

Mai 1998

édition française de

SCIENTIFIC  
AMERICAN

Informatique et cinéma

La condensation  
de Bose-Einstein

La peau des crocodiles

Les peintres  
et la vision des couleurs

Le Sahara et le climat

Le coût du pétrole

Le pétrole au <sup>xxi</sup><sup>e</sup> siècle

L'exploitation minière  
du pétrole

Le gaz naturel

## Pétrole :

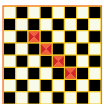
## vers la pénurie ?



**BLOC-NOTES**

de Didier Nordon

5



**JEU-CONCOURS**

**Promenades sur l'échiquier**

par Pierre Tougne

6



**TRIBUNE DES LECTEURS**

**POINT DE VUE**

**Unabomber**

par Anne Eisenberg

7



**PRÉSENCE DE L'HISTOIRE**

**Une fraude en embryologie**

par Michael Richardson

10

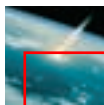


**SCIENCE ET GASTRONOMIE**

**La recette et le principe**

par Hervé This

15



**PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES**

■ Gènes de l'obésité

■ La mer envahit la Petite Camargue...

■ Impact ■ Un email particulier ■ Des nurseries familiales

■ Racines carnivores ■ L'avenir des personnes âgées

■ Autant en emporte le vent ■ Jouer avec les étoiles

■ Le ressort et l'amortisseur

16



**LOGIQUE ET CALCUL**

**La conjecture de Syracuse**

par Jean-Paul Delahaye

100

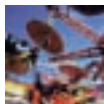


**VISIONS MATHÉMATIQUES**

**Bouteilles et rubans**

par Ian Stewart

106



**L'EXPÉRIENCE DU MOIS**

**Rotations culinaires**

par Shawn Carlson

108



**ANALYSES DE LIVRES**

■ Catalogue des Aphididae du monde, de Georges

Remaudière et Marc Remaudière

■ Les pucerons des arbres fruitiers, de Maurice Hullé, Évelyne

Turpeau, François Ceclant et Marie-Jeanne Rahn

■ Le legs de Claude Bernard, de Mirko Grmek

■ Histoire de la paléontologie, de Eric Buffetaut

■ Histoire des sciences arabes, sous la direction de Roshdi

Rashed, avec la collaboration de Régis Morelon

110

**Pétrole : vers la pénurie?**

**Comment prévenir la prochaine crise pétrolière?**

29

**La fin du pétrole bon marché**

par Colin Campbell  
et Jean Laherrère

La production mondiale de pétrole bon marché déclinera dans une dizaine d'années.

**L'extraction du pétrole à ciel ouvert**

par Richard George

Certains sables du Canada renferment plus de pétrole que n'en contiennent tous les gisements d'Arabie saoudite. On sait aujourd'hui exploiter ces ressources de façon rentable.

**La production du pétrole au XXI<sup>e</sup> siècle**

par Roger Anderson

De récents perfectionnements de l'imagerie souterraine, du forage téléguidé et de l'exploitation sous-marine permettront de mieux récupérer le pétrole.

**Des carburants liquides à partir du gaz naturel**

par Safaa Fouda

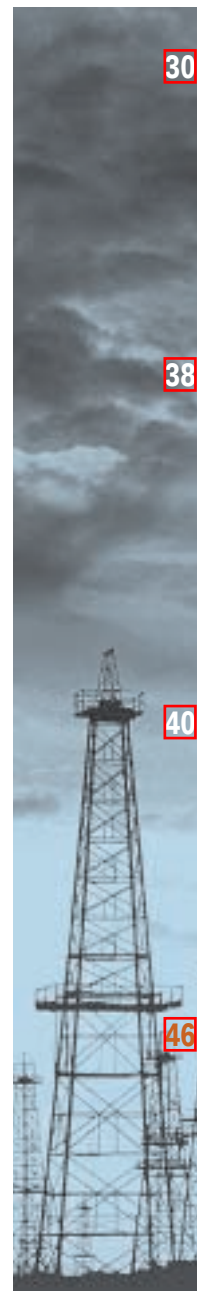
Le gaz naturel est plus propre et plus abondant que le pétrole. De nouveaux procédés chimiques le transforment en carburants liquides aussi efficaces et bon marché que l'essence.

**Les peintres et les anomalies de la vision**

52

par Philippe Lanthony

Une œuvre picturale traduit parfois une anomalie visuelle. Toutefois, aucun diagnostic ne saurait être posé par l'examen d'une toile.



**Les nanolasers**

58

par Paul Gourley

Les lasers à semi-conducteur sont devenus plus petits que la longueur d'onde de la lumière qu'ils émettent. Le comportement quantique des photons améliore le rendement.

**La simulation du mouvement humain**

66

par Jessica Hodgins

Utilisant les lois de la physique, des ordinateurs font courir, sauter ou plonger des personnages de dessins animés.

**Les poussières sahariennes**

72

par Stefano Guerzoni et Emanuela Molinaroli

Des poussières du Sahara traversent la Méditerranée et retombent sur l'Europe, notamment sous la forme de «pluies rouges».

**L'impact climatique des poussières d'Afrique**

78

par Cyril Moulin et Claude Lambert

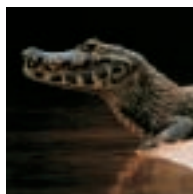
Les satellites mesurent les concentrations en poussières dans l'atmosphère terrestre.

**Trafic de caïmans**

84

par Peter Brazaitis, Myrna Watanabe et George Amato

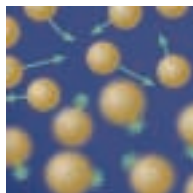
Le commerce frauduleux des peaux de caïman illustre combien une «exploitation raisonnable» des espèces menacées est difficile.

**La condensation de Bose-Einstein**

92

par Eric Cornell et Carl Wieman

La concrétisation d'un vieux rêve de physicien rapproche le monde quantique de notre vie quotidienne.

**ÉDITORIAL****La rançon du progrès...**

... est inéluctable. En vrac : les moquettes et les literies confortables suscitent une prolifération des acariens, les crassiers inesthétiques sont les conséquences de l'extraction du charbon, l'allongement de la durée de la vie amène une flambée des maladies liées à l'âge.

Les évidences abondent et les rumeurs circulent. D'autant que des moyens de diagnostic, toujours plus performants, mesurent avec une précision accrue les conséquences de nos actes. D'où la tentation de légiférer et de restreindre pour limiter les effets secondaires, considérés comme primordiaux quand ils empêchent l'utilisation du produit bénéfique. Ainsi l'interdiction de certains vaccins, dont on n'aurait pas prouvé qu'ils sont absolument inoffensifs empêchera, 1) leur utilisation, 2) les recherches futures.

C'est un fait. Nous sommes inquiets, et d'aucuns refusent cette course perpétuelle, admettent difficilement que les sociétés, comme les bicyclettes, dussent avancer pour rester stables. Voulons-nous échapper à cette règle? Le pouvons-nous?

Nous y serons peut-être obligés, par la limitation de la ressource énergétique primordiale : le pétrole. C'est mathématique : nous consommons plus de pétrole que nous ne pourrions bientôt en extraire économiquement (voir *Pétrole : vers la pénurie?*, pages 29 à 49). Nul doute que cette disette perturbera nos économies : nous en avons fait, par le passé, l'expérience.

