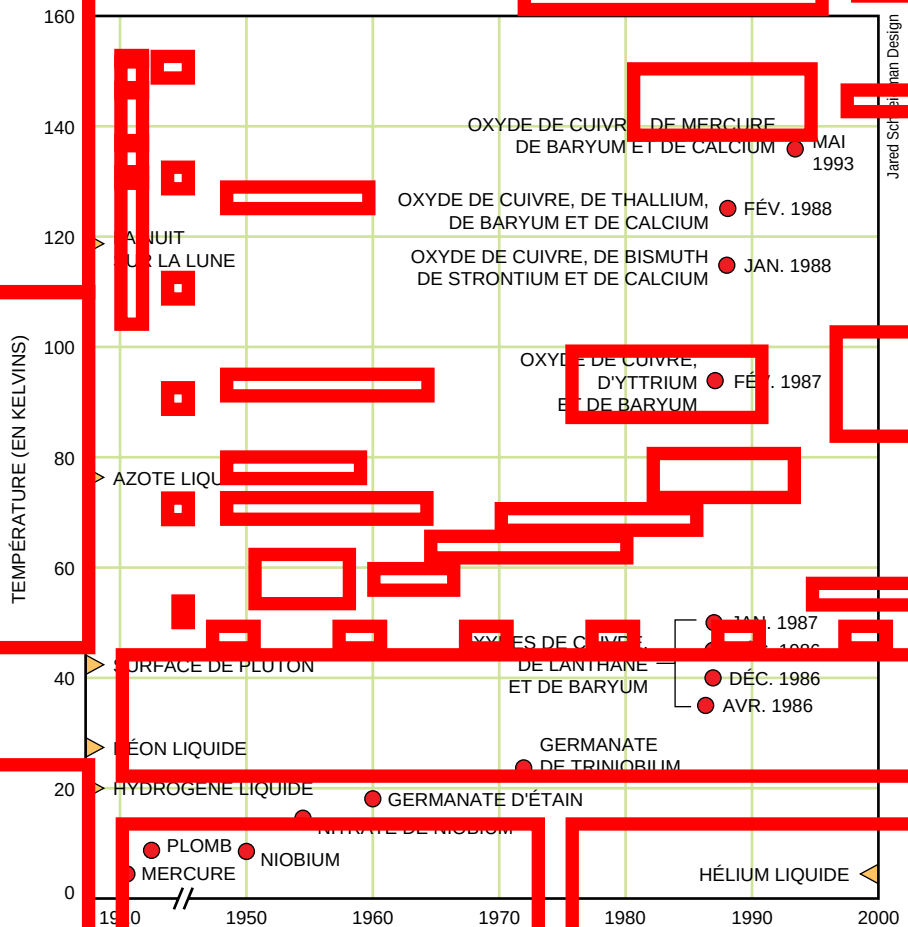
L'effet Josephson ne se produit que si les paires de Cooper sont déphasées de part et d'autre de la jonction (le terme de phase fait ici référence à une caractéristique de la fonction d'onde. Elle indique approximativement dans quelle direction la fonction d'onde se trouve). Avec des supraconducteurs à symétrie  $d$ , on peut fabriquer des anneaux, coupés par un nombre impair de jonctions Josephson, dans lequel les paires de Cooper reviennent, après un tour, en opposition de phase. Ce changement de phase correspond à un changement de signe de la fonction d'onde.

Lorsque l'on refroidit l'anneau, ce changement de signe engendre spontanément un demi-quantum de flux (à cause du changement de signe de la fonction d'onde, il n'est égal au long de l'anneau qui permet de calculer le flux ne s'annule pas). Quand on refroidit l'anneau dans un champ magnétique, le flux magnétique qui le traverse est un multiple du demi-quantum de flux.

### Trois jonctions dans un anneau

Pour fabriquer un anneau coupé par un nombre impair de jonctions Josephson, nous l'avons fait croître, en couche mince, sur un substrat formé de trois cristaux tournés de 30 degrés les uns par rapport aux autres ; ainsi l'anneau traversait-il les trois interfaces qui constituaient des jonctions Josephson (voir la figure 4). Si les paires de Cooper étaient dans un état de symétrie  $d$ , un tour dans l'anneau devait changer le signe de leur fonction d'onde (nous ne savons pas exactement comment la fonction d'onde d'onde change de signe, mais nous sommes certains que c'est un nombre impair de fois). Au contraire, si la fonction d'onde des paires de Cooper était de symétrie  $s$ , elle devait avoir le même signe partout, et les jonctions Josephson ne devaient pas modifier le signe : il devait être conservé après un tour.

Nous avons alors refroidi cet anneau supraconducteur « tricristallin » (d'une largeur d'environ 50 micromètres) à une température inférieure à sa température critique. Le flux



5. L'ACCELERATION RAPIDE des températures critiques des supraconducteurs est due à la découverte des supraconducteurs à haute température. Aucune des théories proposées pour expliquer la supraconduction à haute température n'écarte la possibilité d'une supraconduction à température ambiante, mais on n'a pas encore réalisé des matériaux ayant cette propriété.

magnétique qui le traversait avait la valeur d'un demi-quantum : la marque d'une symétrie  $d$  (nous aurions obtenu un nombre entier de quanta avec une symétrie  $s$  sphérique).

Nous avons visualisé le champ magnétique piégé par l'anneau à l'aide d'un dispositif supraconducteur de mesure par interférence, ou SQUID, le détecteur de champ magnétique le plus sensible que l'on connaisse aujourd'hui. L'enregistrement minutieux du signal de sortie du SQUID, par plusieurs méthodes, a permis de mesurer sans ambiguïté la présence d'un demi-quantum de flux dans des

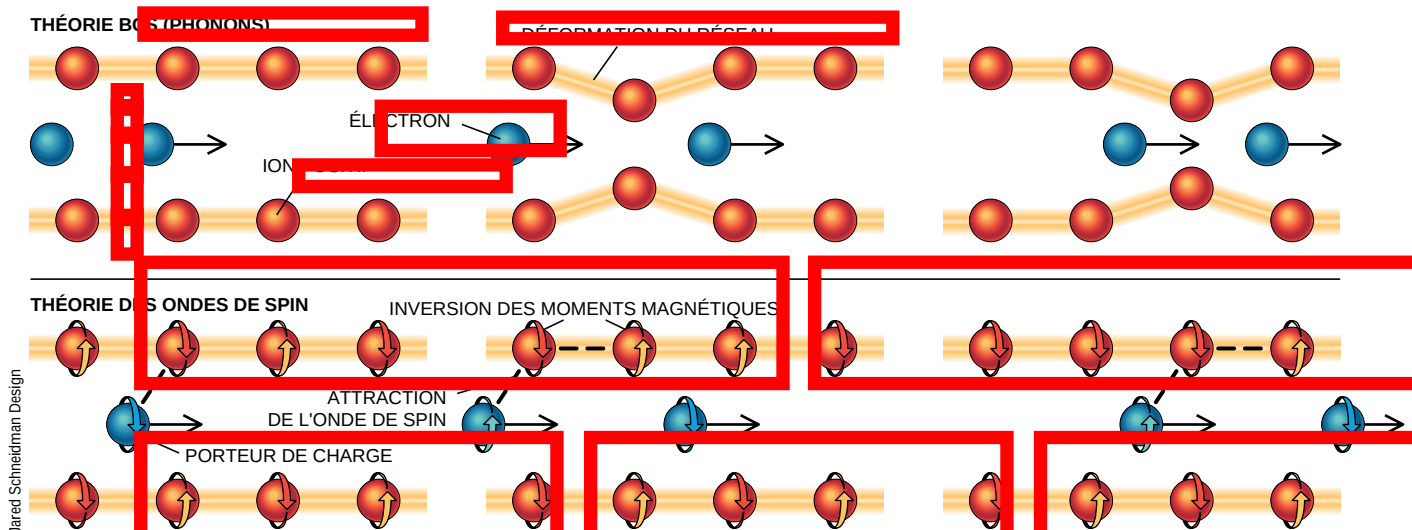
témoins, qui traversaient un nombre pair de jonctions Josephson, ne contenaient pas de flux quand ils étaient refroidis dans les mêmes conditions (car le signe change un nombre pair de fois et retrouve sa valeur initiale après un tour).

Nous avons aussi fait varier les conditions expérimentales afin de

montrer que les résultats obtenus provenaient de la symétrie de la fonction d'onde des paires de Cooper et non de phénomènes physiques parasites. De légères modifications dans l'orientation relative des trois cristaux sur lesquels sont fabriqués les anneaux ont fait apparaître et disparaître, selon les cas, le demi-quantum de flux spontané. En appliquant un faible champ magnétique, nous avons en outre observé que les anneaux témoins piégeaient des flux magnétiques multiples entiers du quantum du flux, dans un état.

Les expériences menées sur des anneaux sans formes particulières ont aussi piégé spontanément un demi-quantum de flux, montrant que le phénomène a son origine dans la symétrie intrinsèque de la fonction d'onde du supraconducteur, pas dans la forme annulaire de l'échantillon.

Nous avons répété ces expériences avec d'autres cuprates, de structure



6. DEUX THÉORIES DE LA SUPRACONDUCTION sont présentées ici. Elles se fondent toutes deux sur l'appariement des porteurs de charge. Selon la théorie BCS, qui explique la supraconduction à basse température, un électron produit des phonons (il déforme le réseau cristallin, constitué par les ions positifs), qui attirent à leur tour un

second électron (en haut). Dans le modèle d'onde de spin que les physiciens ont élaboré pour expliquer la supraconduction à haute température, un porteur de charge perturbe le moment magnétique d'un ion, ce qui inverse le moment magnétique d'un voisin et provoque la venue d'un second porteur de charge de moment magnétique opposé (en bas).

plus complexe que celle de l'oxyde de cuivre, de calcium, de strontium et de bismuth), aussi complexe (l'oxyde de cuivre, de baryum et de gadolinium) et plus simple (l'oxyde de cuivre, de baryum et de thallium). Les résultats ont tous été identiques. Nos expériences, tout comme celles d'autres équipes, sont toutes en faveur de la symétrie *d*.

Nous sommes aujourd'hui presque certains que les fonctions d'onde de l'état supraconducteur de différents cuprates ont une symétrie *d*. La symétrie sphérique observée dans des expériences, proviendrait de la capacité de certains cuprates, dans des conditions particulières, à révéler les deux types de symétrie. Ces résultats mettent en défaut le modèle classique BCS dans les supraconducteurs à haute température et confortent la théorie de l'onde de spin. Toutefois, si l'on admet une interaction fortement répulsive entre les porteurs (qui favorise une symétrie d'appariement à changement de signe), la plupart des autres mécanismes proposés (excitons, polarons, etc.) conduisent aux mêmes résultats.

Les expériences effectuées jusqu'à présent permettent néanmoins de réduire la liste des mécanismes d'appariements possibles. Il est en outre important d'y soumettre d'autres cuprates. L'oxyde de cuivre, de cérium et de néodyme, dopé avec un excès d'électrons, semble posséder des états à symétrie sphérique. La confirmation de ce résultat gênerait les partisans

de la symétrie *d*. Beaucoup de physiciens pensent que le même mécanisme est responsable de la supraconductivité de tous les cuprates. Elle prouverait aussi que la complexité de ces matériaux est sous-évaluée. Une étude systématique de la symétrie en fonction de la composition permettrait sans doute d'évincer des théories.

Les industriels seront intéressés de savoir que la majorité des mécanismes proposés ne s'opposent pas à l'existence de supraconducteurs à température ambiante. Des calculs succincts, effectués avec le modèle d'onde de spin, prévoient que la température critique puisse dépasser 20 °C, voire atteindre plusieurs centaines de degrés.

de travail avant de déterminer sans ambiguïté le mécanisme d'appariement. La technique d'observation des quantas de flux magnétique à travers des anneaux est un outil puissant qui aidera peut-être les chercheurs à comprendre pourquoi ces matériaux qui leur résistent tant résistent si peu à l'électricité.

John KIRKLEY et Chang TSUEI sont physiciens au Centre de recherches Thomas J. Watson de la Société IBM, à Yorktown Heights.

Michel LAUGUÈS, *Les films supraconducteurs*, in *Pour la Science*, décembre 1993.

John LARKE, *La détection des champs magnétiques*, in *Pour la Science*, octobre 1994.

D.J. SCALAPINO, *The Case for dx<sub>2</sub>y<sub>2</sub> Pairing in the Cuprate Superconductors*, in *Physics Reports*, vol. 250, n° 6, pp. 329-365, janvier 1995.

Tim FOLGER, *Call Them Irresistible*, in *Discover*, vol. 16, n° 9, pp. 83-91, septembre 1995.

Paul CHIU, *Les supraconducteurs dans l'industrie*, in *Pour la Science*, novembre 1995.

J.R. KIRKLEY, M.B. KETCHEN, C.C. TSUEI, J.Z. SUN, W.J. GALLAGHER, Lock-lee YU-JAHNES, A. GUPTA, K.G. SAVVASZ et S.J. WIND, *Design and Applications of a Scanning SQUID Microscope*, in *IBM Journal of Research and Development*, vol. 39, n° 6, pp. 655-668, novembre 1995.

Barbara LARKE, *Experiments on the Wavefunction of Electron Pairs in High T<sub>c</sub> Superconductors*, in *Physics Today*, vol. 49, n° 1, pp. 19-22, janvier 1996.

Ivars PETERSON, *Electron Pairs and Waves: Tackling the Puzzle of High-Temperature Superconductivity*, in *Science News*, vol. 149, n° 10, pp. 156-157, 9 mars 1996.



# Le développement de l'embryon

CHRISTIANE NÜSSLEIN-VOLHARD

*Des différences de concentration de quelques molécules clés commandent l'organisation de l'embryon.*

*Les ours s'accouplent en hiver, puis la femelle se retire dans une grotte pour donner naissance, après plusieurs mois de gestation, à trois ou quatre petits. À leur naissance, ce ne sont que des boules informes de chair, dont seules les griffes sont déjà formées. Ils prennent forme sous les coups de langue de leur mère.*

Cette théorie, rapportée par Pliny l'Ancien, visait à expliquer l'un des plus grands mystères de la vie : comment un œuf, cellule unique quasi homogène, donne-t-il un animal constitué de dizaines de types de cellules différentes, toutes correctement placées ? Comment la complexité croît-elle au cours du développement ? Une autre théorie s'imposa aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles : un œuf n'est pas dépourvu de structure, mais contient une mosaïque invisible de « déterminants » qui, en se déployant, forme l'organisme final. Aujourd'hui, on comprend mal une telle idée : si un œuf avait contenu la structure complexe d'un animal adulte sous forme invisible, il aurait également dû renfermer les structures de toutes les générations successives, car les femelles, une fois adultes, auraient produit des œufs qui auraient contenu des êtres minia-

tures, et ainsi de suite. Mais Johann Wolfgang Goethe, qui se piquait de science, soutenait cette hypothèse de préformation, à défaut d'une autre explication.

Il y a environ 100 ans, les embryologistes commencèrent à comprendre que le développement n'est pas totalement déterminé dès la formation de l'œuf.

Les expériences de manipulation expérimentale modifièrent notablement le développement et que l'hypothèse de la préformation n'explique pas. Ainsi, quand on sépare en deux cellules un œuf d'ours au stade de deux cellules, chacune engendre un animal complet ; pourtant, sans intervention, les deux cellules fusionnées n'auraient formé qu'un seul animal. Quand une telle scissure se produit naturellement sur un embryon humain, deux vrais jumeaux naissent le jour.

L'hypothèse des gradients s'établit alors. En 1909, Hans Boveri à l'Université de Wurtzbourg, le « père » de la théorie chromosomique de l'hérédité, imagina que la concentration en « quelque chose » variait d'une extrémité de l'œuf à l'autre ; les cellules d'un organe qui se développe au même réagi aux variations de concentration d'une substance particulière, un morphogène. Les cellules réagi-

raient différemment à des concentrations différentes du morphogène.

Les embryologistes n'admirent pas immédiatement que les cellules reconstruisent leur position dans l'embryon d'après la concentration des morphogènes. On opposait notamment une question importante à cette hypothèse : comment un gradient morphogénique pouvait-il s'établir et se maintenir pendant une période suffisamment longue du développement ? Dans un tissu, constitué de cellules, les membranes cellulaires pourraient créer un gradient de concentration en s'opposant à la diffusion des grosses molécules, mais, dans l'œuf, cellule unique, la diffusion moléculaire ferait rapidement disparaître tout gradient. De surcroît, la nature biochimique des morphogènes et leur mécanisme d'action restaient mystérieux.

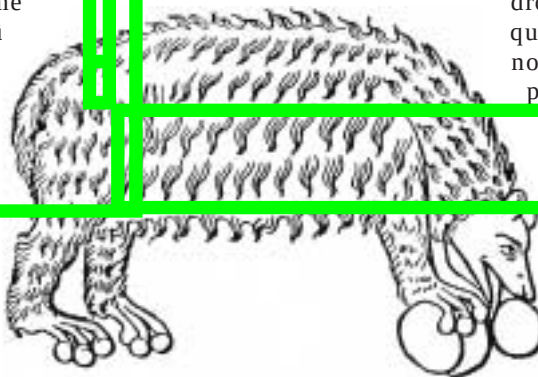
Les biologistes ont longtemps cherché comment ce gradient pouvait se former. Puis plusieurs équipes ont établi que des tout jeunes embryons de drosophile contenaient des gradients qui déterminaient la croissance. De nombreux mécanismes du développement

ont été découverts chez les animaux plus proches de l'homme. Les exemples présentés plus loin montrent que les drosophiles

concours de qualités font de la drosophile un modèle quasi idéal pour les recherches en embryologie, en génétique et en biologie moléculaire.

Dès le début du XX<sup>e</sup> siècle, la drosophile est devenue l'animal d'élection des généticiens : on la manipule facilement et elle

Avec l'autorisation de Christiane Nüsslein-Volhard



**1. LE DÉVELOPPEMENT ANIMAL était un mystère pour les naturalistes de l'Antiquité. Sur ce dessin du XVI<sup>e</sup> siècle, c'est à coups de langue qu'un ours façonne ses petits, que l'on croyait informes à la naissance.**

se reproduit rapidement, ce qui facilite l'obtention de mutants. L'étude de virus, de bactéries et de levures mutants avait déjà permis aux biologistes d'élucider diverses voies métaboliques et plusieurs mécanismes de régulation. Il y a 20 ans, avec Eric Wieschaus, nous avons utilisé des mutants pour rechercher les gènes qui contrôlent la forme segmentée de la larve de drosophile. Les larves mesurent environ un millimètre de long, avec des segments bien délimités qui apparaissent 24 heures après la ponte de l'œuf. Ces caractéristiques sont essentielles pour l'interprétation d'anomalies déclenchées expérimentalement et qui perturbent le développement.

En outre, au cours des premiers stades du développement embryonnaire de la drosophile, l'œuf ne se sépare pas en deux moitiés. Dans les embryons de la plupart des autres animaux, la division des noyaux cellulaires s'accompagne de la division de la cellule ; des membranes cellulaires isolent alors les deux moitiés et forment deux cellules, là où il n'y en avait qu'une ; l'embryon est donc un amas de cellules. Chez la drosophile, en revanche, le noyau de l'œuf fécondé

se divise sans cesse, mais les différentes copies ne sont pas isolées par des membranes : des milliers de noyaux finissent par s'accumuler en périphérie d'une « cellule unique ». C'est seulement après trois heures de division cellulaire, lorsque 6 000 noyaux environ se sont formés, que des membranes de

Ainsi, les substances chimiques peuvent diffuser librement et imposer le développement d'un gradient de l'embryon. On peut transplanter du cytoplasme (le liquide visqueux contenu dans les cellules) ou injecter des molécules biologiques dans diverses régions de l'embryon de drosophile et en observer les effets.

## Le pouvoir des gradients

En effet, la drosophile possède aux techniques de la biologie moléculaire : l'insecte n'a que quatre paires de chromosomes, géants dans certains tissus, de sorte que l'on détecte parfois, au microscope, les anomalies génétiques. Enfin, à l'aide d'éléments génétiques mobiles, on peut ajouter des gènes spécifiques au patrimoine génétique de la drosophile.