Conclusion : en nous focalisant sur des risques éventuels, nous ne nous préoccupons pas assez des dangers majeurs. Dans les argumentations qui opposent écologistes, industriels et politiques, la portée des menaces est difficile à cerner. Pilate s'en lavait les mains. En bon gestionnaire, toute discussion lui semblait oiseuse : il savait que chacun sélectionne les faits qui militent en faveur de ses opinions... Il a fait école.

Philippe BOULANGER

## Sphinx protéiforme

**H**olmes, Poirot, Maigret, Burma... Ces héros relèvent tous d'un truc exploité par d'innombrables auteurs de romans policiers : le lecteur s'attache au détective, et, de roman en roman, est impatient de le revoir aux prises avec une nouvelle enquête où il exploite son talent. Il n'y a toutefois pas que l'enquêteur auquel on peut s'attacher : il y a la victime. Et ce que ni la vie ni la science ne peuvent, la fiction le peut. J'attends donc qu'un auteur lance un nouveau truc : la série de romans policiers où réapparaît la même victime. Le lecteur appréciera, de roman en roman, de retrouver le même malheureux assassiné chaque fois dans des circonstances plus horribles, et offrant un mystère toujours plus difficile à élucider.

## Dopage lacanien

**A**lerte ! Le dopage n'atteint plus seulement le sport. Il s'étend désormais aux analyses qui y sont consacrées. Dans le chapitre «La performance» de l'ouvrage collectif *Sport, psychanalyse et science* (PUF, 1997), Françoise Labridy écrit : «Si ce qui structure la performance, c'est un impossible à la prédire totalement, on peut en déduire une hypothèse de travail : la préparation physique et mentale est nécessaire pour permettre la réalisation de la performance, elle ne suffit pas à en garantir la réussite.» Les spécialistes

du dépistage auront reconnu là les contours typiques d'une prose gonflée aux hormones lacaniennes. En dégonflant ladite prose, la réflexion obtenue est aussi banale qu'indiscutable : quand on se lance dans une entreprise, on ne sait jamais d'avance comment elle tournera.

Quelle différence y a-t-il entre un sportif et l'analyste ? Privé de dopage, le sportif court plus vite ou saute plus haut que vous ou moi. Privée de ses béquilles langagières, l'analyste ci-dessus est incapable de penser mieux que vous ou moi.

## Cette obscure clarté...

**D**evant certaines recherches difficiles, j'éprouve un sentiment étrange : elles sont bien faciles ! Non pas à comprendre mais à créer. Oui, il arrive qu'un auteur, en développant sans limite une technique intellectuelle qui finit par ne plus satisfaire que lui, donne l'impression de se laisser aller. Il suit sa pente, laquelle l'a mené à des raffinements prodigieux et abscons. Il surajoute les obscurités de son esprit trop subtil à celles du monde. Parfois, j'ai songé *in petto* : «En s'imposant des travaux plus faciles, cet auteur aurait mieux compris le monde. Mais ça lui aurait été plus difficile.»

Ce jugement hardi, je ne savais l'étayer ; j'y voyais une façon de me consoler de mon incapacité à comprendre. Je viens heureusement de lire une très jolie formule, qui lui donne un début de justification.

«Notre intelligence est surtout exercée à résoudre des difficultés. Aussi avons-nous de la peine à prendre conscience de ce qui va de soi.» (Robert Hainard, *Le miracle d'être*, rééd. Sang de la Terre, 1997, p. 7.)

## Idée reçue 5 sur 5

«**C**'est que l'idée qu'on a d'Hoffmann est fausse, comme toutes les idées reçues», écrit Théophile Gautier dans ses *Souvenirs de théâtre*. Quand un scientifique tombe sur cette phrase, le paradoxe naît immédiatement dans son esprit, comme par réflexe conditionné : prétendre que toutes les idées reçues sont fausses est, en soi, une idée reçue – donc fausse. Du coup, l'affirmation de Gautier ne tient pas. Dommage ! Ça aurait été facile si, pour me faire une idée juste d'Hoffmann, il m'avait suffi de prendre le contre-pied de l'idée courant sur lui. Non. Pour juger Hoffmann, il faut se donner la peine de le lire – pardon : le plaisir de le relire.

La logique a beaucoup travaillé sur les phrases autoréférentes, inventant la notion de métalangage pour se sortir des pièges qu'elles tendent. Cela suffit-il à régler le cas ci-dessus ? Si oui, tant mieux. Sinon, qu'à cela ne tienne : il n'y aura qu'à élaborer le concept de méta idée reçue.

## Le premier pas qu'on goûte

**V**ous froissez de la tôle suite à un coup de volant malheureux en vous garant, par exemple. Vous êtes furieux contre vous-même. L'aimable garagiste, pour vous rasséréner, vous dit : «Allons, vous n'êtes pas le premier.» Quand une mésaventure de ce genre m'arrive, la formule «Vous n'êtes pas le premier» a tendance à accroître ma fureur. Pourquoi donc ? Pardi, c'est évident. Quelle que soit sa spécialité, un intellectuel n'a qu'un but : y être le premier – si ce n'est par l'antériorité, au moins par la qualité. Ne pas être le premier c'est se faire ramener brutalement au lot commun moutonnier. Double vexation : conduire comme un pied, et comme tout le monde !

Lorsque je serai agonisant, peut-être se trouvera-t-il une âme charitable pour murmurer à mon oreille : «Allons, pas tant d'histoires ! Vous n'êtes pas le premier à qui ça arrive.» Hé bien, si cette constatation de bon sens m'aide à franchir le pas, j'en serai... le premier étonné !

## Présomption d'innocence

**W**ouhhh... Une phrase 100 pour cent stupide ! Écrire par un prix Nobel, en plus ! Vous êtes prêts ? La voici. «Les enfants d'âge préscolaire sont tous des scientifiques, si, comme je le pense, on définit un scientifique comme celui qui pose des questions justes.» (Leon Lederman, postface à *L'apprentissage de l'incertain*, de Robert Germinet, Éd. Odile Jacob, 1997, p. 134.) Ne chicanons pas sur la notion bizarre de question «juste». Collons-la sur le dos du traducteur. Il en reste assez pour tailler un joli costard au nommé Lederman. En une phrase, il parvient à étaler :

- un orgueil et un esprit de corps mensongers : comme si les scientifiques ne s'engluaient pas dans des raffinements obscurs pour répondre à des questions oiseuses !
- une flagornerie, banale mais déplaisante, à l'égard des enfants, crédités *a priori*

d'une espèce de génie propre :

– le mépris à l'égard de l'école primaire puisque Lederman sous-entend que la plupart des enfants voient leur génie s'y éteindre peu à peu ;

– de la confusion mentale : sa «définition» est incapable de rendre compte de la spécificité de l'interrogation scientifique ;

– une mégalomanie puérile : croire que les enfants, si l'école ne les matraquait pas, développeraient tous une tournure d'esprit scientifique.

Dans le domaine de la pensée, le vide parfait existe. Lederman a réussi à le matérialiser en une phrase. Pitoyable démagogie !

# JEU-CONCOURS N° 47

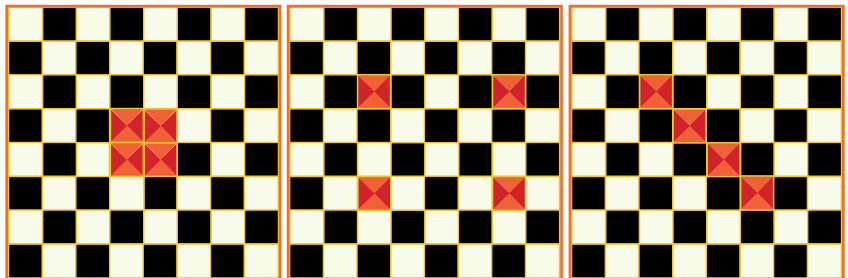
TIERRE LOUVAIN

## Promenades sur l'échiquier

Soit un pion dans le coin supérieur gauche d'un échiquier, qui ne peut se déplacer que d'une case vers le bas ou d'une case vers la droite. Il y a 3 432 chemins différents pour atteindre la case inférieure droite. Pouvez-vous calculer ce nombre de chemins sur les trois échiquiers ci-dessous où les cases rouges lui sont interdites ? Si l'on autorise en plus le pion à se déplacer en diagonale vers la droite et en bas, ce nombre de chemins atteint 48 639. Que deviennent les réponses précédentes dans ce cas ?

Question subsidiaire : sur un damier français (10 × 10), selon sa case de départ sur la première rangée, combien de façons le pion a-t-il d'aller à dame ? On suppose naturellement qu'il n'y a pas d'autres pions sur le damier et le pion ne se déplace qu'en diagonale et ne peut reculer.

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de mai 1998, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

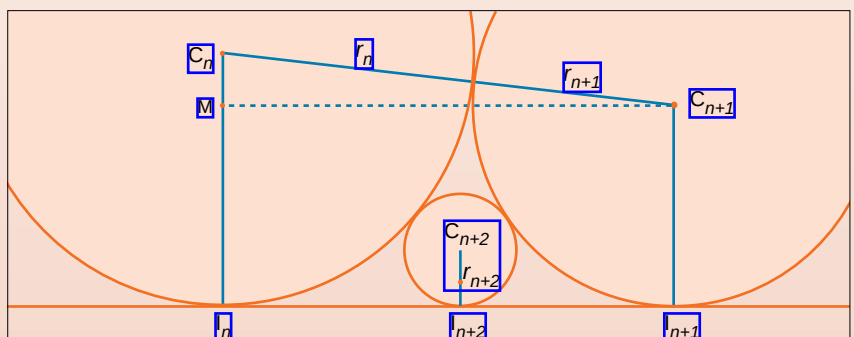


## RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 45

Les notations étant celles de la figure ci-dessous, le théorème de Pythagore appliqué au triangle  $C_n C_{n+1} M$  donne  $(r_n + r_{n+1})^2 = (r_n - r_{n+1})^2 + C_{n+1}^2 M^2$ , c'est-à-dire  $C_{n+1} M = l_n l_{n+1} = 2(r_n r_{n+1})^{1/2}$ . De même,  $l_n l_{n+2} = 2(r_n r_{n+2})^{1/2}$  et  $l_{n+2} l_{n+1} = 2(r_{n+2} r_{n+1})^{1/2}$ , soit en remplaçant dans l'égalité  $l_n l_{n+1} = l_n l_{n+2} + l_{n+2} l_{n+1}$ , on obtient après simplification par 2 :  $(r_n r_{n+1})^{1/2} = (r_n r_{n+2})^{1/2} + (r_{n+2} r_{n+1})^{1/2}$  que l'on peut réécrire :  $1/r_{n+2}^{1/2} = 1/r_{n+1}^{1/2} + 1/r_n^{1/2}$ . (1). D'autre part,  $l_{n+2}$  divise le segment  $l_n l_{n+1}$  dans le rapport  $(r_n/r_{n+1})^{1/2}$ , en effet,  $l_{n+2} l_n / l_{n+2} l_{n+1} = l_n l_{n+1} / l_{n+2} l_{n+1} - 1 = (r_n/r_{n+2})^{1/2} - 1 = r_n^{1/2} (1/r_{n+2}^{1/2} - 1/r_n^{1/2}) = (r_n/r_{n+1})^{1/2}$ . Si l'on désigne par  $x_n, x_{n+1}$

et  $x_{n+2}$  les abscisses de  $l_n, l_{n+1}$  et  $l_{n+2}$ , la relation précédente s'écrit :  $(x_{n+2} - x_n)(x_{n+1} - x_{n+2}) = (r_n/r_{n+1})^{1/2}$  que l'on peut mettre sous la forme :  $x_{n+2}/r_{n+2}^{1/2} = x_{n+1}/r_{n+1}^{1/2} + x_n/r_n^{1/2}$ . (2).

Posons  $u_n = 1/r_n^{1/2}$ , on a  $u_0 = u_1 = 1$  et (1) devient  $u_{n+2} = u_{n+1} + u_n$ , c'est-à-dire la suite de Fibonacci donc  $1/r_n^{1/2} = F_n$  ou encore  $r_n = 1/F_n^2$ . De même, si l'on pose  $v_n = x_n/r_n^{1/2}$ , on a  $v_0 = 0, v_1 = 2$  et (2) devient  $v_{n+2} = v_{n+1} + v_n$ , soit encore la suite de Fibonacci à un facteur 2 près et décalée d'un rang, donc  $x_n/r_n^{1/2} = 2F_{n-1}$  ou encore  $x_n = 2F_{n-1}/F_n$ . Quand  $n$  tend vers l'infini,  $x_n$  tend vers  $2/\phi = \sqrt{5}-1$ .



## Évoluons-nous ?

**S**elon Jean-Jacques Hublin, les plus récentes évolutions biologiques de l'espèce humaine seraient les conséquences de variations climatiques (voir *Climat de l'Europe et origine des Néandertaliens*, *Pour la Science*, mars 1998). L'homme actuel, réparti sur toute la planète, circule sans difficultés d'un continent à l'autre, et il a acquis un niveau technique qui nivelle les chances de survie et de reproduction de tous les individus : aucune caractéristique biologique ne procure plus d'avantage décisif. Tant que dureront ces conditions, peut-on envisager que l'évolution de notre espèce soit arrêtée ?

François GOURRAUD, Les Herbiers

## Réponse de Jean-Jacques Hublin

Au cours de l'évolution humaine, l'adaptation culturelle s'est progressivement ajoutée à l'adaptation biologique. À la différence des autres mammifères, les hommes ont conquis des milieux nouveaux, en grande partie grâce à des innovations techniques et non uniquement par des modifications anatomiques ou physiologiques. Il serait toutefois erroné de penser que l'humanité s'est totalement affranchie des pressions de sélection exercées par le milieu. Pour une bonne part, l'homme crée et modifie son propre milieu. Son évolution biologique ne s'est pas arrêtée, mais résulte, surtout pour les périodes récentes, de changements comportementaux.

## L'euro divisé

**D**idier Nordon propose de prendre comme sous-multiple de l'euro sa dix millièmes partie (voir *Bloc-notes*, *Pour la Science*, avril 1998), et de la nommer le liechtensto. Un dix millièmes c'est peu ! Prenons plus simplement le centième. Il existe un pays qui couvre le centième de l'Europe (bien que ne faisant pas partie de l'Union) et où tout le monde souhaite déposer son argent : la Suisse.

Marc VENOT

## Pompe à chaleur

**D**ans son *Bloc-notes*, Didier Nordon fait une extrapolation intéressante mais erronée du premier principe de la thermodynamique (voir *Pour la Science*, avril 1998). Entasser dans une pièce surchauffée à 40 °C des individus dont la température interne est de 37 °C ne rafraîchira pas l'atmosphère.