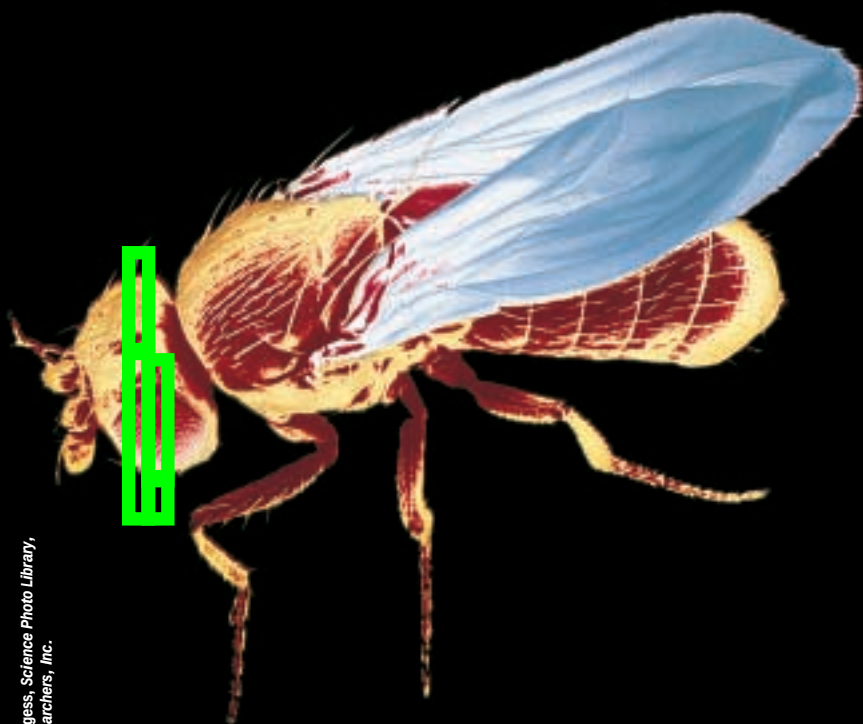
En étudiant des mutants, les biologistes ont trouvé une trentaine de gènes, actifs chez la femelle et qui définissent le « patron » de l'embryon. Seuls trois d'entre eux codent des signaux moléculaires qui déterminent les structures le long de l'axe antéro-postérieur (entre la tête et la queue) de la larve.

Chacune de ces protéines de signalisation n'apparaît qu'en un site spécifique de l'œuf en développement et contribue à la création d'un type particulier de gradient morphogénique. La concentration en morphogène est toujours maximale sur le site de production du signal.

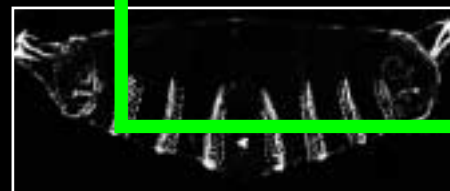
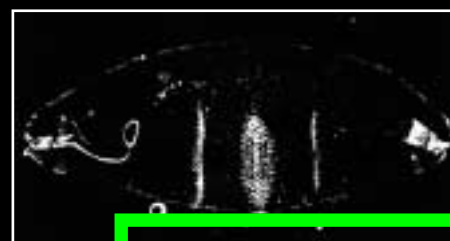
L'un de ces signaux commande le développement de la moitié antérieure de l'œuf, qui donnera la tête et le thorax de la larve. Un deuxième signal s'exprime dans la région qui devient l'abdomen.

le développement des structures situées aux deux extrémités de la larve.

Le gradient morphogénique de la protéine nommée Bicoïd est le plus simple ; il détermine le développement de la partie antérieure de la larve. Avec Wolfgang Driever, nous avons découvert qu'un gradient de concentration en protéine Bicoïd s'établit dès les pre-



Jeremy Burgess, Science Photo Library, Photo Researchers, Inc.



Christian Jusslein-Vollhard

**2. PAR MODIFICATION DE GRADIENTS DE PROTÉINES**, on a obtenu ces deux embryons anormaux de mouche du vinaigre *Drosophila melanogaster* (à gauche). L'un a deux extrémités antérieures symétriques (en haut) ; l'autre a deux extrémités abdominales (en bas). Dans ces embryons qui ne sont pas viables, on a coloré certaines protéines pour les repérer.

miers stades du développement : la concentration est maximale à l'extrémité antérieure de la larve et diminue progressivement le long de l'axe longitudinal. Des mutations du gène *bicoïd*, chez une drosophile femelle, empêchent la création du gradient de protéine Bicoïd, ce qui donne un embryon dépourvu de tête et de thorax.

La protéine Bicoïd agit comme un facteur de transcription. C'est un «facteur de transcription», capable de déclencher la transcription d'un gène, c'est-à-dire la production d'un ARN messager à partir du matériel génétique, l'ADN, puis la synthèse de la protéine codée par le gène à partir de l'ARN messager. Les facteurs de transcription agissent en se fixant

sur des séquences d'ADN spécifiques, localisées dans les régions régulatrices, ou promoteurs, des gènes cibles. Pour que la protéine Bicoïd puisse se fixer sur un promoteur, sa concentration doit dépasser un seuil critique.

Nous avons étudié l'interaction de la protéine Bicoïd avec le gène *hunchback*, qui est transcrit dans la partie antérieure de l'embryon.

Le promoteur du gène *hunchback* contient plusieurs sites de fixation de la protéine Bicoïd. Nous avons réalisé deux types d'expériences : d'une part, nous avons modifié le profil de concentration en protéine Bicoïd ; d'autre part, nous avons changé la structure du promoteur du gène *hunchback*.

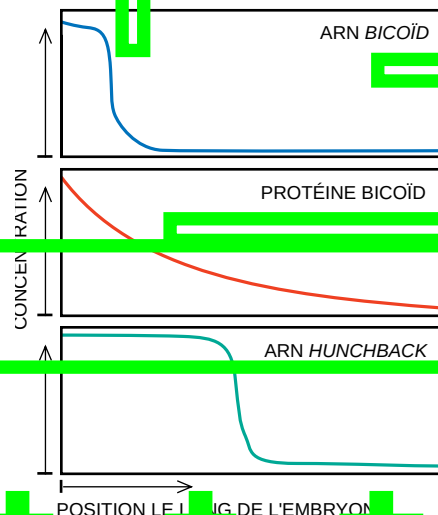
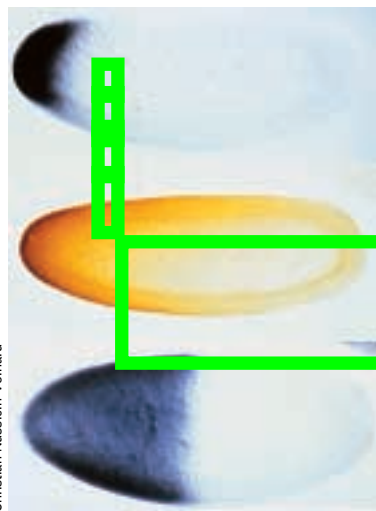
En introduisant des copies supplémentaires du gène *bicoïd* dans

l'ADN d'embryons qui forment ensuite des femelles, nous obtenons des animaux qui pondent des œufs où la concentration en protéine Bicoïd est quatre fois supérieure à la normale, tout le long du gradient : dans les embryons formés à partir de ces œufs, la zone d'activation du gène *hunchback* s'étend alors vers la partie antérieure, et la tête et le thorax se

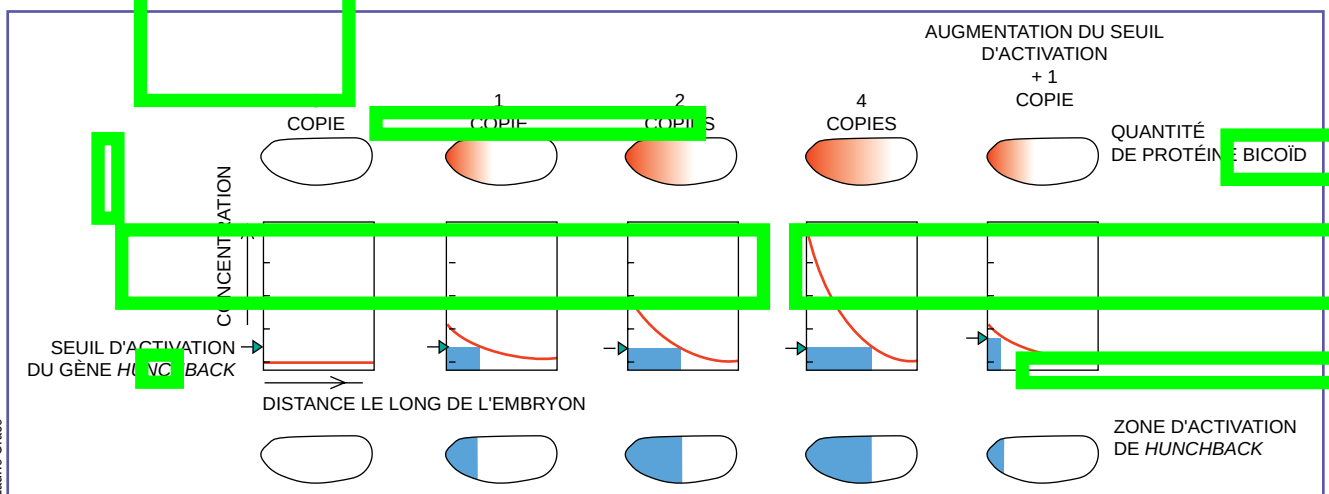
développent à partir d'une région qui n'est pas étendue que la normale.

Est-ce en raison d'un gradient de concentration plus marqué chez les embryons manipulés ? Est-ce parce que la concentration absolue en Bicoïd est supérieure à la normale ? En étudiant des mutants dont la concentration en Bicoïd était uniforme tout le long de leur axe antéro-postérieur (il n'y a pas de gradient), nous avons découvert que la seconde hypothèse est la bonne. Selon la concentration en protéine Bicoïd, ces embryons n'avaient qu'un seul type de structure antérieure (soit la tête, soit le thorax). Aussi, est-ce la concentration absolue de Bicoïd, et non l'amplitude du gradient, qui contrôle le développement de chaque région.

Dans le deuxième type d'expériences, nous n'avons pas perturbé le gradient de protéine Bicoïd, nous avons modifié le promoteur du gène *hunchback*. Lorsque la liaison de la protéine Bicoïd au promoteur n'était que faible, il fallait des concentrations en Bicoïd très élevées pour amorcer la transcription du gène *hunchback*. Par conséquent, la limite de la zone d'activité du gène *hunchback* se déplaçait vers l'avant et, comme on s'y attendait,



**3. APRÈS LA PONTE**, les œufs de drosophile contiennent un ARN messager qui à leur extrémité antérieure, qui donnera la tête (visualisé par coloration en haut à gauche). Deux heures plus tard, la protéine Bicoïd, formée à partir de l'ARN, s'est répartie le long de l'embryon (au milieu). Le gradient de concentration en protéine Bicoïd dépasse une valeur seuil et active le gène *hunchback*, uniquement dans la moitié antérieure de l'embryon (en bas).



**4. DES EMBRYONS** pourvus d'exemplaires excédentaires du gène *bicoïd* produisent des gradients de protéine Bicoïd plus marqués que chez les embryons normaux. La région où la concentration en

protéine Bicoïd est supérieure au seuil d'activation du gène *hunchback* s'étend. Quand on augmente artificiellement le seuil d'activation, la zone d'activité du gène *hunchback* diminue.

la tête se développait à partir d'une région plus petite que la normale. Ces expériences établissaient que la protéine Bicoïd exerce son action en se liant au promoteur du gène *hunchback*.

Ces expériences montrent comment un morphogène (la protéine Bicoïd) détermine l'endroit, dans l'embryon, où le gène *hunchback* est activé. En théorie, de nombreux gènes cibles pourraient réagir à divers seuils, dans un même gradient de concentration du morphogène, lequel définirait plusieurs zones d'activation de gènes. En réalité, un gradient agit seulement sur deux ou sur trois gènes, ne déterminant que deux ou trois zones d'activation.

Comment le gradient de concentration du morphogène Bicoïd s'établit-il ? Au cours du développement de l'œuf non fécondé, des cellules nourricières accumulent, au pôle antérieur, des ARN messagers *Bicoïd* ; la synthèse de la protéine, qui commence après la fécondation, a déjà lieu lors de la ponte de l'œuf. Au cours du développement embryonnaire, la protéine diffuse à partir de son lieu de production, situé à l'extrémité antérieure, mais elle est instable, de sorte que sa concentration est rapidement éloignée, c'est-à-dire à l'extrémité qui donnera l'abdomen, n'est jamais élevée. Le gradient de concentration qui s'établit ainsi persiste jusqu'à la formation des membranes cellulaires.

Cette simple diffusion est suffisante pour assurer un développement normal. Des variations, même notables, de la concentration en protéine Bicoïd (une concentration double ou de moitié)

aboutissent à un développement normal de la larve. Des expériences similaires du développement peuvent corriger certaines erreurs survenues aux stades précoces. Quand on injecte des ARN messagers *bicoïd* dans le pôle postérieur d'un embryon normal, un second gradient de concentration en protéine *bicoïd* imposé au gradient naturel, apparaît. L'embryon a une seconde tête, à la place de l'abdomen. On en déduit

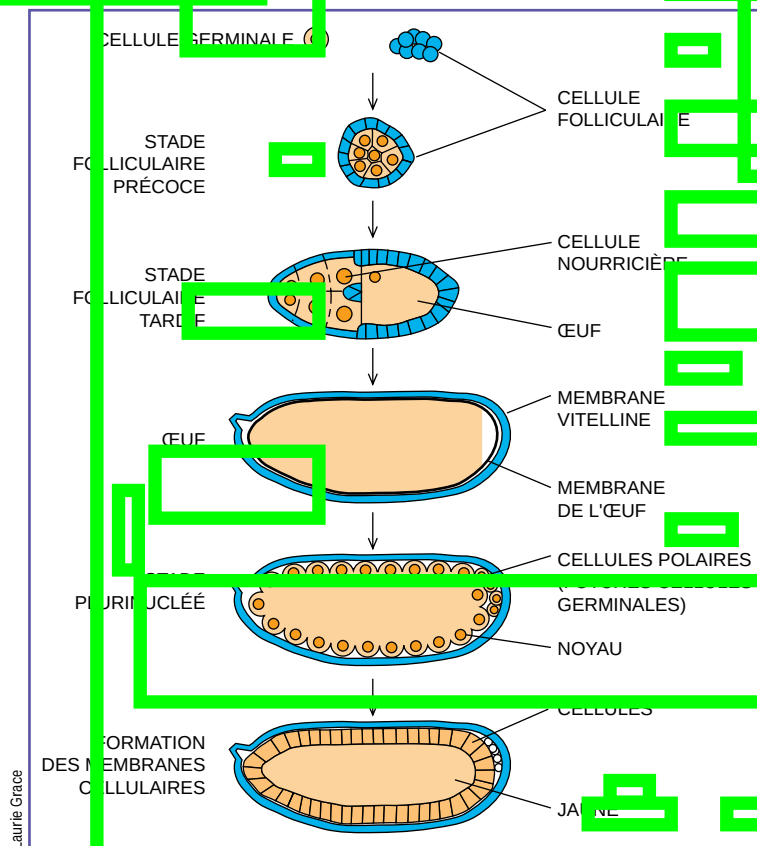
que l'ARN messager *bicoïd* suffit à déterminer la polarité.

D'autres travaux ont révélé comment l'ARN messager de la protéine Bicoïd se répartit naturellement dans l'œuf. À l'Université Stanford, Paul MacLennan a identifié une séquence de cet ARN messager qui contient toutes les informations nécessaires à une cellule pour le reconnaître, le transporter et le fixer. En outre, nous avons observé qu'un complexe moléculaire constitué d'un ARN messager *bicoïd* et d'une protéine nommée Staufen se déplace

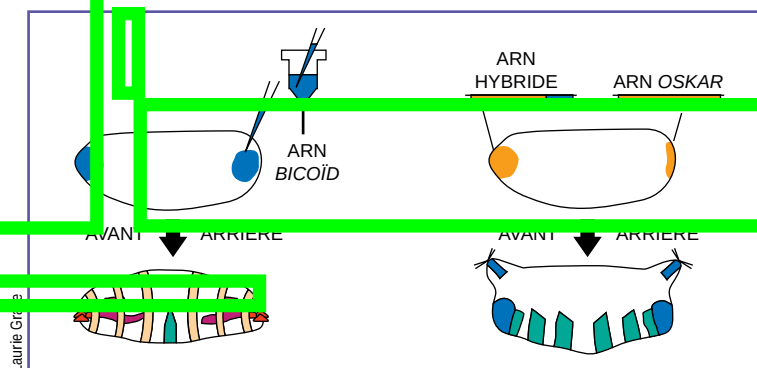
direction le long des éléments structuraux nommés microtubules. Cela expliquerait la localisation de l'ARN messager *bicoïd*, bien que d'autres protéines interviennent aussi dans ce mécanisme.

Si la protéine Bicoïd détermine la partie antérieure de la larve, le gradient morphogénique de la protéine Nanos détermine la partie postérieure. L'ARN messager *Nanos* est concentré dans le cytoplasme, au pôle postérieur de l'œuf. Sa présence dépend essentiellement d'un autre complexe moléculaire, constitué de la protéine Staufen et de l'ARN messager d'un gène nommé *oskar*. Ce dernier est indispensable, et son remplacement par un ARN messager hybride contenant la séquence de l'ARN messager *bicoïd* (qui permet la localisation au pôle antérieur) altère le gradient.

transport du complexe macromoléculaire comportant l'ARN messager *Nanos* vers l'extrémité antérieure de l'embryon : celui-ci a alors deux extrémités abdominales symétriques.



5. UN ŒUF DE DROSOPHILE se forme à partir d'une cellule germinale. Les cellules nourricières et les cellules folliculaires fournissent des éléments nutritifs et divers facteurs commandant le développement embryonnaire. Trois heures après la ponte, lorsque 6 000 noyaux sont apparus, des membranes séparent les cellules en cellules distinctes. Les futurs larvaires apparaissent plus tard.



6. UNE MODIFICATION DES GRADIENTS de protéines perturbe le développement embryonnaire. Quand on injecte de l'ARN *bicoïd* à l'extrémité postérieure d'un œuf (à gauche), une seconde tête et un second thorax se développent. Les œufs manipulés qui produisent des molécules hybrides d'ARN *oskar* et d'ARN *bicoïd* (à droite) donnent des embryons à deux extrémités abdominales.

## Comment contourner les membranes cellulaires

Les gradients morphogéniques des protéines Bicoïd et Nanos, toutes deux de grandes molécules, ne s'établissent qu'en l'absence de membranes cellulaires, lesquelles bloquent la diffusion. Toutefois, chez la plupart des animaux, les membranes cellulaires séparent, dès les premiers stades du développement, les différentes régions de l'œuf, ce qui empêche les gradients de se former. L'axe dorso-ventral (face supérieure-face inférieure) de l'embryon de drosophile est défini par un gradient unique, qui s'établit même en présence de membranes cellulaires. Le mécanisme qui impose ce gradient doit ressembler à celui qui existe chez d'autres organismes.

Les premières structures embryonnaires qui apparaissent le long de l'axe dorso-ventral sont déterminées par le gradient d'une protéine nommée Dorsal. Comme la protéine Bicoïd, la protéine Dorsal est un facteur de transcription et commande, selon sa concentration, l'activité de plusieurs gènes cibles. La protéine Dorsal est soit un activateur, soit un inhibiteur de la transcription dans le noyau cellulaire (elle active ou elle inhibe certains gènes). Quand sa concentration, dans le noyau cellulaire, dépasse un seuil donné, elle active la transcription de deux gènes qui contrôlent le développement ultérieur ; lorsque la concentration n'atteint pas ce seuil, elle inhibe la transcription de deux autres gènes. En fin, quand la concentration en protéine Dorsal dans les différents territoires définit un gradient, chacune de ces protéines s'exprime d'un côté ou de l'autre de l'embryon.

Le gradient de concentration en protéine Dorsal ne s'établit pas du tout

### 7. LE GRADIENT DE PROTÉINE DORSAL crée un axe dorso-ventral chez la drosophile (la zone foetalisée). La protéine est surtout concentrée dans les noyaux de la face ventrale de l'embryon.

comme celui de la protéine Bicoïd : globalement, la protéine Dorsal est homogène dans l'ensemble de l'embryon ; c'est sa répartition intracellulaire (nucléaire ou cytoplasmique) qui varie le long de l'axe dorso-ventral de l'embryon. Plus précisément, sur la face dorsale de l'embryon, la protéine se concentre de plus en plus dans le cytoplasme ; sur la face ventrale, elle s'accumule dans les noyaux.

Comment la protéine Dorsal se concentre-t-elle dans les noyaux ? Normalement, une protéine nommée Cactus se lie à la protéine Dorsal, l'empêchant de pénétrer dans le noyau. Toutefois, sur la face ventrale de l'embryon, plus d'une dizaine d'autres protéines coopèrent pour

Le signal ventral qui provoque ce décrochement apparaît au début du développement de l'œuf, ainsi, le signal de la femelle qui pondra ce dernier. L'entrée de ce décrochement – l'entrée de la protéine Dorsal dans les noyaux – ne se manifeste que plusieurs heures plus tard, chez des embryons dont les

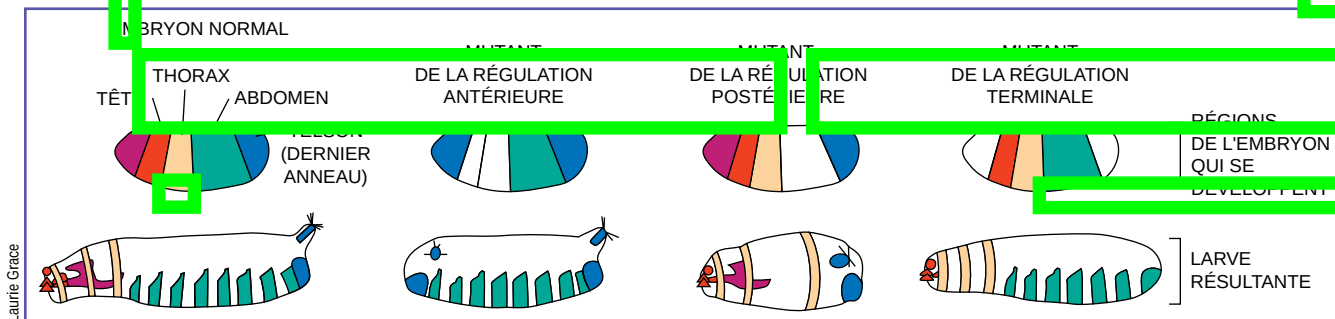
noyaux se divisent rapidement. On ignore encore la nature de ce signal, très stable et concentré dans la membrane vitelline qui entoure l'œuf après la ponte.

Certains composants précoces de la chaîne d'activation sont produits dans les cellules folliculaires de la mère, qui entourent l'œuf avant la ponte. D'autres sont produits dans l'œuf, puis s'accumulent soit dans le cytoplasme, soit dans la membrane cellulaire ; ils peuvent aussi être excrétés hors de l'œuf.

Initialement, les protéines de cette chaîne d'activation sont produites et se forment net, chacune dans son compartiment. Puis, le signal qui identifie la face ventrale est activé. Il semble engendrer le gradient de la protéine Dorsal en déclenchant une cascade d'interactions parmi les différentes protéines de la chaîne d'activation ; cette cascade transmet à l'œuf les informations déterminant la face ventrale.

Ces messages en chaîne sont probablement commandés par d'autres gradients qui leur sont propres. Un premier gradient apparaît sans doute dans la face qui entoure l'œuf, où les protéines diffusent aisément. Ce gradient semble provoquer une activation graduelle de la membrane cellulaire de l'œuf : selon leur position sur la face ventrale et l'exposition à une activité signalisatrice plus ou moins forte, les récepteurs seraient plus ou moins activés. Ces

signal graduel au cytoplasme de l'œuf, et ainsi de suite tout au long de la chaîne d'activation. Ainsi, le signal de la formation des structures dorso-ventrales de l'embryon n'est pas géré par la diffusion moléculaire : des relais moléculaires, assurés par plusieurs protéines, transmettent l'information



8. LES GÈNES PERTURBANT le développement précoce de la drosophile sont répartis en quatre groupes qui désorganisent différentes voies de régulation. Trois groupes agissent sur l'axe longitudinal.

Toute perturbation de l'un des gènes bloque le développement de certains territoires de l'embryon. Un autre groupe (non représenté) perturbe l'axe dorso-ventral.

concernant les gradients d'un compartiment à l'autre. Un mécanisme analogue de transmission des signaux à travers la membrane cellulaire de l'œuf commande la formation des structures terminales, aux extrémités de l'axe antéro-postérieur. Ainsi, les signaux véhiculés à l'œuf, ou un gradient de concentration s'établit aisément par diffusion, puis sont transmis vers l'intérieur. Finalement une impotiation progressive, dans les noyaux, une protéine dont la répartition était initialement uniforme, vient activer le noyau par un gradient de concentration.

## Des structures communes

Quelles conclusions peut-on tirer de ces résultats ? Jusqu'à présent, les gradients les biologistes pensaient que les morphogènes constituaient une classe de molécules particulières. Ce n'est absolument pas le cas : chez l'embryon de drosophile, de nombreuses protéines « ordinaires », qui ont différentes fonctions biochimiques, transmettent simultanément des informations de position.

Dans certaines circonstances, comme dans le mécanisme déterminant les structures dorso-ventrales, un gradient qui résulte d'une diffusion est transmis par l'intermédiaire d'une chaîne moléculaire. Dans d'autres cas, les protéines sont successivement activées. Dans d'autres cas, les gradients ont des effets inhibiteurs ; ainsi, le gradient Nanos bloque, en certains endroits seulement, l'expression d'un type d'ARN messager uniformément réparti, créant ainsi un gradient orienté en sens inverse de celui que définit la protéine Nanos.

Toutes les chaînes d'activation étudiées à ce jour aboutissent à la formation d'un gradient de morphogène qui agit comme un facteur de transcription ; selon sa concentration, ce gradient active ou inhibe l'expression d'un ou de plusieurs gènes cibles. Ces gradients sont parfois peu marqués : les protéines Bicoid et Dorsal diminuent peu le long de l'axe longitudinal de l'embryon. Pourtant, les protéines produites par les gènes cibles ont des limites d'activité très bien définies. Comment est-ce possible ?

Une coopération entre plusieurs molécules différentes, ou entre plusieurs copies d'une même molécule,

COLLECTION  
REGARDS SUR LA SCIENCE

# LES PLANÈTES GÉANTES

Thérèse Encrenaz



## LES PLANÈTES GÉANTES

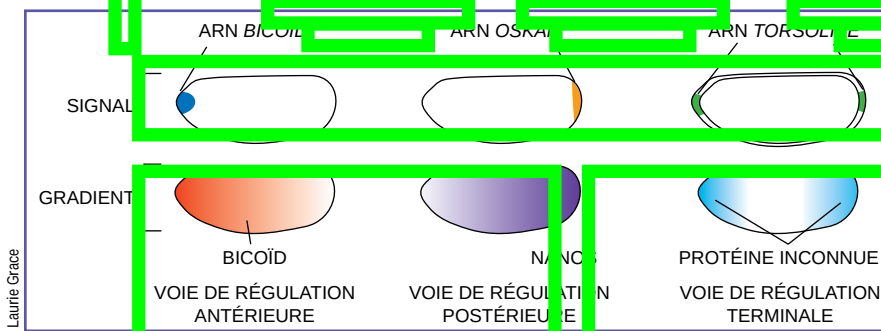
Thérèse Encrenaz

À 300 millions de kilomètres du Soleil, commence le règne des quatre planètes géantes : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. En 1846, Neptune est découverte. 150 ans plus tard, les explorations spatiales successives ont révélé quatre mondes très divers. Témoins des premiers âges du Système solaire, né il y a plus de quatre milliards d'années, ils fascinent les astronomes. Dans un style clair et vivant, l'ouvrage invite le lecteur à un voyage dans la lointaine « banlieue » de la Terre. Et au-delà, où des planètes hors de notre Système solaire ont été récemment détectées, une découverte qui relance cette éternelle interrogation : sommes-nous seuls dans l'Univers ?

Directeur de recherches au CNRS, Thérèse Encrenaz dirige le Département de recherche spatiale à l'Observatoire de Paris-Meudon. Spécialiste de l'atmosphère des planètes, elle est impliquée dans plusieurs programmes internationaux d'exploration spatiale.

Voir bon de commande p.98





**9. TROIS VOIES D'ACTIVATION, le long de l'axe longitudinal, créent des signaux sous forme d'ARN *bicoid*, *oskar* et *torsolike*. Ils engendrent quatre gradients de concentration en protéines qui commandent la subdivision de l'embryon.**

pourrait déclencher la transcription. La dynamique dépendrait beaucoup de la concentration d'un ou de plusieurs des composants. Or, les gènes activés par les protéines Bicoïd ou Dorsal portent plusieurs sites de liaison adjacents, pour des facteurs de transcription différents, qui moduleraient leur activité.

Certains gradients morphogéniques n'ont apparemment qu'un seul effet : qu'une protéine, en un territoire donné, est supérieure à un seuil critique, un gène cible est activé ; sinon, il ne l'est pas. Dans d'autres cas, les réactions diffèrent selon les concentrations en morphogène ; ce type de gradient est indispensable à l'augmentation de la complexité, dans les organismes en développement.

Bien que chaque gradient morphogénique ne semble contrôler directement que quelques gènes cibles, des interactions de molécules qui agissent sur la transcription peuvent modifier notablement les réactions aux gradients. Ces mécanismes de régulation combinée conduiraient à la formation de structures complexes à partir d'un système initialement très simple. Les protéines agissant comme cofacteurs peuvent modifier l'affinité du morphogène pour son site cible. Un gène, augmentant ou diminuant le seuil critique. Un cofacteur peut même transformer un facteur de transcription activateur en un facteur inhibiteur. Le potentiel

de complexification augmente encore si l'on considère que les cofacteurs peuvent eux-mêmes se répartir de façon hétérogène.

La superposition de plusieurs gradients, dans une région de l'embryon, permet de la subdiviser encore davantage et d'accéder à une complexité supplémentaire. Les trois voies méta-

boliques qui définissent l'axe antéro-postérieur de l'embryon de drosophile aboutissent à quatre gradients indépendants (la voie terminale produit deux gradients d'une protéine inconnue). Chaque gradient présente un ou deux seuils. Au moins sept régions sont ainsi définies ; elles expriment des lots spécifiques de gènes cibles. La superposition du gradient de la protéine inconnue et du gradient de la protéine Bicoïd commande un lot de gènes cibles qui détermine la région la plus antérieure de la drosophile, une partie de sa tête. Au contraire, lorsque le gradient de la protéine inconnue agit seul, il définit les structures de l'extrémité opposée, la partie extrême de l'abdomen.

La régulation combinatoire, active dès les premiers stades embryonnaires, devient encore plus importante aux stades ultérieurs du développement de la drosophile. Par exemple, les gradients de concentration en facteurs de transcription, le long de l'axe longitudinal de l'embryon, agissent sur des gènes qui, dans la plupart des cas, codent pour des facteurs de transcription. Ces facteurs secondaires diffusent à leur tour, définissant eux-mêmes des gradients de concentration. Chacun agit, à différents seuils de concentration, sur ses propres gènes cibles. Parfois, ces seuils sont modifiés par d'autres facteurs de transcription, dont les sphères d'influence se chevauchent.

Les gradients de concentration permettent d'organiser les fonctions codées par les gènes en un vaste répertoire de mécanismes du développement. Chez la drosophile, les gradients déclenchent l'expression de gènes en bandes transversales dans la région de l'œuf qui deviendra ultérieurement la région segmentée de la larve.

Cette structure commande ensuite la formation de bandes encore plus fines qui déterminent directement les caractéristiques de chaque segment de l'embryon. Dès que l'embryon se divise en cellules, les signaux de la transcription ne peuvent plus diffuser à travers les couches de cellules. Les étapes ultérieures, au cours desquelles le patron embryonnaire s'établit, mettent en jeu les signaux transmis entre cellules voisines, sans doute grâce à des mécanismes spéciaux qui permettent la transmission des signaux à travers les membranes cellulaires.

Notons que nous n'avons pas encore décodé le scénario complet du développement de l'embryon de drosophile, mais je pense que nous en avons éclairci plusieurs aspects. Ces résultats ne s'appliquent pas seulement à la drosophile : à leur grande surprise, les embryologistes ont découvert, au cours des cinq dernières années, que, lors de l'embryogenèse précoce, les mêmes gènes, les mêmes facteurs de transcription et les mêmes mécanismes mentaux très proches sont mis en jeu dans tout le règne animal.

Cette recherche fondamentale devrait nous permettre de mieux comprendre le développement de l'embryon humain. D'ores et déjà, on a éclairci l'un des plus grands mystères de la nature : comment la complexité émerge de la simplicité originelle.

Christiane NÜSSLEIN-VOLHARD a partagé, en 1995, le prix Nobel de physiologie et de médecine avec les généticiens Edward Lewis et E. Wieschaus. Elle dirige le département de génétique de l'Institut Max Planck de biologie du développement, à Tübingen.

C. NÜSSLEIN-VOLHARD et E. WIESCHAUS, *Mutations Affecting Segment Number and Polarity in Drosophila*, in *Nature*, vol. 287, pp. 795-799, 30 octobre 1980.

Peter A. LAWRENCE, *The Making of a Fly ; The Genetics of Animal Design*, Blackwell Science, 1992.

Daniel St. JOHNSTON et Christiane NÜSSLEIN-VOLHARD, *The Origin of Pattern and Patterning in the Drosophila Embryo*, in *Cell*, vol. 68, n° 2, pp. 201-209, 24 janvier 1992.

*The Development of Drosophila Melanogaster*, sous la direction de Michael Bate, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1993.



# Les ronds d'air des dauphins

KEN MARTEN • KARIM SHARIFF • SUCHI PSARAKOS • DON WHITE

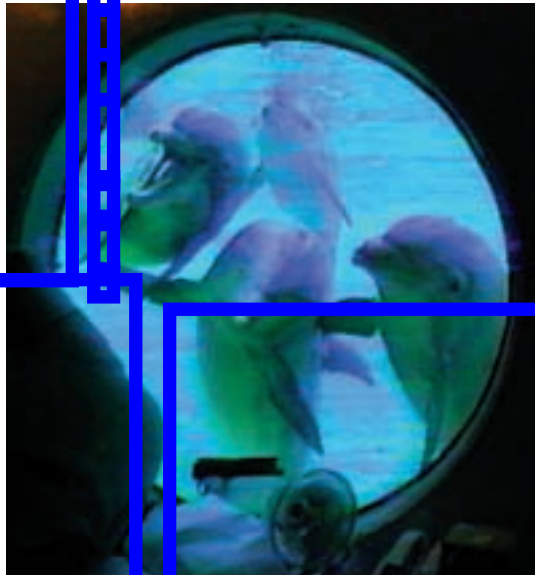
À Hawaii, des dauphins s'amuse à faire, dans l'eau, des spirales et des ronds d'air tourbillonnants et stables.

Sur l'île d'Oahu, à Hawaii, un laboratoire unique en son genre se consacre à l'étude des dauphins. Dans le cadre du Projet Delphis, géré par l'organisation de protection de la nature *Earthtrust*, les biologistes du parc marin d'Hawaii mènent des recherches variées : l'écologie, la science des dauphins, évaluation de l'intelligence de ces animaux grâce à la utilisation d'écrans d'ordinateurs tactiles placés sous l'eau etc. Les animaux ne reçoivent pas de nourriture comme récompense, de sorte que l'on étudie leurs comportements volontaires.

L'une des activités les plus fascinantes que nous observons ne nécessite aucune récompense : les dauphins s'amuse à brasser l'eau à l'aide de leurs nageoires et à souffler des bulles dans les tourbillons qu'ils provoquent, créant ainsi des ronds et des spirales d'air, à la manière des fumeurs qui font des ronds de fumée. On connaissait depuis longtemps l'intelligence des dauphins, mais l'observation de ces ronds prouve l'étendue de leur imagination.

Inspirant de l'air à la surface, les dauphins forment des bulles, lorsqu'ils expirent, sous l'eau. Quand les animaux sont agités, surpris ou curieux, ils soufflent parfois l'air par leurs évents, formant ainsi de grandes bulles amorphes qui remontent rapidement à la surface. Lorsqu'ils émettent des sons, ils créent des bulles, de petites grappes de petites bulles ; il est possible que ces dernières leur permettent d'ajouter un signal, détectable par la vue ou par sonar, à leur message vocal.

Les dauphins peuvent également créer des types de bulles plus étonnants pour des raisons moins prosaïques : au cours des dernières années, des biologistes de divers zoos marins ont décou-



Ken Marten, Suchi Psarakos et Don J. White, Earthtrust

vert que plusieurs mammifères font des ronds d'air stables, qui flottent dans l'eau durant quelques secondes. Les techniques utilisées pour faire ces ronds sont si complexes qu'elles ont été observées chez certains mammifères marins. Les ronds ne sont certainement pas un signal d'alerte ni une forme de communication habituelle. Par exemple, Wolfgang Giewilg, du zoo de Duisbourg, en Allemagne, a observé des dauphins du fleuve Amazone (*Inia geoffrensis*) qui, sans entraînement, jouaient à faire des ronds de bulles, qu'ils traversaient ou qu'ils faisaient éclater.

En Californie, Diana Reiss et Jan Ostma-Lund ont constaté que les dauphins *Tursiops truncatus* jouaient à faire des ronds de bulles similaires à ceux que nous avons observés. À l'Aqua-

rium de Monterey, Ken Marten a observé des bélugas *Delphinapterus leucas* qui, pour jouer, expulsaient des bulles de leurs évents et les avalaient ensuite. Les dauphins sauvages font également des bulles d'air : la biologiste Karen Pryor a observé des dauphins du Pacifique (*Stenella attenuata*) qui produisaient des bulles lorsqu'ils rencontraient d'autres dauphins, et

Denise Herzog, de l'Université de Floride, a observé des techniques équivalentes chez les dauphins *Stenella frontalis* ; enfin le photographe Elin Nicklin a vu des bélugas de la baie de Esquimau, au Canada, qui rejetaient des ronds d'air en fermant de manière répétée les mâchoires, probablement pour manifester leur agressivité.

## Une tradition hawaïenne

Au cours des cinq dernières années, à Hawaii, nous avons observé 17 dauphins souffleurs de notre delphinarium. Neuf d'entre eux, d'âge compris entre un an et demi et trente ans, produisaient des ronds d'air. Les recherches que nous avons menées dans d'autres zoos marins ont montré que, dans

avec des collègues du monde entier indiquent que la production de ronds est plus courante à Hawaii que dans n'importe quel autre aquarium : ici, les dauphins semblent avoir une sorte de « tradition des ronds », les jeunes apprenant grâce aux animaux plus âgés, qui, d'une certaine manière, transmettent la tradition.

La production de ronds étant une activité volontaire, les animaux ne s'y adonnent que lorsqu'ils en ont envie, jamais sur commande ou pour obtenir de la nourriture en récompense. En outre, la production de ronds ne semble pas associée à des comportements fonctionnels tels que l'alimentation ou l'activité sexuelle. Aussi cette activité

**1. LE DAUPHIN KAIKO'O, du Zoo de Hawaii (à droite), fait un rond d'air avec lequel il joue. Le laboratoire du zoo (en haut sur cette page) comporte une fenêtre sous-marine, d'où l'on observe le remarquable comportement des animaux.**



est-elle imprévisible et difficile à étudier. Progressivement nous avons constitué un stock de photographies et de film qui montrent les dauphins jouant à faire des ronds. Ces images donnent quelques idées sur la technique des ronds, mais elles sont un faible aperçu de toute l'étendue des talents des dauphins.

Ceux-ci semblent employer trois techniques de base pour produire ces ronds. Parfois ils rejettent simplement des bulles à travers leurs événements ; ces bulles deviennent des halos d'air qui s'étendent alors que leur épaisseur

diminue à mesure qu'ils remontent à la surface (voir la figure 2). Le mâle adulte Kaiko'o, par exemple, sait produire deux bulles successivement et les mêle ensuite en un seul rond.

La physique de ce type de ronds est simple : toute bulle sphérique de plus de deux centimètres de diamètre se transforme très vite en un tore, parce que la pression est supérieure à sa base (la pression de l'eau augmente avec la profondeur). La bulle s'écrase progressivement et, quand la pression à sa base est supérieure à la tension superficielle de la sphère, un trou se forme au centre de la bulle, qui devient un tore.

Lors de cette transformation, un tourbillon se forme autour de la bulle. Tout rond tourbillonnant se déplace dans la même direction que le dauphin qui traverse son centre ; dans le cas de ces simples ronds, le tourbillon et le tourbillon les propulse vers la surface. Bien que ce phénomène soit assez simple, les dauphins ne font pas de ronds stables sans entraînement, ce qui laisse penser que d'autres facteurs, telle la façon dont l'air est éjecté de l'événement, doivent être pris en compte.

D'autre part, certains dauphins produisent également des ronds qui se

déplacent horizontalement ou vers le bas. Pour obtenir de tels ronds, ils nagent rapidement, couchés sur le côté, de sorte que leur nageoire latérale soit verticale. En poussant cette nageoire vigoureusement, ils créent un tourbillon invisible qui se déplace horizontalement ou vers le bas. Après s'être

inséparée du tourbillon, à l'aide de leur événement, les dauphins produisent souvent une série de clics audibles avant de rejeter de l'air, ce qui indique qu'ils utilisent leur sonar pour localiser le tourbillon invisible). Comme la pression est inférieure, au centre du tourbillon, l'air se concentre au centre et se répartit en tore (voir la figure 4).