En effet, un être humain rayonne de l'énergie : environ 70 watts pour un adulte au repos. Cette énergie contribue à chauffer l'environnement. La température de 37 °C n'est que celle de l'intérieur de l'organisme, maintenue par des processus thermorégulateurs qui, dans une ambiance plus chaude, évacuent justement la chaleur vers l'extérieur. Dans cette situation, le corps humain fonctionne comme un réfrigérateur, qui maintient une température interne plus basse que son environnement, au détriment d'un gain d'énergie pour l'extérieur.

Thierry MARLIERE, Laon

## Milieux à protéger

**L**es articles de Maurice Mashaal et de Marc Ancrenaz, à quelques pages d'intervalle (voir *Les insectes, indices d'un genre nouveau ?* et *Retour à la nature*, *Pour la Science*, avril 1998), délivrent le même message, malgré la taille différente des animaux dont ils traitent, respectivement les insectes et les chimpanzés : la protection de toute faune n'est possible que par la protection du milieu naturel auquel elle est adaptée. C'est plus évident pour les insectes que pour les grands vertébrés, mais la difficulté de réinsertion de chimpanzés élevés en captivité, voire seulement en semi-captivité, en est une preuve : il serait tellement plus simple de laisser prospérer les troupes de chimpanzés encore sauvages.

Francis MARTIN, Clamart

## Fourier et ses prénoms

**L'**article d'E. Milotti sur *Le bruit en 1/f* (*Pour la Science*, avril 1998) fait appel à la décomposition des signaux en composantes sinusoïdales, nommée transformation de Fourier. Il renvoie au chapitre sur Jean-Baptiste Fourier du livre *Les mathématiciens* de la Bibliothèque *Pour la Science*. Or, au cimetière du Père Lachaise, la tombe du physicien et mathématicien, mort en 1830, porte le nom de Joseph Fourier. Est-ce bien le même homme ?

Aimé DRUILHET



## Réponse de l'éditeur

Selon le livre consacré à Fourier par Jean Dhombres et Jean-Bernard Robert, à paraître aux éditions Belin, son acte de baptême, daté du 21 mars 1768 à Auxerre, ne porte que les deux prénoms Jean et Joseph. Il se fera toutefois par la suite appeler Jean-Baptiste et, plus simplement, Joseph.

## Plus haut plus bas

**L**es gratte-ciel des années 1930 (l'immeuble Chrysler et l'Empire State Building) ont été construits alors que la grande dépression économique atteignait les États-Unis. Les érections du World Trade Center et de la tour Sears coïncidèrent avec les difficultés économiques des années 1970. Alors que la construction des tours Petronas s'achève en Malaisie (voir *Les plus hautes tours du monde*, par Cesar Pelli, Charles

Thornton et Leonard Joseph, *Pour la Science*, février 1998), une crise économique apparaît brusquement dans cette région du monde. Ce n'est pas très étonnant : pendant les crises, les symboles prennent le pas sur les réalités.

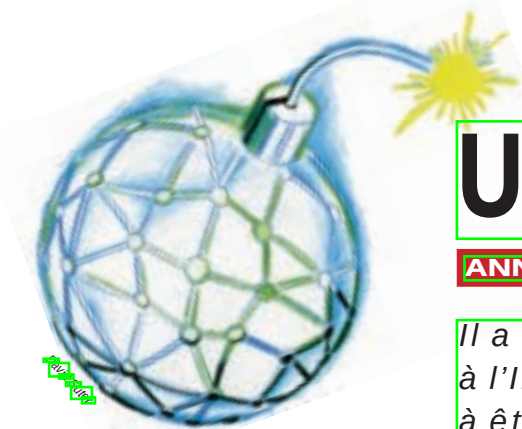
Meredith POOR, San Antonio

## Richesse génétique

**L'**article *Le syndrome de Williams*, par H. Lenhoff, P. Wang, F. Greenberg et U. Bellugi (*Pour la Science*, février 1998) révèle les étonnantes capacités artistiques de personnes atteintes de ce syndrome. Faudrait-il dépister celui-ci avant la naissance et éliminer les porteurs du gène défectueux ? J'attends avec impatience que la génétique améliore la santé humaine, mais je redoute que de telles questions se posent à propos d'un nombre de maladies de plus en plus grand.

Robert SHEELER, Rochester

**Ecrivez à Pour la Science vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique. Courriel électronique :**  
101641.3525@compuserve.com. Retrouvez la Tribune sur l'Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>



# Unabomber

ANNE EISENBERG

*Il a combattu la technique, mais c'est grâce à l'Internet que ses idées continueront peut-être à être véhiculées.*

« C'est un bien triste jour », déclarait, le 22 janvier 1998, un des adeptes de Theodore Kaczynski : ce dernier, qui avait naguère pris le pseudonyme d'Unabomber, venait d'accepter de plaider coupable pour avoir envoyé des bombes, qui ont tué trois personnes et blessé plusieurs autres. L'activiste avait envoyé par la poste des bombes qui explosaient quand le destinataire ouvrait le paquet. En 1980, le président de la Compagnie *United Airlines* fut blessé chez lui, à Chicago ; en 1982, un professeur fut blessé à l'Université de Berkeley ; en 1993, un généticien de l'Université de San Francisco reçut un colis piégé chez lui, etc. Pourtant, ses partisans regrettaient cette décision qui les empêcheraient d'assister à un procès où T. Kaczynski aurait présenté ses arguments, où il aurait attaqué la science et les scientifiques, la technique et les technocrates.

De nombreux Américains étaient également de cet avis, car, sur le réseau Internet, les idées politiques de T. Kaczynski ont reçu un écho favorable. Il fait circuler un manifeste de 35 000 mots, intitulé *La société industrielle et son avenir*, où il appelait à une révolution contre le système industriel, affirmant qu'il était un désastre pour la race humaine. Les écrits d'Unabomber suscitaient de l'intérêt et des discussions passionnées, surtout parmi les anarchistes, les adversaires de la technique, les écologistes les plus radicaux et tous ceux pour qui le temps des idées anti-industrielles est arrivé.

D'autres trouvèrent les idées de T. Kaczynski sinon intéressantes, du moins cohérentes. Selon James Wilson, professeur de sciences politiques de l'Université de Los Angeles, rien dans le manifeste ne laisse transparaître les propos d'un fou. Le langage y est clair et précis : les arguments sont développés avec prudence, dénués de propos irrationnels. Outre ses appels à une révolution (mal définie), son texte ressemble à la dissertation qu'un très bon élève aurait pu rédiger. Selon J. Wilson, il n'est pas fou, car son texte n'est pas très éloigné de ceux des philosophes qui se sont inté-

ressés à la politique, tels Jean-Jacques Rousseau ou Karl Marx.

Toutefois, cette opinion n'est pas partagée par tous, et différents commentateurs ont souvent qualifié les écrits de T. Kaczynski d'élucubrations et de divagations incohérentes et décousues. Ces qualificatifs ont progressivement étayé la thèse de la folie.



Theodore Kaczynski, à Berkeley, en 1968.