Les ronds ainsi formés atteignent plus de 60 centimètres de diamètre et plus d'un centimètre d'épaisseur ; ils se déplacent avec le tourbillon. En agitant la nageoire latérale, les dauphins étendent parfois un rond plus petit du rond initial et s'amuse ensuite à le déplacer dans l'eau.

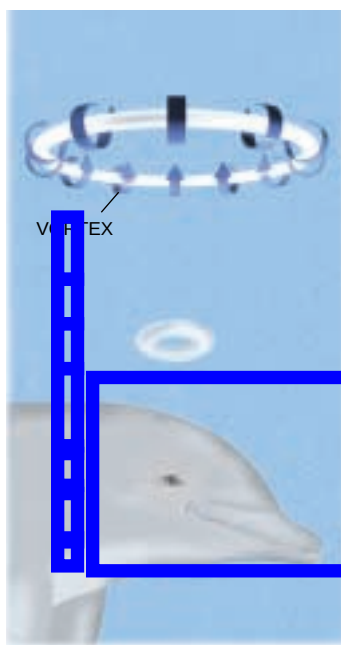
Il existe plusieurs variantes de cette technique. La femelle adulte Laka, par exemple, se met souvent en position verticale, tête vers le bas et queue vers le haut ; elle agit alors sa nageoire caudale vers le bas, afin de former un tourbillon puis elle souffle de l'air dans celui-ci à l'aide de son événement ou de sa bouche. Parfois, elle tourne rapidement l'air dans le tourbillon en abaissant rapidement sa nageoire caudale. Et nous avons également observé un dauphin qui laissait échapper des bulles de son museau, les faisait glisser le long de son corps et les transformait en ronds lorsqu'elles atteignaient sa nageoire. Elle est même capable de gonfler un rond en y ajoutant de l'air après coup.

## Comme la bulle

La troisième méthode de création de ronds n'est une preuve de la capacité d'expérimentation des dauphins. En quelques occasions, nous avons observé la jeune femelle Tinkerbelle, fille de Laka, qui formait des hélices d'air en utilisant une technique et mis au point deux méthodes distinctes. Parfois elle libère un groupe de petites bulles tout en nageant en rond le long de la paroi du bassin ; elle se retourne alors brusquement, de sorte que, lorsque sa nageoire dorsale effleure les bulles, le tourbillon formé regroupe les bulles en une hélice de trois à cinq mètres

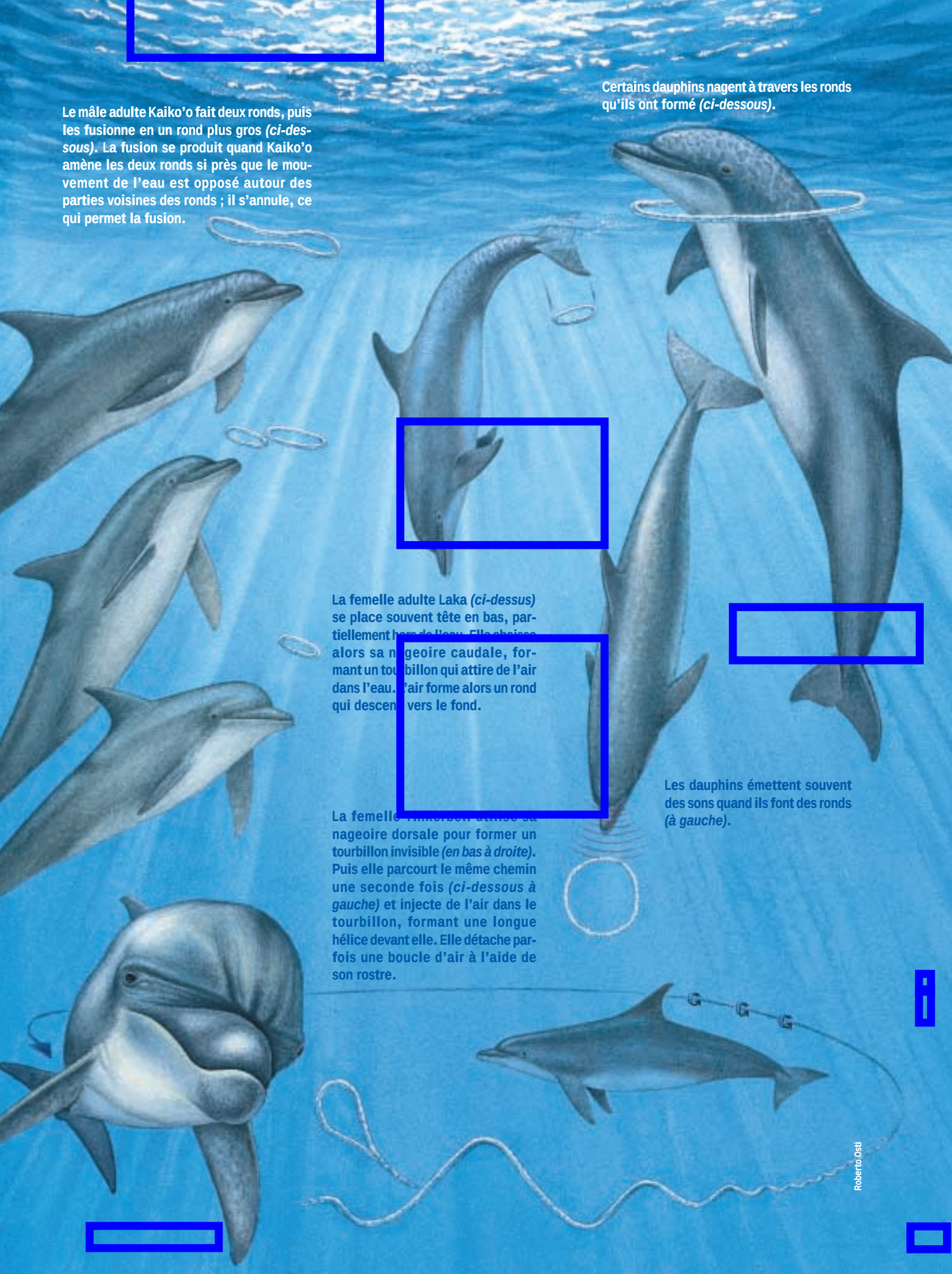


Ken Marten, Suchi Psarakos et Don J. White, Earthtrust



Laurie Grac

**2. LES RONDS D'AIR** s'élargissent en s'aminçant quand ils remontent vers la surface, emportés par un tourbillon (flèches). Le tourbillon stabilise le rond et bloque sa dissociation en petites bulles indépendantes. Les photographies de gauche (de bas en haut) montrent Kaiko'o en train de faire un rond qu'il suit.



Le mâle adulte Kaiko'o fait deux ronds, puis les fusionne en un rond plus gros (*ci-dessous*). La fusion se produit quand Kaiko'o amène les deux ronds si près que le mouvement de l'eau est opposé autour des parties voisines des ronds ; il s'annule, ce qui permet la fusion.

Certains dauphins nagent à travers les ronds qu'ils ont formé (*ci-dessous*).

La femelle adulte Laka (*ci-dessus*) se place souvent tête en bas, partiellement hors de l'eau. Elle choisit alors sa nageoire caudale, formant un tourbillon qui attire de l'air dans l'eau. L'air forme alors un rond qui descend vers le fond.

La femelle Pinkerton utilise sa nageoire dorsale pour former un tourbillon invisible (*en bas à droite*). Puis elle parcourt le même chemin une seconde fois (*ci-dessous à gauche*) et injecte de l'air dans le tourbillon, formant une longue hélice devant elle. Elle détache parfois une boucle d'air à l'aide de son rostre.

Les dauphins émettent souvent des sons quand ils font des ronds (*à gauche*).

de long (voir figure 3). Nous avons également vu Tinkerbelle nager dans le bassin en suivant une trajectoire légèrement incurvée, laissant sur son sillage un tourbillon invisible formé par sa nageoire dorsale ; en refaisant le chemin inverse, et en soufflant de l'air directement dans le tourbillon, elle produisait une longue hélice, devant elle.

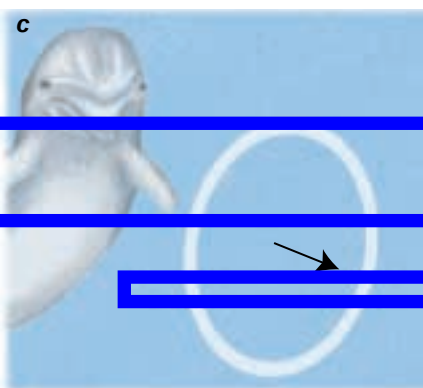
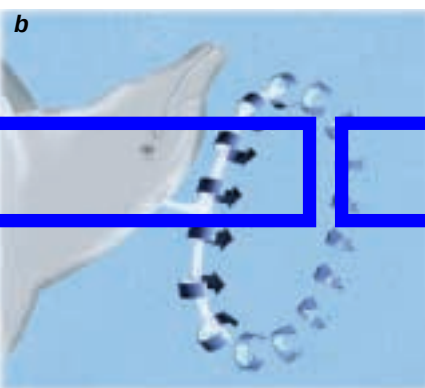
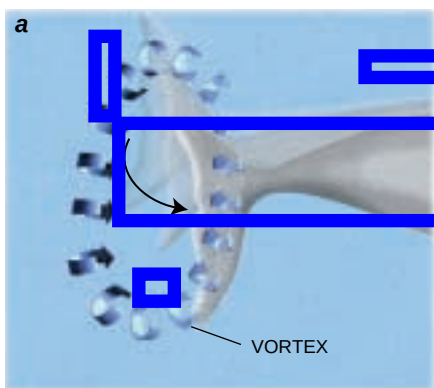
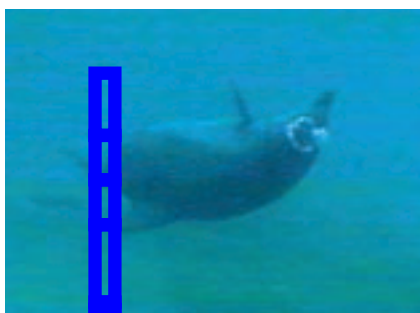
Cette technique de création de la pression inférieure du centre du tourbillon : lorsque les bulles sont placées dans le tourbillon, elles sont attirées vers le centre, fusionnent et s'étirent en un tube hélicoïdal. Généralement, un tube d'air dans l'eau est instable, et il se divise en bulles plus petites. Toutefois tous les ronds et spirales créés par les dauphins sont lisses et stables,

à l'exception de la variation de pression au sein du tourbillon (pression inférieure au centre, supérieure vers les bords) stabilise le tube en atténuant les irrégularités déstabilisatrices.

Si Tinkerbelle est la seule que nous ayons vue créer des hélices, la production de ronds s'est propagée à tous les dauphins du zoo, les novices assimilant la technique en côtoyant leurs congénères. Nous avons même observé les progrès d'un jeune dauphin : initialement ses ronds étaient instables et mal formés, mais, après deux mois d'entraînement, il faisait des ronds réguliers, qui subsistaient plusieurs secondes. Des dauphins plus âgés ont également appris à faire des ronds. Le mâle adulte Keola vivait dans le bassin de recherche depuis deux ans,

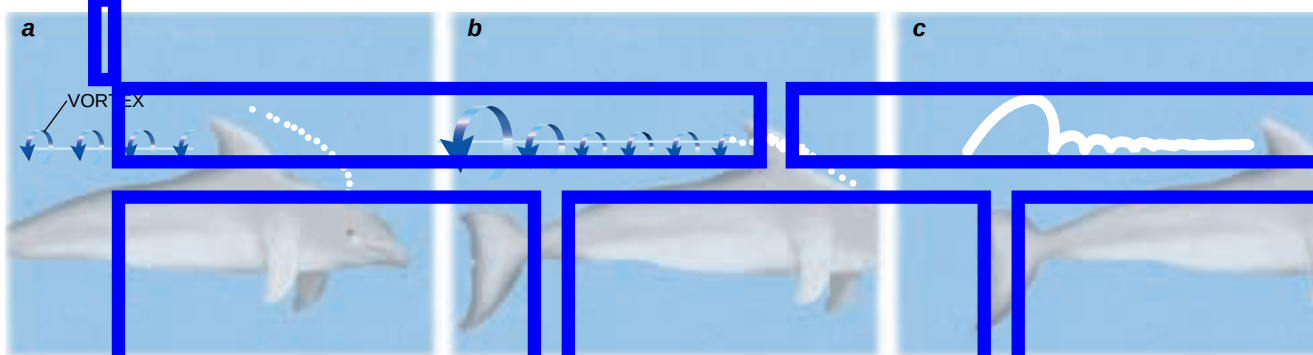
avec des congénères qui ne faisaient pas de ronds ; à cette époque, nous ne l'avons jamais vu en faire non plus. Cependant, quand on a mis son frère Kaiko dans le même bassin, nous avons vu Keola observer les ronds et apprendre à en faire. En quelques mois, il a perfectionné ses ronds.

Les dauphins qui ne savent pas faire de ronds surveillent attentivement leurs congénères qui les font. Ils ne s'intéressent qu'ils n'ont pas les intéressent. En plusieurs occasions, nous avons vu Keola et Laiko'o, côte à côte au fond du bassin, qui formaient de grands ronds, soit simultanément, soit à peu d'intervalle. Nous avons également vu une femelle, qui nageant derrière une autre femelle qui faisait des ronds, faisait ses propres ronds en regardant la première.



**3. EN NAGEANT SUR LE CÔTÉ,** les dauphins forment des ronds qui se propagent horizontalement. Le mouvement horizontal de la nageoire crée un tourbillon qui suit la trajectoire de l'animal (a). Le dauphin se retourne alors et injecte de l'air dans le tourbillon (b) : l'air est

attiré au centre du tourbillon (c), formant un tore qui se déplace horizontalement. Les photographies ci-dessus montrent la femelle Laka en train de placer l'air dans le tourbillon et d'inspecter le rond qu'elle a formé.



**4. SEULE LA FEMELLE TINKERBELL** sait former des hélices d'air (photographies ci-dessus). Elle émet une succession de bulles tout en produisant un tourbillon hélicoïdal avec sa nageoire dorsale (a). Quand les bulles rencontrent le tourbillon (b), elles sont attirées par lui et finissent en une longue colonne (c). La dernière photographie montre que Tinkerbelle est satisfaite de son œuvre.

Les dauphins nous ont même invités à jouer avec eux. Un jour, au cours d'une période de jeu, Tinkerbelle a produit plusieurs ronds avant de venir devant la fenêtre du laboratoire, derrière laquelle l'un d'entre nous (S. Psarakos) la filmait. Une autre fois, alors que nous faisions des bulles de savon dans le laboratoire, nous avons vu un des dauphins qui se mettait à faire des ronds près de la fenêtre du laboratoire.

Nous poursuivons cette étude sur les dauphins et leurs ronds, parce que nous voulons comprendre leur comportement étonnant. Les dauphins sont, en dehors des primates, les seuls animaux qui aient une conscience d'eux-mêmes, de sorte que leurs jeux et leurs comportements devraient nous éclairer sur la nature de l'intelligence. Pourquoi tant de sociétés humaines méprisent-elles les dauphins? Les pêcheurs continuent de les prendre

dans leurs filets de pêche au thon ou dans leurs filets dérivants, de mettre des boîtes à la place de la viande de baleine, de les abattre pour appâter les crabes et de les chasser pour le plaisir. L'association Earthtrust se préoccupe de cette situation, mais nous

pensons que seul un changement fondamental des populations humaines résoudra le problème. En montrant l'intelligence des dauphins, nous espérons changer les mentalités et mettre un terme au massacre aveugle de ces créatures fascinantes.

Ken MARTEN, Karim SHARIFF, Suchi PSARAKOS et Don WHITE étudient les ronds des dauphins au Parc marin d'Hawaï.

T.S. LUNDGREN et N.N. MANSOUR, *Vortex Ring Bubbles*, in *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 225, pp. 177-196, mars 1991.

Ken MARTEN et Suchi PSARAKOS, *Evidence of Self-Awareness in the Bottlenose Dolphin (Tursiops truncatus)*, in *Self-Awareness in Animals and Humans: Developmental Perspectives*, sous la direction de S.T. Parker, R.W. Mitchell et M.L. Boccia, Cambridge University Press, 1994.

Ken MARTEN et Suchi PSARAKOS, *Using*

*Self-View on Television to Distinguish between Self Examination and Social Behavior in the Bottlenose Dolphin (Tursiops truncatus)*, pp. 205-224, and related article on animal consciousness in *Consciousness and Cognition*, vol. 4, pp. 205-269, juin 1995.

L'Association Earthtrust a un site sur le réseau Internet à l'adresse earthtrust@aloha.net. Son adresse est : 25 Kaneohe Bay Drive, Kailua, HI 96734, USA.

Un film au format Quicktime est disponible sur le site World Wide Web à l'adresse : <http://www.sciam.com/>.

# Mathématiques sans se lacer?

IAN STEWART

*Les principes de l'optique géométrique montre la supériorité absolue du laçage de type américain.*

Qui peut se dire mathématicien? Il y a quelques années, dans un rare éclair de lucidité, il m'apparut qu'un mathématicien est quelqu'un qui saisit toute opportunité de faire des mathématiques, là où d'autres ne voient pas une possible mathématisation du problème.

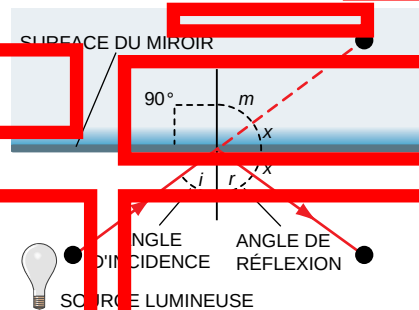
Considérez des lacets de chaussures. Comment traiter mathématiquement ces problèmes – qu'il nous faudra inventer – concernant des lacets de chaussures? J'ai appris l'existence de tels problèmes dans l'article *Le problème des lacets de chaussures*, de John Halton, publié dans le numéro d'automne 1993 de *Mathematical Intelligence*.

Le problème est d'énoncé simple : comment lacer le plus économiquement possible votre chaussure? Il existe au moins trois manières usuelles de lacer

des chaussures (voir la figure 1) : le «zigzag américain», le «collet européen» (d'où dérive le terme «collet monté», plus sans doute à propos de corsets que de chaussures) et l'expéditif «gavage». Pour l'utilisateur, les styles de laçages peuvent différer par leurs esthétiques et les temps qu'ils requièrent. Le fabricant de chaussures se pose une autre question : avec quel type de laçage les lacets sont-ils les plus petits (et donc les moins coûteux)?

Pour déterminer la longueur de lacet, je ne m'intéresserai qu'à celle des segments rectilignes, la quantité supplémentaire de lacet utilisée pour le nouer étant la même pour toutes les méthodes et pouvant donc être ignorée.

La terminologie sera celle du lacet vue par l'utilisateur, de sorte que la paire d'œillets «du haut» est celle près de la cheville. De même, j'idéaliserai le



2. Selon le principe de Fermat, la lumière choisit le trajet le plus court pour aller d'un point à un autre : on prouve alors que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

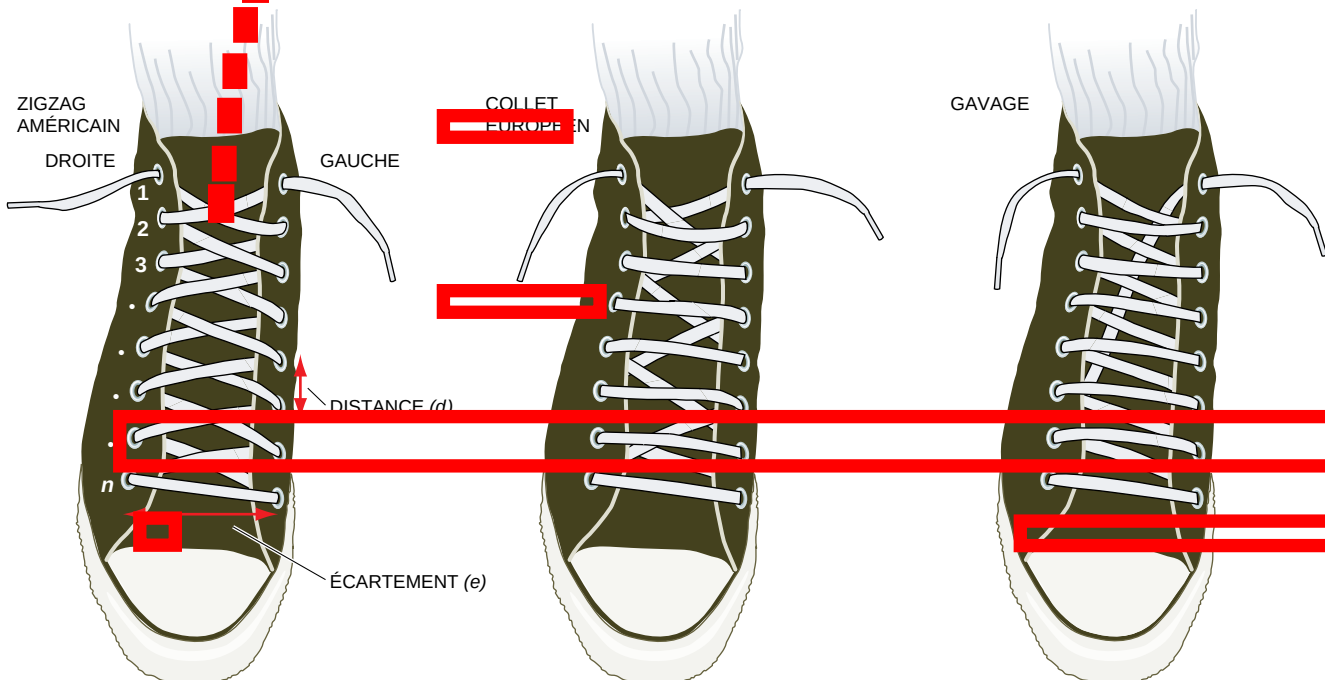
lacet par une ligne sans épaisseur, et les œillets par des points. Une attaque frontale du problème consiste à exprimer la longueur du lacet en fonction de trois paramètres :

- le nombre  $n$  de paires d'œillets,
- la distance  $d$  entre deux œillets verticalement successifs,
- l'écartement  $e$  entre deux œillets d'une même paire.

À l'aide du théorème de Pythagore (je me demande ce que le grand homme aurait pensé de cette application!), il est aisé de montrer que les longueurs des lacets sont les suivantes :

- américain :  $e + 2(n-1)\sqrt{d^2 + e^2}$
- européen :  $n\sqrt{d^2 + e^2} + (n-2)\sqrt{4d^2 + e^2}$
- gavage :  $(n-1)e + (n-1)\sqrt{d^2 + e^2} + \sqrt{(n-1)^2d^2 + e^2}$

Laquelle est la plus petite? Supposons, pour fixer les idées, que  $n$  est



1. Il y a plusieurs manières de lacer ses chaussures ; nous en étudierons trois : le laçage américain, le laçage européen et le gavage. Lequel de ces trois types correspond-il à la plus petite longueur de lacet?

égal à 8, comme sur la figure,  $d = 1$  et  $e = 2$ . Les longueurs sont alors :

- américain :  $2 + 14\sqrt{5} = 33,30495...$
- européen :  $14 + 2\sqrt{5} + 6\sqrt{8} = 35,443...$
- gavage :  $14 + 7\sqrt{5} + \sqrt{53} = 36,9325...$

Pouvons-nous être certains que le laçage américain soit toujours le plus court? Un traitement algébrique précis montre qu'il l'est si  $d$  et  $e$  sont non nuls et si  $n$  est au moins égal à 4, alors les laçages sont, dans l'ordre des longueurs croissantes : l'américain, l'euro-péen et celui dénommé gavage. Si  $n = 3$ , l'américain est encore le plus court, mais les deux autres sont égaux. Si  $n = 2$ , alors les trois laçages sont de même longueur, mais qui, autre qu'un mathématicien, se préoccuperait d'un tel cas? Cette approche algébrique est compliquée et ne nous éclaire pas sur ce qui rend tel ou tel laçage plus efficace.

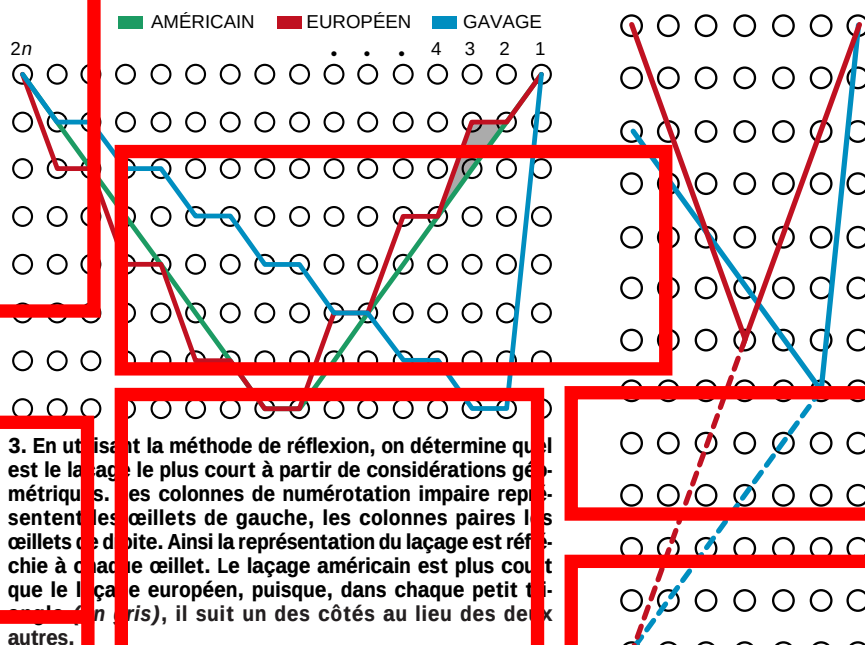
### L'APPROCHE GÉOMÉTRIQUE

Attaquant le problème sous un autre angle, J. Halton observe qu'un artifice géométrique astucieux rend manifeste que le laçage américain est le plus court des trois. L'idée est inspirée de l'optique géométrique, l'étude des trajectoires des rayons lumineux.

Il y a longtemps, les mathématiciens ont découvert que la géométrie des rayons lumineux peut être rendue plus lumineuse (c'est le cas de le dire) en appliquant de judicieuses réflexions pour rendre rectilignes des trajectoires anguleuses. Par exemple, pour justifier la classique loi de la réflexion «l'angle de réflexion est égal à celui d'incidence», on examinera un rayon lumineux frappant un miroir et rebondissant sur celui-ci. Si on envisage le symétrique de la deuxième partie de la trajectoire par rapport au plan du miroir (voir la figure 2), on obtient avec la première partie, une trajectoire perçant ce plan et pénétrant le monde d'Alice au-delà du miroir.

Suivant le principe du temps de parcours minimal, une propriété générale des rayons lumineux énoncée par Pierre de Fermat, une telle trajectoire doit atteindre son but en un temps le plus court possible, ce qui, ici, signifie qu'elle doit être un segment de droite. Dessinons la normale au miroir au point d'incidence. Alors, l'angle noté  $m$  sur la figure est égal à l'angle d'incidence  $i$  : de plus, les deux angles marqués  $x$  sont égaux, mais  $m + x = 90$  degrés, et si  $r$  est l'angle de réflexion,  $r + x = 90$  degrés. Par conséquent,  $m = r = i$ .

J. Halton utilise une extension de ces représentations géométriques pour les trois types de laçages. Il dessine un diagramme (voir la figure 3) fait de  $2N$



3. En utilisant la méthode de réflexion, on détermine quel est le laçage le plus court à partir de considérations géométriques. Les colonnes de numérotation impaire représentent les œillets de gauche, les colonnes paires les œillets de droite. Ainsi la représentation du laçage est réfléchie à chaque œillet. Le laçage américain est plus court que le laçage européen, puisque, dans chaque petit triangle (voir la figure 3), il suit un des côtés au lieu des deux autres.

colonnes d'œillets espacées verticalement d'une distance  $d$ . Deux colonnes successives sont espacées d'une distance  $e$  (nous avons réduit la valeur de  $e$ , mais la méthode fonctionne pour toutes les valeurs de  $d$  et de  $e$ ). La dernière colonne représente la colonne des œillets de gauche, et ainsi de suite alternativement.

Les lignes polygonales zigzaguant au travers du diagramme correspondent aux laçages, mais avec un «truc» complémentaire. Partant de l'œillet du haut à gauche, on dessine le premier segment du laçage en joignant, de droite à gauche, la colonne 1 à la colonne 2, mais le segment suivant sera tracé entre les colonnes 2 et 3 au lieu de revenir de la colonne 2 à la colonne 1, comme sur une véritable chaussure : le segment réel est reflété comme si la colonne d'œillets était un miroir. On continuera ensuite de même, chaque segment étant reflété dans le miroir-colonne d'où il part. Alors le tracé zigzaguant entre deux colonnes d'œillets est remplacé par une ligne progressant toujours vers la gauche.

Les réflexions n'altérant pas la longueur d'un segment, cette représentation a exactement la même longueur que le laçage effectif qu'elle représente, avec un avantage supplémentaire toutefois : il est très facile de comparer les longueurs des laçages américain et européen. À part quelques segments où ils coïncident, le laçage américain décrit un côté d'un petit triangle là où le laçage européen parcourt les deux autres côtés. Comme la somme de deux côtés d'un triangle est supérieure au troisième côté, puisque la ligne droite est le plus court chemin entre deux points, le laçage américain est, à l'évidence, le plus court.

4. Pour comparer le laçage européen et le gavage, on élimine les segments communs horizontaux. Les tracés réduits, reflétés sur des miroirs horizontaux, montrent finalement que le laçage européen est le plus court.

Il n'est pas aussi manifeste que le gavage est plus long que le laçage européen. La manière la plus simple de rendre cela clair est d'éliminer des deux tracés tous les segments horizontaux (il y en a  $n - 1$  dans chacun d'eux, contribuant donc, pour la même longueur, aux deux tracés), ainsi que les deux paires de segments obliques de même longueur. Il en résulte deux représentations en forme de V. On décalera le laçage européen pour qu'il parte de l'œillet en haut à droite. Si chaque parcours est à présent «redressé» par réflexion autour de l'axe horizontal passant par la pointe du V, il est alors clair que le laçage européen est le plus court, toujours parce qu'un côté d'un triangle est plus court que la somme des deux autres.

### LE PLUS COURT LAÇAGE

Ces astucieux artifices de réflexion sont plus performants qu'on ne le pense. J. Halton les utilise pour prouver que le laçage américain en zigzag est le plus court de tous les laçages possibles. Plus généralement, les laçages de chaussures et l'optique à la Fermat sont des domaines de la théorie mathématique des géodésiques, les courbes de plus court chemin, dans diverses géométries. Les réflexions dans des miroirs répondent à des questions fondamentales en physique, et elles confirment l'absolue supériorité de la méthode américaine de laçage des chaussures.

# Démographie et sens giratoire

CHRISTOPH PÖPPE

*Les relations entre les mathématiques et la biologie sont souvent torueuses et abstraites.*

J'avais encore les jambes en coton quand je montais à l'intérieur de l'Arc de Triomphe. Au volant de sa petite voiture, mon hôtesse venait de me faire traverser l'immense place Charles de Gaulle avec tant de fougue que j'avais cru ma dernière heure arrivée. Comment traverser un tel chaos et survivre ? «C'est tout simple, m'avait-elle dit, d'abord, il faut viser, et puis on tire !»

Après ce que je venais de vivre, j'appréciais la régularité de ces escaliers. Mon mouvement aurait été périodique, s'il n'avait été superposé à un mouvement ascendant quasi linéaire.

J'étais ainsi perdu dans mes pensées, faisant l'éloge de ce qui est prévisible, lorsque l'imprévisible se produisit ! À peine avais-je posé le pied sur la terrasse ensoleillée de l'Arc de Triomphe que je vis une inconnue dont mon regard n'arrivait plus à se détacher.

Quand il s'agit d'une inconnue, on commence par la nommer («soit  $x$  le nombre réel cherché...»). Secrète-

ment, j'ai nommé Heidi, à cause de ses grands yeux enfantins, à la fois craintifs et désapprobateurs, qui fixaient le grouillement de la place, en contrebas. De toute évidence, elle venait de subir une épreuve semblable à la mienne ; cela m'aide à surmonter ma timidité et à l'aborder.

La circulation automobile n'est pas un thème idéal pour lier connaissance, mais avant même de nous en rendre compte, nous étions en grande conversation, en train de remailler le monde. Allemande, comme moi, elle aimait l'ordre et craignait ce chaos, qu'elle jugeait typiquement français, et elle pensait qu'il était possible d'y remédier. Ne pourrait-on pas, par exemple, matérialiser les couloirs de circulation et les directions à prendre par un fléchage sur la chaussée ?

«Cela ne servirait pas à grand-chose, m'empressais-je de lui répondre, tout en analysant le problème de manière fondamentale. Tu penses certainement à des flèches qui indiqueraient, en tout point

de la place, et à chacun des automobilistes, la direction qu'il doit suivre.

– Oui.

– Et disposées de telle manière que deux flèches provenant de directions différentes ne conduisent pas à un même point, ou qu'elles ne partent pas d'un même point dans des directions différentes ?

– Évidemment. Il s'agit d'éviter les collisions.

– Oui, mais les automobilistes n'auraient alors plus le choix de la rue par laquelle ils doivent quitter la place.

– Comment cela ?

– La trajectoire d'une voiture est une courbe sur cette place, et une flèche représente une tangente à cette courbe. Si tu assures telle indication en tout point de cette place et si tu arrives avec ta voiture en n'importe quel point, il n'y aura qu'un seul chemin possible en respectant la signalisation.»

Elle me regarda alors d'un air si curieux que je m'empressais de poursuivre mon raisonnement : «Évidemment, on pourrait déjà matérialiser la présélection sur les rues d'accès et dresser des flèches de direction à l'entrée de l'ensemble de la place, pour que les véhicules qui arrivent sur une file de présélection puissent, dès le départ, se répartir en fonction de leur voie de sortie. Toutefois, si l'on applique ce principe pour chacune des rues débouchant sur la place, il devient impossible d'éviter les croisements de files, ce qui va à l'encontre de la nature même du champ de vecteurs.

– Qu'est-ce qu'un champ de vecteurs ?

– En chaque point, on trouve une indication de direction – qui constitue en fait également une indication de vitesse, mais cela n'a pas d'importance dans le cas présent. Des voitures qui suivraient un tel champ de vecteurs et qui ne pourraient pas s'éloigner à leur gré finiraient soit par tourner en rond sans fin, soit par s'approcher d'un point pour y rester bloquées.»

Heidi fronça les sourcils d'un air irrité : «Est-ce que cela signifie qu'elles vont toutes se heurter en ce point ?

– Non, car le champ de vecteurs est continu. En s'approchant d'un point stationnaire, la vitesse des voitures se réduirait progressivement pour tendre vers zéro. Et d'ailleurs, ce sont des points...»

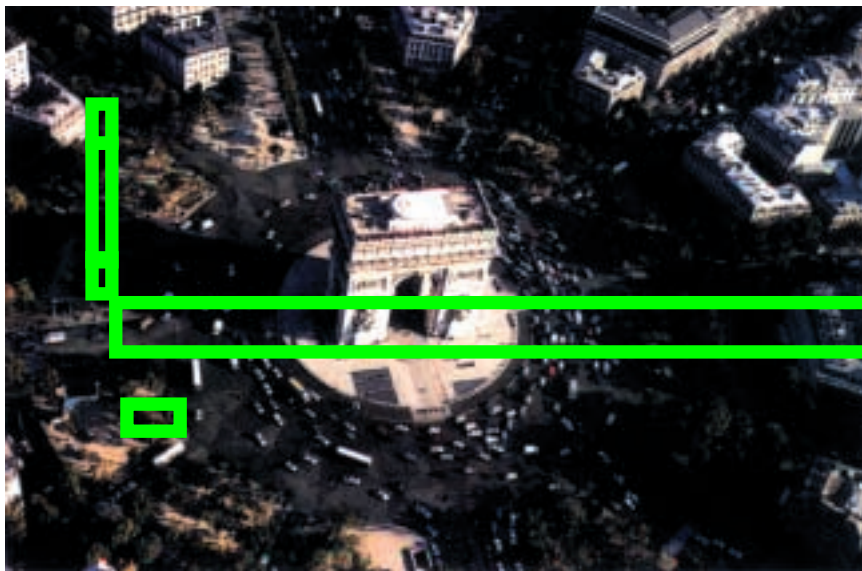
Je vis alors de la souffrance dans son regard, et avant que je puisse lui demander si elle se sentait mal, elle me devança et me demanda :

«Tu ne serais pas mathématicien ?

– Si.

– C'est donc ça !»

Que pouvais-je répondre à cela et à son expression résignée ? Silence confus...



Yann Arthus-Bertrand/Alitude

**1. Une circulation sans croisements est impossible autour de l'Arc de Triomphe. Cet énoncé, démontrable mathématiquement, a des implications dans des domaines variés.**

## DYNAMIQUE DES POPULATIONS ET MOUVEMENTS GIRATOIRE

Puis les traits de Heidi se détendirent. Les yeux fermés, elle laissait le soleil caresser son visage et rayonnait, comme si elle pensait à quelque chose de très beau.

«À quel penses-tu, me hasardai-je à lui demander?

– Je rêve d'une île déserte.»

Mon imagination se mit à errer. Les mers du Sud, des palmiers, le soleil, Heidi et moi...

«Terre-Neuve au large de la côte Est du Canada», reprit-elle. C'est très isolé, et près de la moitié de l'île est couverte par la toundra, des marécages et des marais. Le sol dégèle trois mois par an environ.

– Ah bon.

– C'est très intéressant.

– Vraiment?

– Oui, car les espèces de mammifères y sont rares.»

Elle ne se laissa pas démonter par mon air dubitatif et poursuivit : «Il y a des lièvres arctiques, des lièvres américains, des caribous, des lynx et quelques autres espèces de moindre importance. On observe une variation pluriannuelle très régulière des populations de ces animaux. Chaque fois que les lièvres américains sont très nombreux, le nombre des lynx augmente l'année suivante, ce qui entraîne ensuite une diminution du nombre des lièvres américains. L'effectif des lynx décroît alors, et ce processus se répète tous les dix ans environ. Les populations de caribous et de lièvres arctiques suivent ces variations avec un léger décalage. Le plus intéressant dans tout cela, c'est que si l'on examine des caribous morts au printemps, on constate qu'ils ont la plupart du temps été mordus par des lynx (voir *Changement de proie dans un écosystème simple*, par Arthur Bergerud, *Pour la Science*, février 1984).

– Et ça te plaît d'aller disséquer des caribous morts dans les étendues glacées de Terre-Neuve?

– Mais oui ! On a même remarqué que certains abcès purulents...

– Tu n'es pas biologiste?

– Si.

– C'est donc ça !»

À nouveau silence confus. Je cherchai désespérément un sujet de conversation favorable.

Tout d'un coup, une idée me vint : «Eh, bon !

«Mais c'est la même chose que les voitures autour de nous !»

Manifestement, Heidi ne comprenait pas.

«Mais si, poursuivis-je. Tu m'as dit toi-même que seuls les lynx et ces petits lièvres étaient importants.

2. Courbes des intégrales du champ de vecteurs complexe  $u(z)$  : Les courbes obtenues dépendent des coordonnées du point  $c$  dans le plan complexe. Contrairement à l'habitude, l'axe réel est ici dirigé vers le haut. Lorsque  $c$  varie le long de la circonférence d'un cercle, l'étoile prend la forme de spirales logarithmiques qui deviennent de plus en plus serrées jusqu'à former une famille de cercles.

– Le lièvre américain *Lepus americanus*, s'il te plaît, à ne pas confondre avec le lièvre arctique *Lepus arcticus*. Mais là, ça va, c'est vrai.

– Et bien voilà ! Puisque tu connais le nombre de lynx  $x$  et le nombre de lièvres  $y$ , tu peux marquer un point  $(x, y)$  dans un système de coordonnées.

– Ah...

De nouveau, ce regard de madone douloureuse me poussa à enchaîner sans attendre :

«L'état de ton système est alors représenté par un point dans un plan à deux dimensions.

– ou par deux nombres réels, ce qui revient au même. On détermine facilement le mouvement de ce point, qui représente l'état de la population animale, car je pense que si les lynx mangent les lièvres, l'inverse n'est pas vrai.

– Et si les lièvres ne se font pas manger, ils vont se multiplier comme des lapins.

– Non, car leur comportement sexuel est très différent.

– Je voulais simplement dire que l'augmentation de leur effectif est proportionnelle à leur nombre. Ce qui veut dire qu'en chaque point correspondant à un temps donné, la dérivée temporelle sera proportionnelle à ce nombre lui-même.