D'autres poseurs de bombes, notamment Ramzi Yousef et Timothy McVeigh, n'ont pas été qualifiés de fous. Quand R. Yousef a été condamné à la prison à vie pour avoir conçu l'attentat contre le *World Trade Center*, il déclara qu'il était fier de ce qu'il avait fait, et personne ne le prit pour un fou. Diabolique, oui, mais pas fou. On n'a pas dit non plus de T. Kaczynski qu'il avait été influencé, comme T. McVeigh responsable de l'attentat d'Oklahoma City.

L'étiquette qui fut collée à T. Kaczynski résulte sans doute d'une idée que le public se fait plus ou moins consciemment des scientifiques : sales, les yeux hébétés, ébouriffés, une caricature du savant fou. T. Kaczynski est un scientifique déchu, façonné par la technique, mais se battant contre elle. Dans son manifeste, il écrivait : la science est aveugle et ne se

préoccupe pas du bonheur de l'homme ; elle n'obéit qu'aux aspirations des scientifiques et des politiciens, et aux instances qui fournissent l'argent de la recherche.

Quand T. Kaczynski, ancien étudiant d'Harvard des années 1960 et ancien mathématicien, se présenta dans la salle du prétoire, il apparut comme une réminiscence importune, aussi anachronique que ces soldats japonais qui, après la Seconde Guerre mondiale, ont préféré se terroriser à se rendre. On avait l'impression qu'il continuait à défendre des idées surannées, celles qui, dans les années 1960, étaient véhiculées par les adversaires du système politique en place.

Le manifeste d'Unabomber prônait la violence, ce qui, 30 ans plus tôt, serait peut-être passé inaperçu, mais qui pouvait être choquant aujourd'hui : « Pour que notre message ait quelque chance d'être entendu du public, nous devons faire des victimes. » Bien que la génération des années 1960 fut en faveur de la paix, certains pacifistes considéraient la violence comme un acte politique parfois inévitable. L'Internet, qui favorise les discussions planétaires, ressuscite l'époque troublée des années 1960 où circulaient des dizaines de manifestes âprement débattus et, parfois, sources de violences.

Les débats politiques ne sont plus guère en vogue aujourd'hui. La vie privée et les actions en bourse semblent être les seules préoccupations de nos contemporains. Les discussions politiques ne font plus recette et les manifestes politiques à la manière de celui de T. Kaczynski ont quasiment disparu.

La campagne violente d'Unabomber contre la technique et les technocrates est terminée. Le jugement de l'affaire devrait être rendu le 15 mai. Il sera vraisemblablement condamné à la prison à vie, sans libération anticipée possible. Peut-être survivra-t-il sur l'Internet où les fantômes de ses protestations continueront à être véhiculés par cette technique de pointe qu'il a si violemment combattue.

Anne EISENBERG est journaliste scientifique à New York.





# Une fraude en embryologie

MICHAEL RICHARDSON

*Pour «prouver» que les embryons précoces de toutes les espèces de vertébrés se ressemblent, Haeckel a falsifié ses dessins.*

Les espèces diffèrent-elles parce que leurs modes de développement embryonnaire ne sont pas identiques ? Au XIX<sup>e</sup> siècle, pour tenter de répondre à cette question, les embryologistes comparaient l'aspect des embryons de vertébrés au même stade de développement. Puis, cette facette de l'embryologie, dite comparée, est tombée dans l'oubli. Aujourd'hui, la question resurgit, car les biologistes moléculaires ont montré que le développement embryonnaire de nombreuses espèces est commandé par les mêmes gènes. Jonathan Slack et ses collègues de l'Université de Bath ont émis l'hypothèse que la similitude des gènes du développement justifierait les conceptions des biologistes de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle sur l'embryogenèse et l'évolution : ils pensaient que l'embryogenèse est un condensé de l'évolution, que tous les embryons passent par un stade précoce identique, le stade phylotypique, sur lequel l'évolution n'aurait aucune prise, et que les différences interspécifiques apparaissent ultérieurement.

Toutefois, à y regarder de plus près, on s'aperçoit que le stade phylotypique – un concept qui semble pourtant évident aux biologistes – ne correspond pas à un stade du développement bien précis, et l'on s'interroge : le stade phylotypique existe-t-il ? En fait, cette notion est issue des travaux que le biologiste allemand Ernst Haeckel a réalisés à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et au début du XX<sup>e</sup>. Hélas, il a modifié la réalité pour l'adapter à sa thèse et a falsifié ses dessins pour tenter de prouver que tous les

embryons précoces se ressemblent au stade phylotypique.

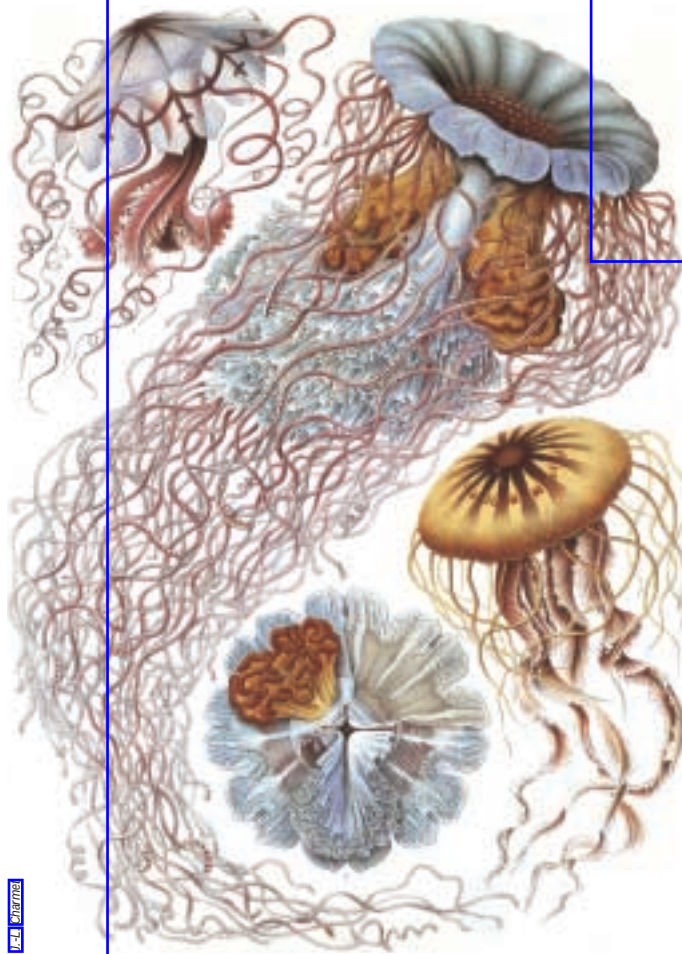
De son vivant, Haeckel fut aussi célèbre que Charles Darwin. Il tenta d'unifier embryologie et évolution en une théorie audacieuse sur l'origine de la vie, selon laquelle, les animaux évolueraient quand apparaissent de nouveaux stades du développement embryonnaire, qui s'ajouteraient aux stades de développement de l'ancêtre commun. Puis, cette théorie a été abandonnée, ternissant la gloire passée de son auteur.

Haeckel aimait dessiner et, au cours d'un voyage en Sicile, il y trouva la lumière si délicate qu'il fut même tenté d'abandonner la science pour se consacrer à la peinture. Ses illustrations étaient souvent de qualité, notamment lorsqu'il dessinait des méduses et autres animaux marins. Ses dessins d'embryons sont parmi les plus connus de l'embryologie et ils illustrent, aujourd'hui encore, certains ouvrages de biologie moléculaire, de biologie du développement et de biologie de l'évolution. Il les a lui-même publiés dans plusieurs livres, les complétant progressivement, ajoutant de nouvelles espèces ou de nouvelles étapes de développement. Pourquoi ces dessins ont-ils eu tant d'influence sur les biologistes ? Comment a-t-on découvert qu'ils sont faux ?