– La dérivée temporelle?

– Oui, le truc classique,  $y(t+h)$  moins  $y(t)$ , divisé par  $h$ . Et ensuite, on fait tendre la valeur limite de  $h$  vers zéro.

– Tu veux dire que les lièvres d'aujourd'hui moins les lièvres d'hier, divisés par un bon vieux  $h$ , nous donne le nombre de lièvres nés par jour?

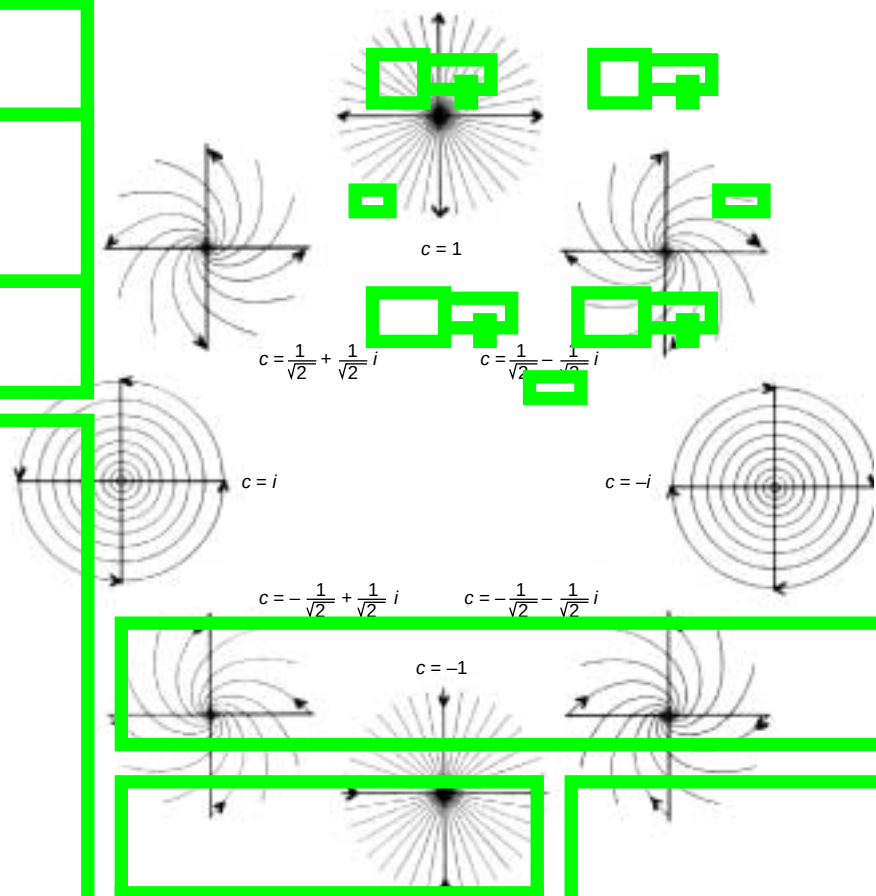
– Exactement. Et en plus,  $y$  dépend de manière continue de  $t$ , d'où  $y(t+h)$  tend vers  $y(t)$  lorsque  $h$  tend vers zéro, ce qui fait que le numérateur et le dénominateur de cette équation tendent tous deux vers une valeur infinitésimale, et alors tout dépendra de la valeur limite du quotient...

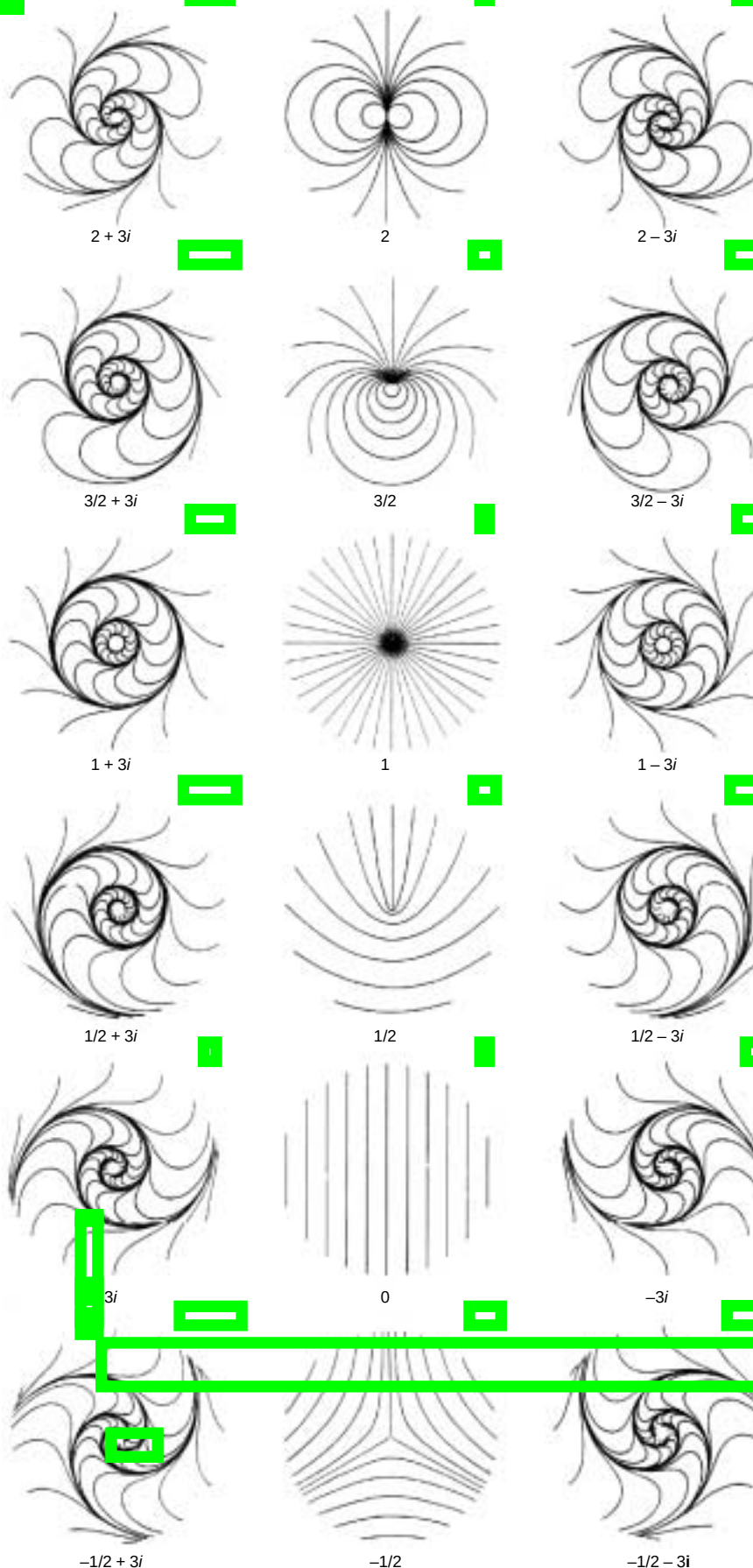
– Tendent vers une valeur infinitésimale? Comment vois-tu les choses? En millilièvres par seconde?

– C'est à peu près ça.»

Regard dévastateur :

«J'en étais sûre, les mathématiques ne sont que des bêtises. Un lièvre naît ou il ne naît pas. Je n'ai jamais entendu





Wilhelm Scharnowell

3. Diagrammes de la fonction complexe  $u(z) = z^n$  pour différentes valeurs de l'exposant  $n$ . Cette valeur est indiquée pour chacune des figures obtenues.

parler d'une hase qui serait un tout petit peu enceinte !

– Ne prends pas le formalisme à la lettre. Imagine qu'il y ait un grand nombre de lièvres. Un de plus ou de moins ne fera pas grande différence. À ce stade, on ne peut plus juger si la population évolue de manière continue ou par incréments.

– Bon, je veux bien, mais pourquoi tenir des raisonnements si déroutants ?

– Parce qu'on peut alors décrire tous les facteurs importants en termes mathématiques : reproduction, mort de faim, capture par un prédateur, prolifération des survivants.

– Mais ce n'est pas en se faisant dévorer qu'un lièvre fait plus de petits.

– Certainement pas, mais quand la nourriture est plus abondante, les portées sont plus nombreuses.

– D'accord, mais tout dépend aussi de la probabilité avec laquelle les lynx attrapent les lièvres. Comment peux-tu prédire de manière exacte combien de millièmes de lynx vont naître en plus par seconde grâce à la consommation de lièvres ?

– Je ne peux pas le dire de manière précise, mais, de nouveau, ces effets de hasard se compensent lorsqu'on considère des populations importantes. C'est pourquoi l'on peut dire avec certitude qu'il suffit de connaître l'état des populations à un instant pour pouvoir prévoir comment les populations évoluent ensuite. C'est ce qu'on appelle une équation différentielle : à chaque état est associée une indication définissant l'évolution de cet état à l'instant suivant. Ou en termes géométriques : à chaque point du plan est associée une flèche de direction.»

On devinait le combat intérieur que se livrait Heidi. Devait-elle prendre mes paroles au sérieux ? En tout cas, elle sembla prête à suivre ce raisonnement, du moins provisoirement. Elle enchaîna, en effet : « Si maintenant les lynx sont rares et les lièvres nombreux, alors  $x$  est petit et  $y$  grand, et l'état du système sera décrit par un point situé en haut dans un système de coordonnées. Si tel est le cas, les lynx disposeront d'une nourriture abondante et se multiplieront de sorte que le nombre des lièvres diminuera en conséquence. Et, si je comprends bien, il faudra que ce point une flèche dirigée en bas à droite.

– C'est tout à fait ça ! Les flèches sont nommées des vecteurs, et l'ensemble des flèches forme un champ de vecteurs. Tout cela n'est qu'un détail terminologique.

– Me voilà bien avancée, qu'est-ce que j'en tire ?

– Peut-être une solution de l'équation différentielle, qui constituerait une prévision de l'évolution de la population. Ou,

du moins, une représentation générale de celle-ci.

– Comment cela ? N'y a-t-il pas toujours une solution à cette équation ?

– Si. Le principe d'existence pour le problème de la valeur initiale dans le cas des équations différentielles ordinaires à terme lipschitzien... »

De nouveau, ce regard douloureux. J'avalai en vitesse le reste de ma phrase et lui dis : « Il y a généralement une solution, mais, à plupart du temps, on ne peut pas la calculer à l'aide de formules. Le problème est de dessiner dans le plan une courbe ayant son origine en un point donné, de sorte que sa tangente en tout point corresponde à la flèche de direction de ce point.

– Ah bon ! C'est comme si les voitures devaient suivre la flèche de direction. Ce n'est pour tant pas très difficile !

– Plus que tu ne le penses. Tu dois imaginer qu'une telle flèche est associée à chaque point. C'est-à-dire que, dès que tu suis la direction indiquée sur une distance infiniment petite, c'est de nouveau une autre direction qui s'impose. Ce n'est possible que si les directions ne changent pas brusquement d'un point à un autre.

– Et qu'est-ce que ça donne, comme courbes ?

– Cela dépend. Imagine que toutes les flèches pointent vers un lieu précis. Les courbes convergeront alors, elles aussi, vers ce point, et une voiture, par exemple, sera alors attirée vers ce point comme par un aimant. Lorsqu'on trace de telles courbes, on obtient une série de lignes qui rappelle les lignes de champ d'un aimant. Un tel point s'appelle un attracteur (voir la bas de la figure 2).

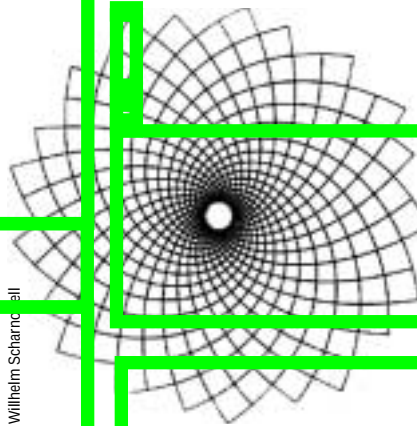
– Mais aucune force ne provient de ce point.

– Ce n'est pas indispensable, lui dis-je, histoire de faire avancer notre aventure. On peut se sentir attiré par quelqu'un sans que ce quelqu'un vous tire à lui. »

#### ATTRACTEURS ET PANNEAUX STOP

« Ben voyons, s'exclama une jeune femme qui nous avait écoutés ; les moustiques sont bien attirés par les lampadaires. Et le serpent arretière à flancs rouges : à peine une femelle sort-elle de son trou qu'elle répand une phéromone et que les mâles se précipitent sur elle par centaines pour essayer de s'accoupler (voir *Pour la Science*, janvier 1983, p. 68). »

Heidi passait apparemment ses vacances avec un collègue. Pour me tirer d'embarras, il fallait vite que je trouve un autre exemple : « Suppose que tu viennes de descendre d'une rame de métro et que tu cherches la sortie. Tu vas



4. Paire de familles de courbes orthogonales pour les champs de vecteurs  $cz$  et  $icz$  avec  $c = 1$  et  $c = 1/5$ . La même figure peut être interprétée comme les quatre familles de courbes de  $u(z) = \sqrt{c}z^2$ , et dont seules deux se distinguent par leur sens de passage.

alors suivre le premier panneau *Sortie* : tu peux définir un tel panneau comme un attracteur, mais pas de manière absolue, car tu ne restes à l'arrêt que de manière transitoire devant lui.

– Mais il existe généralement plusieurs sortes.

– Dans ce cas, le champ de vecteurs qui décrit ton mouvement possède plusieurs attracteurs. Représente-toi un paysage vallonné où chaque point est associé à une flèche qui indique la direction de plus grande pente. Voilà qui constitue notre champ de vecteurs. Prenons maintenant une boule qui roule vers le bas dans ce paysage : elle suivra la courbe intégrale de l'équation différentielle. Tous les points les plus bas où elle s'arrêtera formeront la pente dans toutes les directions, pour être définis comme des attracteurs.

– Et si on la pose très délicatement sur un sommet ?

– Elle reste sur place, car le sommet est un point stationnaire, mais pas un attracteur : dès qu'on la déplace légèrement, elle se met à rouler.

– Bon, je veux bien, mais lorsque la courbe est dirigée vers un attracteur emprunte-t-elle le chemin le plus court ?

– Plus précisément. On peut tout à fait envisager que les flèches ne soient pas directement dirigées vers l'attracteur, mais qu'elles se dévient d'un certain angle.

La courbe décrit alors une spirale qui vient se terminer sur l'attracteur. Si l'on augmente cet angle jusqu'à une valeur de 90 degrés, les spirales se transforment en une série de cercles concentriques.

– Des cercles ?

– Oui : tu décris un cercle lorsque tu cours toujours de manière perpendiculaire à la direction qui vise un point défini.

– Ça, je le savais !

– Qu'il s'agisse de spirales divergentes ou convergentes. Toute cette famille de courbes peut être décrite par une formule unique où l'on fait varier la valeur de l'angle (voir la figure 2).

– Et de quel type est la flèche qui est associée à ce point attracteur central ?

– Une flèche de longueur zéro. Un panneau *Stop*, en quelque sorte.

– Et quand toutes les flèches s'éloignent de lui ?

– Encore un panneau *Stop*.

– Ainsi il existerait des panneaux *Stop* qui fonctionnent par attraction et d'autres par répulsion ?

– D'une certaine manière. Il en existe même qui ont des attracteurs sur les côtés, mais qui repoussent devant et derrière, un peu comme un col entre deux montagnes. D'autres encore possèdent de nombreux secteurs dont certains attirent et d'autres repoussent.

Heidi me regarda comme si elle doutait de ma compétence, alors qu'il aurait été si simple de calculer la valeur de l'angle à proximité du point zéro entre  $z$  et  $u(z) = z^3$  et de vérifier qu'effectivement il varierait alternativement en étant tantôt plus petit et tantôt plus grand que 90 degrés. Je lui épargnai cette explication.

« C'est bizarre, dit Heidi. Qu'advient-il alors des courbes intégrales ?

– Elles prennent leur source au point critique.

– Ah quoi ?

– Au niveau du panneau *Stop* à plusieurs côtés, et elles partent dans des directions divergentes vers l'extérieur pour faire demi-tour et revenir en direction du même point – à moins qu'il n'existe d'autres panneaux *Stop*. Le résultat final ressemble à une fleur avec des pétales (voir la figure 5). »

À cette évocation poétique, les deux biologistes s'intéressèrent de nouveau à mes considérations mathématiques. Je profitai de ce regain d'intérêt pour amener un autre exemple : « Il existe également des familles de courbes qui ressemblent à une coquille d'escargot ou au dessin des graines d'un tournesol (voir les figures 3 et 5).

– Ah oui... Et les feuilles ou les coquilles d'escargots poussent-elles en suivant de telles lois de formation ? »

C'était exactement la question qu'il ne fallait pas me poser : il existe certes des formules mathématiques qui engendrent une foule de courbes très jolies dont certaines rappellent des formes biologiques, mais il n'existe pas de corrélation directe entre les formes mathématiques et les formes biologiques qui leur ressemblent. Non pas qu'on ne puisse appliquer des formules mathématiques pour

expliquer la forme de la coquille d'un escargot, mais le problème est bien plus compliqué que la recherche d'un champ de vecteurs dans un plan.

D'autre part, et indépendamment, les équations différentielles constituent un thème central des mathématiques. On y cherche, par exemple, à déterminer la forme du champ de vecteurs bidimensionnel et celle de leurs courbes

intégrales. Elles servent d'exemples pour de nombreux systèmes complexes, mais pas pour leurs qualités esthétiques, car de belles images apportent rarement la gloire en mathématiques.

Il est d'ailleurs significatif que l'on doive les plus belles collections de telles figures non pas à des mathématiciens, mais à

des personnes telles que Wilhelm Scharnowell (1922-1991), qui était ingénieur à Dortmund (Allemagne), ainsi qu'à Friedrich Zauner, professeur en retraite à Villach (Autriche), et à son fils Erhard Zauner. Tous ne peuvent montrer ici qu'une toute petite sélection choisie parmi le grand nombre de figures qu'ils ont tracées au cours de dizaines d'années de travail.

## Diagrammes de fonctions complexes d'après Friedrich Zauner et Wilhelm Scharnowell

Un champ de vecteurs bidimensionnel est une paire de fonctions  $(f, g)$  de deux variables qui associent un point du plan  $(x, y)$ ,  $g(x, y)$  à chaque point  $(x, y)$ . À chaque champ de vecteurs correspond un système d'équations différentielles qui s'écrit :

$$\begin{aligned}x' &= f(x, y) \\ y' &= g(x, y).\end{aligned}$$

On peut considérer le point  $(f(x, y), g(x, y))$  comme un vecteur qui prend son origine au point  $(x, y)$ . Une solution de l'équation différentielle est constituée par une courbe dont les tangentes sont ces vecteurs.

Deux nombres réels peuvent toujours être regroupés en un nombre complexe que l'on écrit sous la forme  $z = x + iy$  ou bien  $z = x + iy$  :  $x$  est la partie réelle et  $y$  la partie imaginaire du nombre  $z$ . De la même manière, on peut contracter les composants  $f$  et  $g$  d'un champ de vecteurs en une fonction complexe  $u(z) = f(x, y) + ig(x, y)$ . Le nombre  $i$ , l'unité imaginaire, est égal à la racine carrée de  $-1$ .

Ce regroupement formel est intéressant parce qu'il permet de multiplier des nombres complexes comme s'il s'agissait de nombres réels. On calcule avec ces nombres presque comme d'habitude, tout en observant que  $i^2 = -1$ .

Chaque nombre complexe a deux racines carrées, de signes opposés ; les vecteurs qui leur correspondent dans le plan sont de longueur égale et dans des directions opposées. Chaque nombre complexe possède trois racines cubiques, quatre racines quadruples, etc. Les vecteurs qui correspondent à ces racines d'ordre  $n$  sont également de même longueur, et leurs extrémités forment un polygone régulier à  $n$  côtés.

Ce mode d'écriture complexe permet de se concentrer sur des champs de vecteurs  $u(z)$  que l'on peut décrire sans prendre en compte la partie imaginaire et la partie réelle de  $u$  ou de  $z$ . Il s'agit en règle générale de fonctions dites analytiques qui ont des comportements intéressants. Ces « diagrammes de fonctions analytiques » ne représentent pas complètement la fonction analytique (cela est impossible, car il faudrait disposer d'un espace à quatre dimensions), mais des courbes intégrales (la représentation graphique) de l'équation différentielle dont le champ de vecteurs constitue la fonction analytique. Par chaque point du plan passe une telle courbe intégrale ; il s'agit par conséquent d'effectuer le bon choix, quand on crée un programme informatique. Les critères pour y parvenir sont multiples : les courbes ne doivent par exemple pas être trop resserrées ni trop dispersées (ce qui n'est pas toujours facile à obtenir en raison de leur tendance à se concentrer en certains points), et l'image d'ensemble doit refléter les symétries du champ de vecteurs. De telles exigences sont difficiles à formaliser dans un programme informatique ; il serait en effet extrêmement difficile de déléguer à un ordinateur l'énorme travail manuel qui se cache derrière ces images (environ huit heures pour un diagramme de difficulté moyenne).