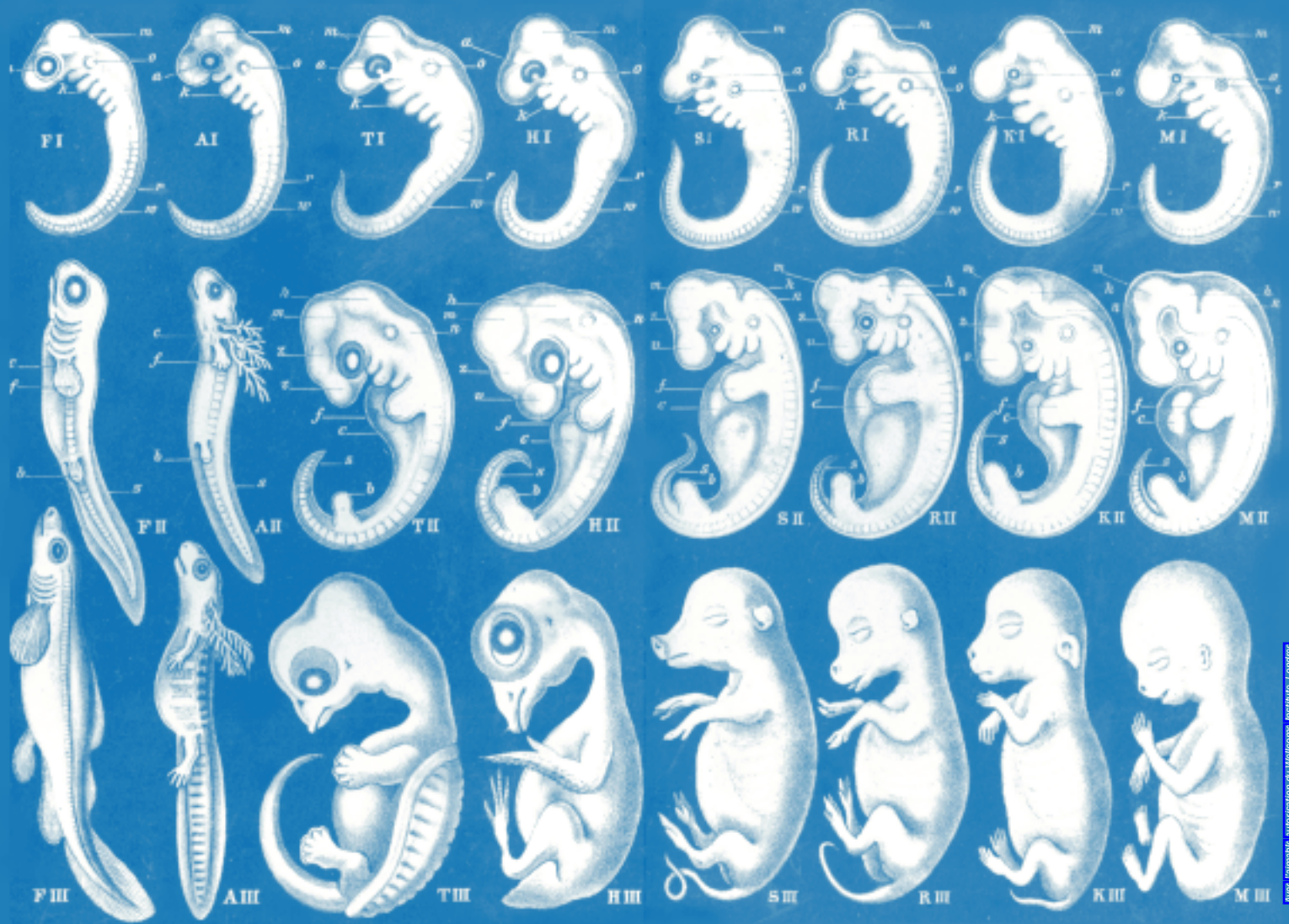
## L'EMBRYOLOGIE AU XIX<sup>e</sup> SIÈCLE

Charles Darwin considérait que l'embryologie apportait plusieurs preuves à sa théorie de l'évolution. En 1828, l'embryologiste Karl von Baer montra combien les embryons des différentes espèces de vertébrés se ressemblent. Au XIX<sup>e</sup> siècle, cette idée était l'une des plus choquantes de la théorie de l'évolution, car elle ramenait l'homme au rang de l'animal, le considérant comme un mammifère parmi les autres. Pourtant, il est écrit dans la Bible que Dieu créa l'homme à son image.

Comment les évolutionnistes pouvaient-ils alors prétendre que l'homme et le singe partageaient un ancêtre commun ? Pour valider la théorie



1. Les méduses dessinées par Ernst Haeckel ont fait sa renommée.



Avec l'aimable autorisation du Wellcome Institute, Londres

**2. Les dessins d'embryons d'Haeckel ont longtemps servi de références dans les ouvrages de biologie et d'embryologie. Ils montrent plusieurs espèces à un stade de développement embryonnaire précoce (en haut), puis à deux stades ultérieurs (au milieu et en bas). Haeckel voulait mon-**

**trer (et pour ce faire a falsifié la première ligne) que toutes les espèces passent par le même stade embryonnaire précoce. Il a représenté une espèce par colonne : de gauche à droite, le poisson, la salamandre, la tortue, le poulet, le porc, la vache, le lapin, l'homme.**

de l'évolution, Haeckel fonda toute son argumentation sur l'embryogenèse... n'hésitant pas à forcer le trait, pour illustrer ses convictions.

Dans son ouvrage, publié en 1874, *Anthropogénie ou L'évolution de l'homme*, Haeckel utilise l'anatomie, l'anthropologie, la paléontologie et, surtout, l'embryologie pour étayer sa théorie de l'évolution. L'ouvrage est illustré de plusieurs dessins d'embryons réalisés par un artiste d'après les instructions d'Haeckel (voir la figure 2). Ils représentent huit animaux à trois stades de leur développement embryonnaire. Chaque espèce occupe une colonne et les lignes correspondent à des stades de développement identiques (en haut le jeune embryon au stade phylotypique, au milieu l'embryon plus âgé, et en bas le fœtus ou même le jeune, après la naissance).