Pour des raisons esthétiques, l'axe réel (qui constitue le plus souvent l'axe de symétrie) des diagrammes de Zauner et de Scharnowell n'est pas dirigé vers la droite, mais plutôt vers le haut.

Une courbe intégrale ne donne pas une image complète de la solution d'une équation différentielle, car la vitesse et la direction correspondant à ces courbes ne sont pas indiquées. En fait, défaut devient un avantage pour certaines images qui sont fondées non pas sur une seule fonction, mais sur plusieurs. Si l'on doit, par exemple, extraire une racine pour des exposants demi-entiers (*deuxième, quatrième et sixième lignes sur la figure 3*), à chaque point du plan seront attachés deux vecteurs dirigés en sens contraire. Cela est admissible, car la courbe intégrale est dirigée de manière tangentielle par rapport aux deux vecteurs. Une racine cubique donnera naissance à trois familles de courbes qui se recoupent en chaque point avec un angle de 120 degrés.

Des formules telles que  $z^{1+3i}$  ne sont pas seulement à double sens comme la racine carrée, mais à sens multiple et infini. Les puissances d'exposant complexe sont en effet définies par la fonction exponentielle complexe et sa fonction inverse — le logarithme complexe :  $z^{1+3i} = \exp((1+3i) \ln z)$ . Dans le plan complexe, il existe un nombre infini de fonctions inverses possibles de la fonction exponentielle. Il n'est donc pas possible de décider dès le départ quel est le logarithme qu'il faudra appliquer parmi les nombreux possibles. C'est pour cette raison que l'on obtient un nombre infini de familles de courbes qui se retrouvent superposées : l'ambiguïté existe uniquement sur la vitesse et non sur la direction, ce qui permet d'obtenir malgré tout une image homogène.

Lorsqu'on fait pivoter de 90 degrés tous les vecteurs d'un champ de vecteurs (ce qui correspond à la multiplication par  $i$ ), on obtient un nouveau champ de vecteurs. Ses courbes intégrales coupent toujours à angle droit celles de l'ancien champ de vecteurs, comme le montre la figure 5. Lorsque le champ de vecteurs est un champ de potentiel, comme dans une région de montagnes, les courbes de niveau de ce paysage de collines sont toujours perpendiculaires aux courbes intégrales du champ de vecteurs. Si l'on combine les deux principes ainsi énoncés, les familles de courbes pourraient être représentées par des courbes de niveau. Ceci constitue une aide précieuse, car il est relativement aisé de programmer un ordinateur pour colorer des points situés à la même hauteur (ou appartenant à une zone de hauteur définie).

Le choix approprié de la fonction  $u(z)$  permet d'attribuer des courbes aux propriétés données. Si l'on désire avoir un point critique en un point  $a$  du plan, il suffira de donner à  $u$  une valeur nulle en ce point. On y parvient en remplaçant  $z$  par  $z - a$  dans la fonction  $u$ . Une symétrie dans la loi de formation se traduit généralement par une symétrie dans la famille de courbes.

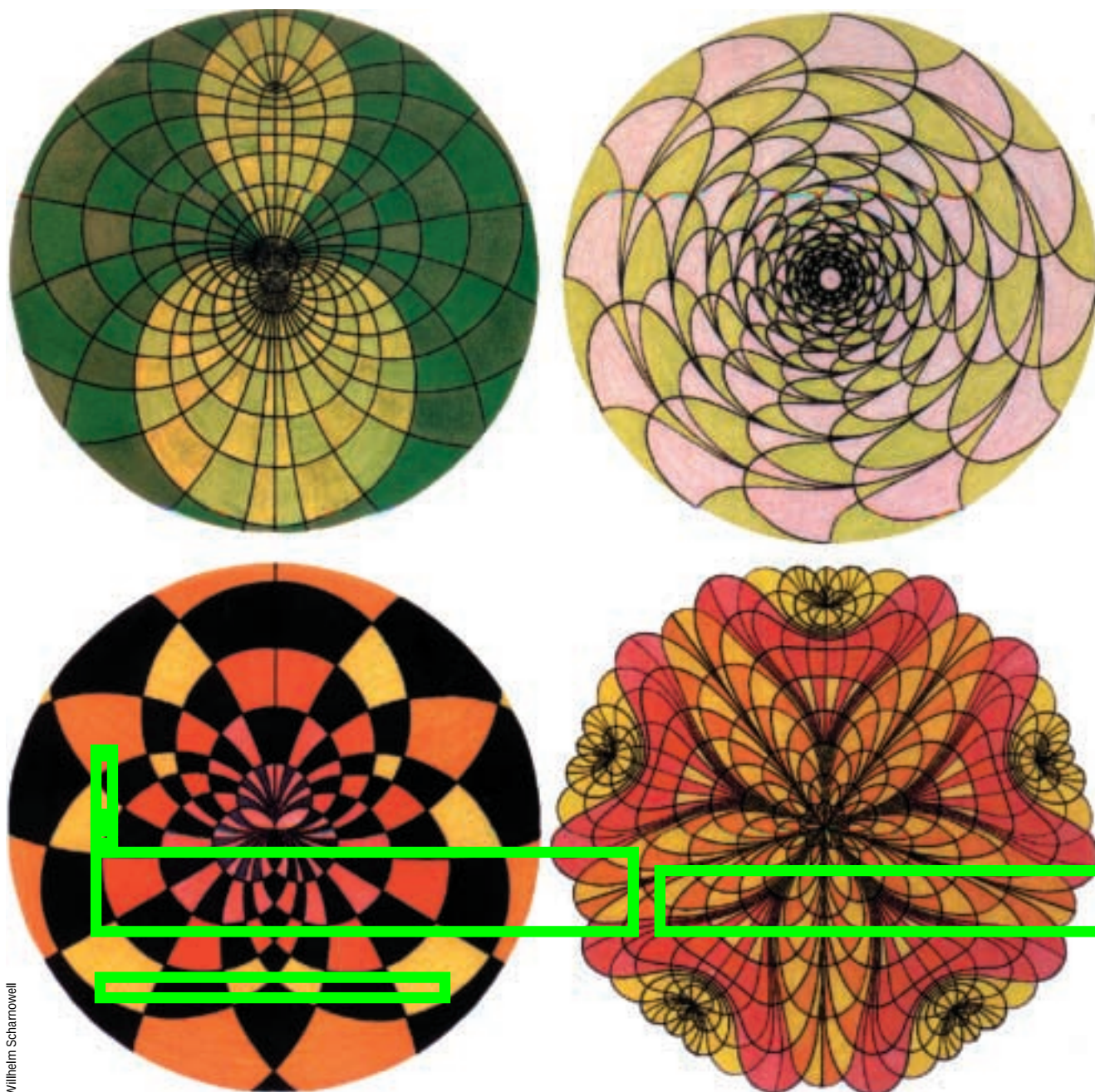
F. Zauner, E. Zauner et E. Scharnowell ont justement établi cette relation entre les mathématiques et le monde vivant que l'on aimerait tant voir, mais qui n'existe pas si l'on se fonde sur les mathématiques et la biologie. Ils se sont appuyés sur une conception de l'Univers qui s'oppose en de nombreux points à la pensée des naturalistes : l'anthroposophie du philosophe Rudolf Steiner (1861-1925). Scharnowell a ainsi commenté ses dessins (voir la figure 3) :

«Ce qui se passe à droite et à gauche de la médiane verticale est déterminé par une rotation à droite et par une rotation

à gauche, c'est-à-dire déterminé par une polarité droite-gauche... Nous retrouvons également une telle polarité droite-gauche dans la silhouette humaine sous la forme de la symétrie droite-gauche par rapport à un miroir... Au-dessus et au-dessous de la "ligne des étoiles", l'aspect de la figure dépend d'une polarité intérieur-extérieur qui s'exprime sous la forme de courbes sortantes et rentrantes. Cette polarité s'exprime chez l'homme, au-dessus et au-dessous de la ligne de cœur, sous la forme de l'homme des sens et des nerfs (centré au niveau de la tête) et de l'homme du métabolisme et des

membres (dont le centre est situé dans le bas-ventre). Nous trouverons ainsi dans la partie supérieure une tendance à des formes sortantes matérialisées au niveau du crâne par les formations osseuses qui l'entourent, alors que la partie inférieure du corps présente ce mouvement de calice ouvert vers l'extérieur sous la forme du creux du corps qui accueille les organes de la nutrition ainsi que les organes d'excrétion et de reproduction.»

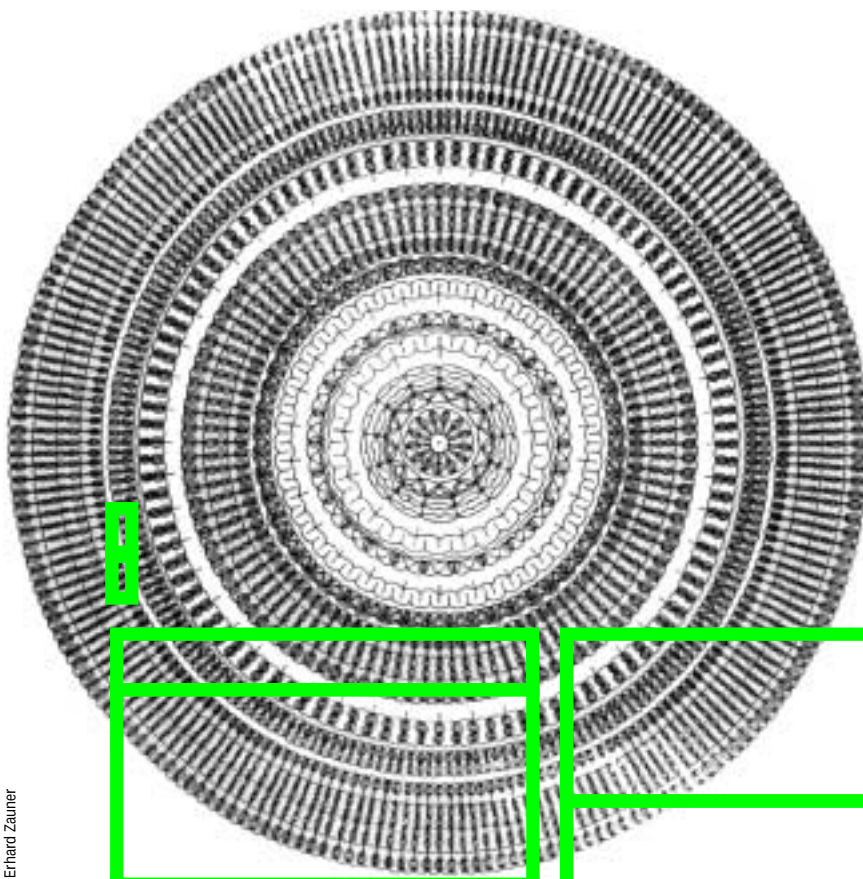
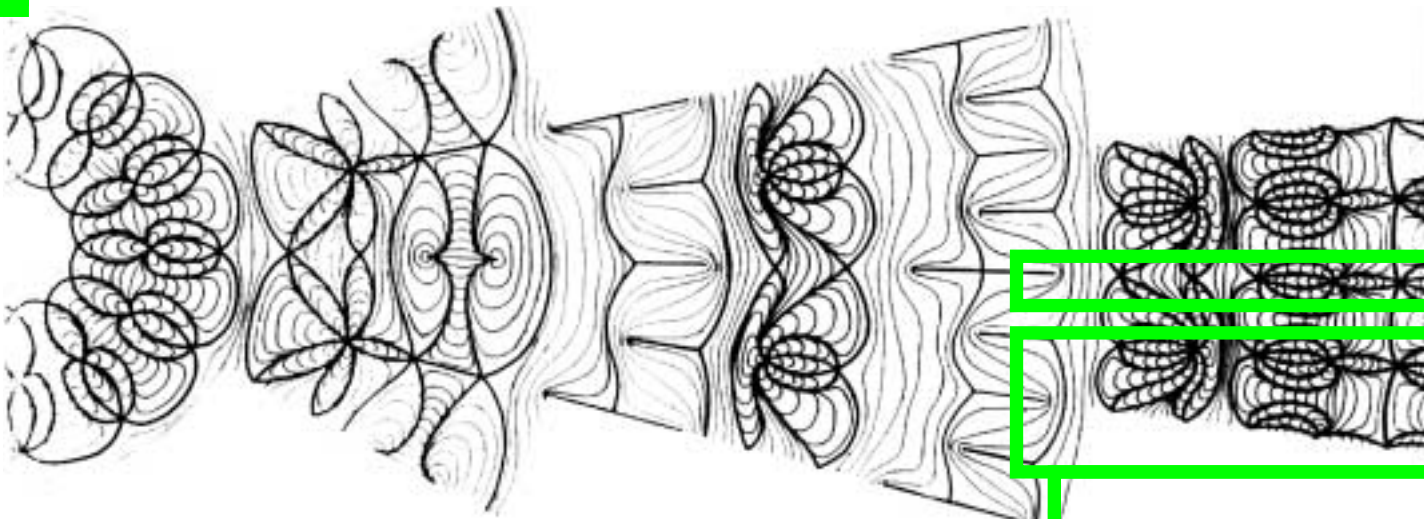
J'essayai prudemment d'intéresser Heidi à ces idées, tout en lui faisant remarquer que j'avais chez moi une collection de ces images vraiment admirables, et



Wilhelm Scharnowell

5. Familles de courbes intégrales de champs de vecteurs complexes. En haut à gauche :  $iz^{3/2}(z-5)^{1/2}$ . En haut à droite :  $z^{5/4+3i}$ . En bas à gauche :  $z^{7/4}$ . Le dernier diagramme comporte deux

familles de courbes orthogonales (superposées) associées au champ de vecteurs  $z^{7/2}(z^5-5^5)^{3/2}$  et au même champ multiplié par  $i$ . La coloration fait ressortir les symétries engendrées par ces formules.



Erhard Zauner

lui demandai si elle ne voulait pas venir les voir un jour.

Elle ne voulut même pas savoir où j'habitais. Elle en était revenue à la vie des animaux de Terre-Neuve, de sorte que je dus reprendre le train en marche :

«Imagine qu'une des courbes du champ de vecteurs du plan lynx-lièvres se referme sur elle-même.

— Comment cela ?

— Essaie d'abord de te le représenter. La démonstration viendra plus tard.

— Bon, admettons, mais ne m'impose pas quelque chose d'aussi repoussant qu'une démonstration.

— D'accord. Une courbe fermée divise le plan en une zone intérieure et une zone extérieure, et aucune des courbes qui appartiennent au champ de vecteurs ne peut passer de l'intérieur à l'extérieur ou vice versa.

— Comment cela ?

— Les familles de courbes qui appartiennent au même champ de vecteurs ne peuvent pas se croiser, car il existerait, au point de croisement, deux tangentes distinctes. Par conséquent, celui qui se trouve à l'extérieur d'une courbe fermée et qui suit le champ de vecteurs ne peut jamais passer à l'intérieur.

## 6. La fonction qui définit ce diagramme est un polynôme du degré 158 divisé par un poly-

— Même si un attracteur s'y trouve ?  
— Le point situé à l'extérieur ne le ressent pas. L'attraction est une propriété qui ne peut être ressentie qu'à proximité immédiate de l'attracteur.»

Heidi esquissa un pas de recul.

«Mais si l'intégralité de la courbe fermée constituait un attracteur ?

— Comment cela se pourrait-il ?

— La courbe de résolution graphique s'enroule en une spirale toujours plus resserrée autour de l'attracteur, jusqu'à ce qu'on ne puisse finalement plus la distinguer de lui. Un peu comme une boule qui tomberait dans une rigole circulaire : s'il n'y avait pas de frottement, elle tournerait éternellement.

— C'est comme pour l'échidné, s'exclama de nouveau la collègue de Heidi (voir *Les échidnés*, par Peggy Rismiller et Roger Seymour, *Pour la Science*, avril 1991). Les mâles tournent autour d'une femelle prête à l'accouplement et finissent par creuser un sillon circulaire. Ils continuent à tourner jusqu'à ce que l'un d'eux prenne le dessus dans cette course, et qu'il...»

J'essayais de changer de sujet :

«La situation semble analogue, mais je crains qu'elle ne puisse pas s'expliquer en termes de champs de vecteurs. Si un domaine du plan est dépourvu de tout point critique et qu'à la périphérie de ce domaine, aucune flèche ne pointe vers l'extérieur, alors chaque solution doit tendre vers une courbe refermée sur elle-même.

— Et alors ?

— Cela pourrait devenir intéressant.

Si toutes les flèches sont dirigées vers un point, le système adopte à la longue cet état, quel que soit l'état dans lequel il se trouvait auparavant ou quelles que soient les perturbations subies. Le nombre des animaux devient à la longue constant. Si la courbe n'atteint pas un tel état d'équi-

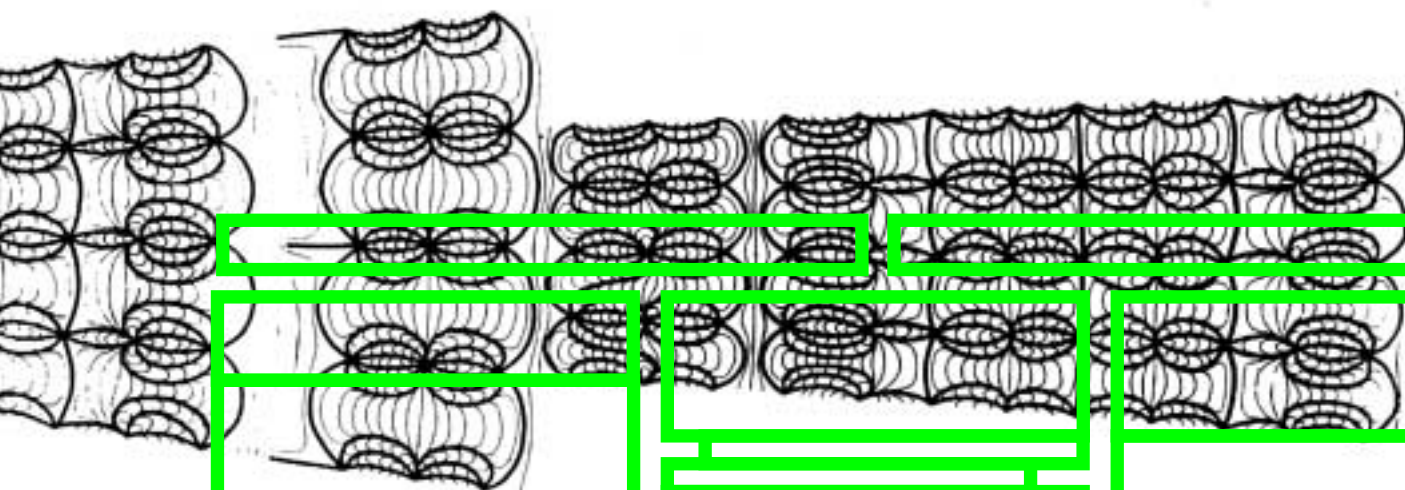


figure de gauche montre le motif complet, et la partie supérieure décrit

l'agrandissement d'un secteur qui permet de vérifier que les courbes intégrales couvrent effectivement la totalité du plan sans aucune lacune.

libre, ni ne disparaît vers l'infini, elle devra forcément se dérouler quelque part dans le plan lynx-lièvres.

– Cela va donner un drôle de graffiti.  
– Justement pas, car la courbe ne peut pas se recourber. Elle ne peut pas non plus se coller contre elle-même, bien que les tangentes deviendraient égales en pareil cas. Il apparaît donc que cette courbe doit être refermée sur elle-même, et la solution serait alors de nature périodique, car cet état se reproduirait à chaque tour de courbe.

– C'est ce qui expliquerait le mouvement de balancier que l'on observe tous les dix ans entre les lynx et les lièvres ?

– Pour ainsi dire.

– Je n'en reviens pas ! Tu me racontes les histoires les plus absurdes sur des fractions de lièvre par seconde infiniment petites, tu affirmes que le hasard ne joue aucun rôle, tu me gâches le soleil parisien avec tes flèches directionnelles que l'on ne peut pas voir et avec tes points qui ne sont plus attractifs qu'abordés de côté, et tout ce non-sens finit par donner quelque chose qui colle avec la réalité ?