Le message d'Haeckel était clair : les hommes et les animaux se développent à partir d'embryons quasi iden-

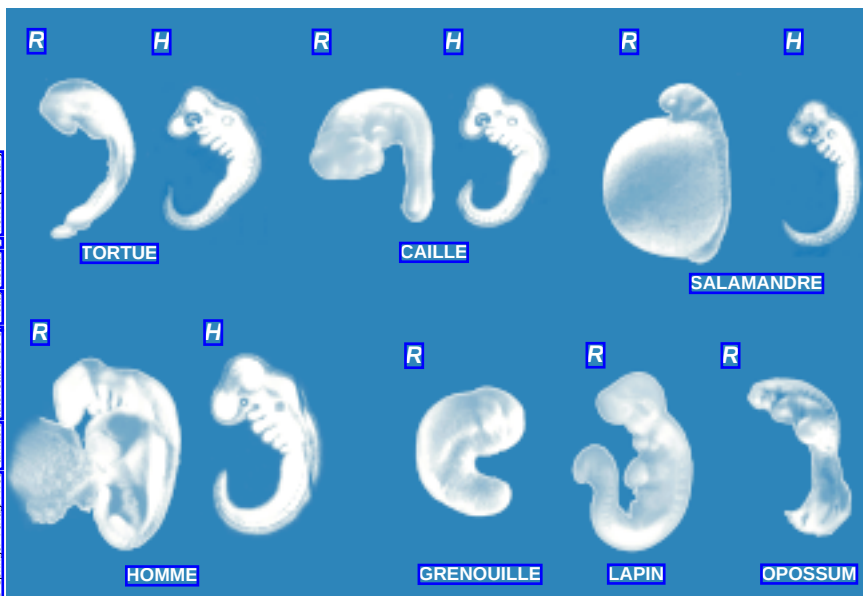
tiques, donc ils ont la même histoire évolutive. Aujourd'hui, cette thèse est contestée. Les embryologistes ne considèrent plus que les dessins d'Haeckel donnent des informations sur l'évolution des espèces, tout au plus montrent-ils que les embryons précoces d'humains et d'animaux se ressemblent beaucoup, et que les traits spécifiques des différentes espèces s'accroissent avec le développement.

### LE RÉEXAMEN DES EMBRYONS

Ainsi, l'embryon de poisson ressemble de plus en plus à un poisson quand ses nageoires et ses branchies apparaissent. Cette différenciation progressive de l'aspect des différentes espèces se nomme divergence. Toutefois les dessins d'Haeckel véhiculent un message encore bien plus controversé : les embryons précoces n'ont pas évolué.

L'hypothèse du stade embryonnaire conservatif d'Haeckel est tout à fait compatible avec le conservatisme génétique du développement, aujourd'hui établi. Les gènes nommés *homeobox* sont des gènes essentiels du développement : en activant ou en inhibant d'autres gènes, ils agissent comme des interrupteurs du développement. Les gènes *homeobox* de la drosophile sont très proches de ceux des vers, de la souris, du poisson et de l'homme, etc.

Néanmoins, les embryons que nous présente Haeckel se ressemblent-ils à ce point ? N'y a-t-il vraiment pas de différences entre un embryon de poisson et un embryon humain ? Pour le savoir, nous avons récemment comparé les dessins d'Haeckel avec des embryons réels. Nous avons examiné les embryons de nombreux vertébrés, notamment de poissons, de reptiles, d'oiseaux et de mammifères. Nous avons sélectionné des embryons qui étaient au même stade



**3. Des embryons précoces d'espèces différentes ont été photographiés au même stade de développement. On a placé des embryons «réels» (R) à côté des dessins correspondants d'Haeckel (H). Les embryons réels sont notablement plus variés que n'avait voulu le faire croire Haeckel : ils n'ont ni la même taille ni la même forme.**

de développement que les embryons les plus précoces d'Haeckel. Nous avons découvert avec stupéfaction que la nature n'imitait pas l'art, et que les embryons, présumés identiques, diffèrent.

D'abord, les embryons à un stade identique de développement n'ont pas la même taille. Ce résultat contredit les données fournies par certains livres de référence encore en usage, où les embryons de vertébrés ont la même taille au même stade de développement. Or, dans notre étude, le plus petit de nos embryons (un poisson) mesurait moins d'un millimètre, tandis qu'au même stade d'autres embryons sont dix fois plus gros. Ainsi, la taille des embryons est une cible de la sélection naturelle. De surcroît, nous avons observé une variété étonnante de la forme de ces embryons (voir la figure 3).

En 1995, j'ai montré que les organes se développent à des moments différents selon les espèces. Ainsi, chez les embryons marsupiaux, les membres antérieurs apparaissent bien plus tôt que chez les mammifères placentaires, la souris par exemple. Les marsupiaux ont besoin très tôt de leurs membres antérieurs, car le nouveau-né doit se frayer un chemin jusqu'à la poche d'incubation de sa mère. À cause de ces membres antérieurs précoces, les marsupiaux n'ont pas le même aspect que les autres embryons de vertébrés.

Ainsi, au cours de l'évolution, la chronologie des événements du développement embryonnaire a changé. Les poissons-zèbres illustrent ce propos : la plupart des embryons de vertébrés ont des fentes branchiales sur les côtés du

cou. Chez le poisson zèbre, ces fentes apparaissent tardivement ; le cœur aussi apparaît plus tard que chez les animaux à sang chaud.

Haeckel a donné une vision fautive du développement embryonnaire, mais sa supercherie va plus loin. Les dessins d'Haeckel contiennent tant d'erreurs qu'il ne s'est certainement pas contenté de reproduire de vrais embryons. Par exemple, tous les embryons qu'il a dessinés sur la ligne supérieure de la planche reproduite sur la figure 2 sont dépourvus de membres et de nageoires, tandis que ces structures sont bel et bien présentes sur les embryons au stade dessiné. Les embryons précoces ne sont pas les seuls erronés : le poisson le plus âgé a quatre branchies, au lieu de cinq en réalité, il a le museau d'un mammifère et surtout, il a les nageoires d'un poisson d'une autre espèce. C'est un poisson-puzzle dont les pièces proviennent d'espèces différentes.

### LA RECONSTRUCTION DES CHAÎNONS MANQUANTS

Nos travaux ont montré que les dessins d'Haeckel n'étaient ni précis ni corrects. Nous ne sommes pas les premiers à porter un jugement critique sur le travail d'Haeckel : il fut attaqué par plusieurs embryologistes qui mirent en doute sa démarche scientifique. Les condamnations vinrent aussi des créationnistes, qui accusaient les représentations d'Haeckel d'être incompatibles avec la création divine. Accusé d'avoir falsifié ses dessins, Haeckel se défen-

dit dans plusieurs journaux : «Un petit nombre (six à huit pour cent) de mes dessins d'embryons sont des faux, [...], c'est-à-dire ceux pour lesquels le matériel disponible est si incomplet et si insuffisant que j'ai été contraint de compléter et de reconstruire les chaînons manquants...»

Une telle confiance jette quelque doute sur l'ensemble des dessins : lesquels correspondent à la réalité ? Lesquels sont invention ? Pourquoi les dessins d'Haeckel ont-ils continué à être reproduits dans de nombreux ouvrages de référence en embryologie, publiés au  $xx^e$  siècle ? Parce que de moins en moins de biologistes parlent allemand, que les rares germanophones n'ont pas lu les confessions d'Haeckel, et que l'embryologie comparative a été progressivement négligée au profit de l'embryologie expérimentale et de la génétique.

Quels enseignements peut-on tirer de cette mésaventure ? Tout d'abord que toutes les espèces n'ont pas le même développement embryonnaire. Certes, tous les vertébrés ont hérité, de leur ancêtre commun, le même scénario de développement embryonnaire, mais ce scénario a évolué. Les embryons identiques d'Haeckel n'ont existé que dans les livres, et personne n'observera jamais ces archétypes qui représentent tous les embryons de vertébrés en général, mais aucune espèce en particulier.

Notre étude a révélé une variété notable des embryons précoces, et nous pensons que tous les mécanismes du développement embryonnaire ne sont pas nécessairement identiques pour toutes les espèces : contrairement à ce que pensait Haeckel, la sélection ne semble pas avoir eu pour seules cibles les animaux adultes ; les mécanismes évolutifs agissent aussi sur les embryons.