– Cela n'a rien d'étonnant. S'il est vrai que la nature ne cadre que très approximativement avec les théories mathématiques.

– Je dirais plutôt l'inverse...

– ... Il n'en reste pas moins que, dans le cas présent, la solution périodique reste stable, car le système est capable de reprendre son comportement périodique après une perturbation qui n'a pas été trop forte. Si, par exemple, un lièvre échappe de manière imprévisible aux griffes d'un lynx, cela n'aura à la longue aucune conséquence dramatique.

– Et que se passe-t-il si l'on libère d'un coup de nombreux lièvres au moment même où leur population est en train d'augmenter ?

– Alors, le prochain maximum de lièvres sera plus marqué, et le prochain cycle présentera des oscillations plus importantes, mais à la longue, le système s'équilibrera.

– Et si l'on fait la même chose au moment où les lynx sont en force ?

– Alors ils attaqueront les lièvres de plus belle. Et les retardataires seront condamnés à mourir d'inanition. Mais en principe les règles qui s'appliquent au premier cas restent valables.

– Et c'est que cela veut dire qu'on peut calculer si un écosystème est stable ?

– En principe oui, à condition que le modèle mathématique se rapproche suffisamment de la réalité.

– Mais est-ce que vous, les mathématiciens, vous ne pourriez pas tout simplement partir de la réalité ?

– Nous n'aimons pas cela, c'est trop compliqué. Il nous est beaucoup plus simple de bicolorer une théorie et de l'adapter ensuite à la réalité.

– Et si plus de deux espèces animales interviennent ?

– Dans ce cas, les choses se compliquent. La série de solutions périodiques stables n'est valable que dans un espace à deux dimensions. Nous nous retrouvons dans le cas du problème à  $N$  corps en mécanique céleste. Un soleil et une planète se déplacent sur des trajectoires bien établies l'un par rapport à l'autre, mais dès qu'un troisième corps céleste entre dans la danse, le chaos menace !

La collègue de Heidi vint nous rejoindre et commença à nous expliquer de manière détaillée comment deux mâles échidnés se disputaient les femelles. Je dus me faire à l'idée que Heidi ne se serait de toute façon pas intéressée à l'apparence remarquable d'un attracteur en trois dimensions – qui ne serait en fait ni bidimensionnel, ni tridimensionnel, mais se situerait

quelque part entre les deux, tout comme l'attracteur en forme de papillon de Lorenz, entre-temps devenu célèbre. Toujours est-il que de telles quantités sont définies dans le jargon spécialisé comme *étrange*.

Pendant que je subissais ma leçon de choses sur l'échidné, Heidi avait brusquement disparu. Avait-elle pris la fuite de peur d'entendre d'autres mathématiques ? Je dévalai les escaliers quatre à quatre et m'enfonçai sous terre jusqu'à la station de métro – pour la voir monter dans une rame et assister à la fermeture des portes du wagon...

Le métro parisien constitue un cas typique de solution périodique du problème de transport à courte distance. Afin de conserver la stabilité à la solution et d'éviter que les voyageurs pressés ne retardent le départ en se précipitant au dernier moment, l'accès à certains quais est pourvu de portillons automatiques. C'est ainsi qu'on évite des perturbations qui risqueraient d'influencer trop profondément le système.

Je restais là, planté sur le quai, en me disant que j'étais qu'une perturbation d'un système périodique qui était arrivée au mauvais moment.

Christoph POPPE est journaliste à la revue *Spektrum der Wissenschaft*.

Earl A. CODDINGTON ET Norman LEVINSON, *Theory of Ordinary Differential Equations*, McGraw-Hill, 1955.

Martin BRAUN, *Differentialgleichungen und ihre Anwendungen*, éditions Springer, 1991.

Edward BELTRAMI, *Von Krebsen und Kriminellen*, Vieweg, Brunswick / Wiesbaden, 1993.

Wilhelm SCHARNOWELL, *Schaubilder komplexer Funktionen*, à compte d'auteur, Dortmund 1983.

# Géologie

## Carte géologique de la France au millionième.

Éditions du BRGM, 1996.

**L**a première carte géologique de la France au millionième a été réalisée en 1889, l'année de l'Exposition universelle de Paris ; elle fournissait la première synthèse géologique du territoire français, à une époque où l'exploitation du charbon et des minéraux était active. Quatre éditions lui ont succédé, en 1905, 1933, 1955, 1963, chacune correspondant à un progrès marquant de l'exploitation géologique de notre territoire et de l'interprétation des structures géologiques. Depuis le siècle dernier, la France avait successivement été couverte par des cartes au 1/500 000, au 1/320 000, au 1/80 000 et au 1/50 000. Aujourd'hui on dispose de cartes géologiques détaillées à cette échelle pour 85 pour cent du territoire français ; en vente partout, elles fournissent un inventaire géologique précieux.

La sixième édition est la première qui fasse la synthèse de cette nouvelle couverture géologique, au 1/50 000. Depuis plus de 100 ans, la façon d'aborder les problèmes s'est, naturellement, considérablement modifiée. On est progressivement passé d'une période exploratoire, essentiellement descriptive, à des périodes de plus en plus explicatives, dominées par des concepts renouvelés. Cette sixième édition est la première qui succède à la révolution de la tectonique des plaques et qui essaie de prendre en compte les nombreux modèles géodynamiques qui en ont résulté. Elle correspond donc à une étape importante de l'étude de notre patrimoine minéral.

La nouvelle carte donne immédiatement une impression de nouveauté et de progrès. Les couleurs sont lumineuses et artistiquement contrastées. Les 32 couleurs utilisées pour les roches sédimentaires respectent la succession des teintes adoptée sur le plan international et permettent d'avoir une information immédiate.

On peut la lire de trois façons. C'est d'abord une carte murale qui, à distance, donne une bonne idée d'ensemble de la géologie de la France. C'est ensuite une carte à contours géologiques fins, beaucoup plus précis qu'auparavant ; elle fournit des informations régionales qui la rendent digne d'être emportée sur le

terrain. C'est enfin un document à déchiffrer avec soin, parfois à la loupe, car il contient de nombreuses informations, exprimées par des symboles et par des schématisations. Passons en revue les plus importantes des nouveautés.

Les bassins : des courbes de niveau discrètes indiquent, en tout point, l'épaisseur approximative des sédiments accumulés dans les bassins et dans leur prolongement en mer. On voit ainsi le bassin de Paris se prolonger dans la Manche, et l'on apprécie la forte épaisseur des sédiments du bassin du Sud-Est (jusqu'à dix kilomètres !) et du Tertiaire du golfe du Lion.

Des informations structurales : sommaires dans les éditions précédentes, les informations structurales prennent ici une grande importance ; leur expression est fondée sur l'excellente carte tectonique de la France au millionième, qui fut publiée en 1981. On a d'abord figuré avec soin beaucoup plus de failles, en distinguant, pour la première fois, mais hélas pas systématiquement, les chevauchements, les décrochements et les failles normales, classées par importance dans une certaine mesure. La lecture de la carte s'en trouve améliorée. Les grands charriages apparaissent immédiatement dans les Alpes, où seuls les spécialistes s'y retrouvaient, et, surtout, on voit bien ceux de la chaîne hercynienne, qui s'étendait dans le Sud de l'Europe il y a plus de 300 millions d'années et dont on ne montrait guère, jusqu'à présent, que les aspects pétrographiques, en négligeant totalement la tectonique.

Tout a changé, et, à la suite d'une révolution cartographique, le visage du Massif central a été entièrement modifié. On est enfin en présence d'une chaîne à part entière, avec de grandes nappes de charriage. Ce changement est d'autant plus important que de nouveaux symboles structuraux ont été créés pour la tectonique profonde, concernant les gneiss, les micaschistes et les granites. On a figuré, pour la première fois, la trace de la «foliation» (ou délit en feuillet des roches déformées par le chaud). On trouve en outre des indications précieuses sur les roches métamorphiques. Des symboles en distinguent les principaux faciès (schistes verts, schistes bleus, amphibolites, granulites, écoligites), localisant par une étoile la présence de coésite (variété de «quartz» de haute pression), qui s'est formée à plus de 100 kilomètres de profondeur. On localise ainsi les régions où se sont produites des subductions continentales et où l'exhumation des roches profondes a été rapide.

Les granites : ils ont été traités d'une manière nouvelle. Jusqu'alors, on avait

pris l'habitude de réserver les couleurs rouges pour représenter les différentes variétés de granites, sans se préoccuper de leur âge. Ainsi n'avait-on renoncé du premier coup d'œil les massifs de granites, mais avec l'inconvénient de n'avoir aucune précision sur leur âge. Différentes nuances de rouge furent utilisées pour donner des informations pétrographiques et géochimiques, et tout le monde s'habitua à cette double signification des couleurs – l'une chronologique pour sédiments, l'autre pétrographique pour granites.

Les auteurs de la nouvelle carte ont innové : ils ont introduit pour les granites 21 couleurs, à signification chronologique, qui se trouvent en compétition avec les 31 couleurs de sédiments. Les teintes vont du brun au rouge, violet pour les granites anciens, et hélas au jaune pour les granites alpins, ce qui ne manquera pas de perturber les géologues, pour qui le jaune correspond, depuis toujours, à des sédiments d'âge tertiaire. Un tableau «radiochronologique» donne la correspondance entre les 23 couleurs de granites et l'échelle en millions d'années. C'est ainsi, par exemple, que la couleur 19 correspond à un intervalle compris entre –305 et –285 millions d'années. En mettant l'accent sur l'âge des granites, cette innovation fournit sans conteste une information nouvelle ; toutefois l'esprit ne me paraît pas encore concluant pour les raisons exposées plus loin.

Considérations géodynamiques : pour la première fois, des informations géodynamiques sont exprimées par des symboles superposés aux couleurs des roches plutoniques et volcaniques. On distingue ainsi le magmatisme de l'«extension continentale» (qui se manifeste par des fossés d'effondrement), de «marge active» (bordure de continent sous lequel s'enfonce un océan), de l'«accrétion océanique» (qui se produit aux ridges médio-océaniques) et d'«orogène de collision» (chaîne qui s'érige quand deux continents entrent en collision, l'un s'enfonçant sous l'autre). Ces indications permettent au lecteur de se raccorder aux modèles géodynamiques en cours. On repère ainsi, rapidement, les nombreux restes de l'océan alpin et les rares débris des océans hercyniens.

Cependant la notion de collision devrait être explicitée. Dans les Vosges, par exemple, le volcanisme du Carbonifère inférieur est à la fois de «marge active» et de «collision» ; en Corse du Nord, il n'est pas raisonnable d'attribuer le volcanisme extensif du Fango à la collision. Les hésitations sont aggravées par les «cartouches structurales», qui présentent, à l'échelle du

1/8 000 000, des schémas très peu géodynamiques des «cycles» (c'est un mauvais terme) alpins et varisque. On n'y évoque pas les sutures océaniques hercyniennes, ni les nappes du Massif central ni le grand déplacement Espagne-Europe de la faille Nord-pyrénéenne... Et ne peut-on faire de la géodynamique sans coupes?

Cette rapide présentation montre que la nouvelle carte fournit un très grand nombre d'informations nouvelles. C'était un projet ambitieux, rompant avec les habitudes, et il était inévitable qu'une telle innovation se fasse avec quelques imperfections, que j'ai jugé utile de présenter afin de préparer l'avenir.

L'innovation qui a consisté à juxtaposer deux échelles de couleurs risque de dérouter les utilisateurs : il est difficile de se retrouver dans le lot de couleurs choisies pour les granites, dont la graduation ne fournit pas de message chronologique et visuel clair. C'est ensuite, et surtout, parce que les granites sont encore assez mal datés et que beaucoup d'âges retenus sont probablement inexacts. Au lieu des 16 subdivisions adoptées pour l'ère primaire, trois ou quatre auraient suffi, précisées, le cas échéant, par un nombre en millions d'années (plus facile à modifier que la couleur). On considère encore,

trop souvent, que les résultats radiochronologiques obtenus par des mesures physiques effectuées au spectromètre de masse sont nécessairement des résultats quantitatifs incontournables. Il ne faut pas oublier que l'on ne sait pas toujours ce que l'on date : lorsque plusieurs événements thermiques se sont succédés, lequel a laissé son empreinte? On ne le sait que si on utilise simultanément plusieurs méthodes, que l'on applique à plusieurs minéraux. Or, dans la chaîne hercynienne française, on n'a généralement utilisé qu'une seule méthode, et on a souvent effectué les datations en dosant les isotopes 39 et 40 de l'argon, qui ne donnent que des âges minimum difficiles à interpréter. Il eut mieux valu utiliser plus systématiquement la datation à l'uranium et au plomb, beaucoup plus fiable. En un mot, le BRGM et toute la communauté géologique française n'ont pas eu une politique de datations ; nos excellents géochronologistes exportaient leurs compétences dans des pays lointains, mais la situation semble changer...

Les idées à la mode sont également risquées : les cartographes n'ont, à mon sens, pas maîtrisé la notion d'extension, très présente sur la carte, parce qu'ils se sont laissé influencer par un concept déjà dépassé et, donc, mal venu pour

une carte qui durera 20 ans. On a multiplié les « failles normales dites de détachement » dans la croûte ductile, en adoptant l'hypothèse fautive qu'il existe de nombreuses failles normales, dues à l'écoulement sous leur propre poids des reliefs des chaînes et, notamment, de la chaîne hercynienne. On a ainsi imaginé et dessiné des failles qui n'existent pas. Le plus bel exemple est celui de la belle faille qui limite le célèbre bassin carbonifère de Saint-Étienne (dont on a hélas supprimé les charriages), au Sud : elle a été figurée en « faille normale, dite de détachement » de faible pendage (ou faiblement pentée – environ 30 degrés), alors qu'il s'agit d'une très belle faille de décrochement verticale. La même erreur a été faite dans la Montagne noire, à l'Ouest de Lodeve, et dans bien d'autres régions. De fil en aiguille, cette mode a finalement conduit à une aberration : au Nord-Est de Toulon, on a transformé en faille normale une des plus spectaculaires structures compressives formées, il y a 40 millions d'années, au front de la chaîne des Pyrénées : le décollement provençal. Ce n'est pas acceptable.

En définitive, en reprenant l'unique symbole des Anglo-Saxons (caractérisé par de petits rectangles noirs) pour les failles normales de détachement ductile comme pour les failles normales cas-



Extrait de la carte géologique montrant une partie du Massif central granitique, un bassin d'âge tertiaire et la partie frontale de la chaîne des Alpes.

# POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

**POUR LA SCIENCE** Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Marion Aguttes. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Herviel. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Ravin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Nicole Bontemps, Jean-Claude Daniel, Paul Decaix, M. de Keersmaecker, Christian de Namur, Olivier Giraud, Évelyne Host-Platret, Michel Lagües, Anne Masé, Claude Olivier, Guy Paulus, Pierre Pfeiffer, Jacques Pradel, Dominique Schwartz.

**SCIENTIFIC AMERICAN** Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Lewntwyler, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Sanna Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallach, Philip Yip, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : John Moeling, Robert Biewer, Anthony Degutus.

## PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06. Tél. (1) 46 34 21 42.

Télex : LIBELIN 202978F.

Télécopieur : 43 25 18 29

**Étranger** : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

## SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin

## DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

**Canada** : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

**Suisse** : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay

**Autres pays** : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

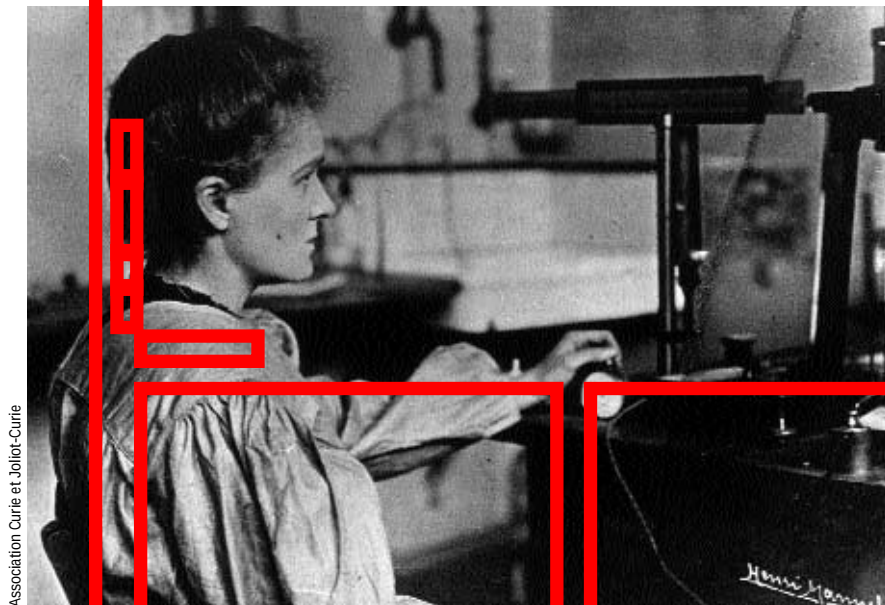
**Toutes demandes d'autorisation de reproduire**, pour l'usage public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressés par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation ou de représentation réservés pour tous les pays.

Les droits de propriété intellectuelle (copyright) sur les articles «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi n° 44 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront, en pages, centrales, un encart publicitaire Encyclopaedia Universalis et, en pages 18A, 18B, 98A et 98B, des bulletins d'abonnement.



Marie Curie

cageots usagés» et «Le pouvoir d'ionisation de la substance est mesuré grâce au temps qu'elle met pour produire une saturation, c'est-à-dire atteindre le point à partir duquel l'air ne peut plus conduire davantage d'électricité.» En fait, la chambre d'ionisation utilisée alors était composée de deux plateaux métalliques horizontaux, parallèles, portés à une différence de potentiel électrique (le support était constitué par des morceaux d'étagère en bois, et non pas par des cageots usagés ; la substance radioactive était placée sur le plateau inférieur de la chambre, laquelle se trouvait dans une cage de Faraday. Les plateaux limitaient un volume d'air. Lorsque des particules chargées traversaient la chambre, elles créaient, le long de leur trajectoire, un grand nombre de paires d'ions (positifs et négatifs) qui étaient alors séparés et recueillis grâce au champ électrique. On travaillait à saturation lorsque la tension appliquée était suffisante pour que tous les ions formés soient collectés. La charge électrique ainsi recueillie pouvait être compensée pendant un certain temps par la charge électrique qui apparaissait sur les faces d'une lame de quartz piézo-électrique attirée par un poids. Ce temps était mesuré avec un chronomètre ; il était inversement proportionnel à l'intensité du rayonnement ionisant.

Une autre confusion apparaît à plusieurs reprises. Entre le thorium X (radioactivité excitée), qui sont considérés par l'auteur comme un seul et même élément ; l'auteur écrit en effet : «Rutherford et Soddy rigérèrent un article concluant que l'émanation, qu'ils avaient décidé d'appeler thorium X, était un gaz qui transportait (temporairement) la radio-

activité du thorium.» Et, plus loin : «Pierre Curie, en établissant que la radioactivité induite (ce que Rutherford appelait l'émanation) diminuait en fonction du temps.»

En réalité, Ernest Rutherford et Frederick Soddy avaient découvert, à Montréal, en 1902, que le thorium X, un radio-élément solide (que l'on a montré plus tard être un isotope du radium) se formait continuellement dans le thorium et se transformait spontanément, avec une période de quatre jours, en un gaz rare, l'émanation (nommée par la suite thoron, un isotope du radon) ; celle-ci, à son tour, se transformait en un dépôt solide, la radioactivité induite ou excitée (thorium A et thorium B). C'est pour avoir reconnu dans la radioactivité une telle série de transformations que Rutherford reçut le prix Nobel de physique en 1908. Il existe une sorte de propagation des erreurs d'un livre à l'autre, car celle-ci apparaît dans plusieurs ouvrages récents, et semble montrer que les auteurs ne remontent pas toujours aux publications originales.

Enfin je suis gêné par le chapitre concernant la mort de Pierre Curie, renversé par un fiacre, et par les deux ou trois chapitres consacrés à la liaison de Marie Curie et de Langevin : l'auteur se met à la place de Marie Curie et décrit ses pensées, les sentiments que celle-ci aurait dû éprouver. Il convient cependant de distinguer. Une science est un genre, tout à fait respectable, peut donner lieu à des ouvrages intéressants, mais Marie Curie est trop proche de nous pour que l'intrusion du second genre dans le premier ne provoque un léger malaise.

Cela dit, ce livre est passionnant.

Pierre RADVANYI