**Michael RICHARDSON est professeur d'anatomie et de biologie du développement à la faculté de Médecine de l'Hôpital Saint-George, à Londres.**

**L. SZYFMAN, Les prétendues falsifications d'Ernst Haeckel et son triomphe sur ses diffamateurs, in Bull. Biol., vol. 113, pp. 375-406, 1979.**

**M. RICHARDSON, Heterochrony and the Phylotypic Period, in Dev.Biol, vol. 172, pp. 412-421, 1995.**

**E. PENNISI, Haeckel's Embryos : Fraud Rediscovered, in Science, vol. 277, pp. 1435, 1997.**

**M. RICHARDSON et al., There is no Highly Conserved Embryonic Stage in the Vertebrates : Implications for Current Theories of Evolution and Development, in Anat. Embryol., vol. 196, pp. 91-106, 1997.**



# La recette et le principe

HERVÉ THIS

*L'invention de nouvelles recettes.*

**N**ous cuisinons comme au Moyen Âge : nous nous contentons d'exécuter mécaniquement des recettes rebattues. À l'heure où l'humanité envoie des sondes sur Mars ! Nous verrons, à propos des cuissons, comment la réflexion et la rationalité engendrent la créativité.

Certaines cuissons sont « pures » : elles ne font appel qu'à un seul phénomène physique. Les plus anciennes sont celles où la chaleur est apportée par conduction ; seul change le fluide qui transporte la chaleur.

Le premier type est la mise en contact des pièces à cuire avec un solide chaud : sur des pierres chauffées dans la braise, sur une plaque de fonte chauffées par un feu quelconque, dans une croûte de sel, dans un moule chauffé par un feu ou dans un four (cuisson des crêpes, des flans, etc.).

La chaleur, d'autre part, peut être apportée par un liquide chaud. Si ce liquide est de l'eau bouillante, la cuisson donne un « bouilli » ; si c'est de l'eau ou une sauce frémissantes, on obtient les pochages, les fricassées, les blanquettes, les matelotes, les salpicons. Et si le liquide chauffant est un corps gras, la cuisson est une friture, un poêlage ou un sauté.

On peut aussi chauffer par l'intermédiaire d'air. S'il est sec, à une température supérieure à 100 °C, c'est le rôtissage au four ; s'il est sec et à moins de 100 °C, c'est le séchage ou le fumage ; par l'in-

termédiaire d'air humide, c'est l'étuvage, la cuisson à la vapeur, la cuisson en papillotes, la cuisson en croûte.

La cuisine classique française sait également apporter la chaleur sans contact, par des rayonnements infrarouges : c'est le rôtissage à l'ancienne (dans le vrai rôtissage, le rôti doit être placé devant le foyer, et non au-dessus). Un laser et, plus généralement, des ondes visibles de haute énergie pourraient être utilisées pour effectuer la même opération, mais l'effet serait analogue.

Notons enfin que la science a récemment (à l'aune de l'histoire de la cuisine) innové avec la cuisson aux micro-ondes : cette fois, la chaleur est directement transférée dans l'aliment. Et, pour terminer, certains peuples utilisent un acide pour cuire : c'est la méthode des poissons à la tahitienne.

La cuisine classique superpose ou enchaîne parfois plusieurs de ces types purs : par exemple, les grillades résultent parfois d'un chauffage par rayonnement et d'un chauffage par l'intermédiaire d'un fluide sec ; et les braisés anciens s'obtenaient par un brunissage extérieur des viandes, dans un four chaud, puis par cuisson dans un liquide frémissant.

D'autres enchaînements sont-ils possibles ? Reprenons les méthodes de Dmitri Mendeleïev, qui, pour comprendre le désordre des éléments chimiques, avait construit un tableau, où il classait les élé-

ments par ordre de masse atomique, tout en regroupant par colonnes les éléments aux propriétés chimiques analogues. Ici, nous proposons de construire un tableau dont les entrées, en ligne, comme en colonne, sont les types purs de cuisson. À l'intersection d'une ligne et d'une colonne, on indique le type de cuisson qui résulte d'abord de la cuisson indiquée en ligne, puis de la cuisson qui identifie la colonne.

Certaines cases de ce tableau correspondent à des opérations connues. Par exemple, la case 92 (acidité, puis cuisson dans un liquide frémissant) correspond à la cuisson classique du sanglier. La case 27 (cuisson à l'eau bouillante, puis friture) correspond à certaines recettes de pommes de terre frites.

Toutefois d'autres cases renvoient à des procédés inconnus. Ne pourrait-on inventer de nouvelles méthodes de cuisson qui correspondraient à ces cases ? Dans certains cas, le procédé suggéré par l'application mécanique de la méthode semble sans intérêt : pourquoi cuirait-on deux fois de suite par contact avec un solide (case 1) ? Les cases diagonales, toutefois, ne sont pas inutiles : la case 67 (deux fritures) correspond à la cuisson des frites à deux bains. Alléons des procédés sont à inventer. La case 63, par exemple, correspond à une friture, puis à une cuisson à l'eau bouillante. Dans un tel cas, la friture engendrerait une couche de surface asséchée, et dure, mais aussi des arômes spécifiques ; certes, la cuisson ultérieure dans de l'eau bouillante détruirait le croustillant, mais elle aurait pour intérêt de répartir les molécules aromatiques créées lors de la première opération. Le goût serait ainsi bien différent de celui que l'on obtiendrait lors d'un braisage.

Ce n'est là qu'un exemple. Les cases sont nombreuses, tout comme les possibilités nouvelles, et l'on attend que des chefs inspirés explorent la voie ainsi ouverte.

**Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 27 mai 1998, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.**

|                 | EAU FRÉMISSANTE<br>SOLIDE | EAU BOUILLANTE | AIR SEC TIEDE | AIR SEC CHAUD | AIR HUMIDE | HUILE | INFRAROUGES | MICRO-ONDES | ACIDITE |     |
|-----------------|---------------------------|----------------|---------------|---------------|------------|-------|-------------|-------------|---------|-----|
| SOLIDE          | 1                         | 2              | 3             | 4             | 5          | 6     | 7           | 8           | 9       | 10  |
| EAU FRÉMISSANTE | 11                        | 12             | 13            | 14            | 15         | 16    | 17          | 18          | 19      | 20  |
| EAU BOUILLANTE  | 21                        | 22             | 23            | 24            | 25         | 26    | 27          | 28          | 29      | 30  |
| AIR SEC TIEDE   | 31                        | 32             | 33            | 34            | 35         | 36    | 37          | 38          | 39      | 40  |
| AIR SEC CHAUD   | 41                        | 42             | 43            | 44            | 45         | 46    | 47          | 48          | 49      | 50  |
| AIR HUMIDE      | 51                        | 52             | 53            | 54            | 55         | 56    | 57          | 58          | 59      | 60  |
| HUILE           | 61                        | 62             | 63            | 64            | 65         | 66    | 67          | 68          | 69      | 70  |
| INFRAROUGES     | 71                        | 72             | 73            | 74            | 75         | 76    | 77          | 78          | 79      | 80  |
| MICRO-ONDES     | 81                        | 82             | 83            | 84            | 85         | 86    | 87          | 88          | 89      | 90  |
| ACIDITE         | 91                        | 92             | 93            | 94            | 95         | 96    | 97          | 98          | 99      | 100 |



## Gènes de l'obésité

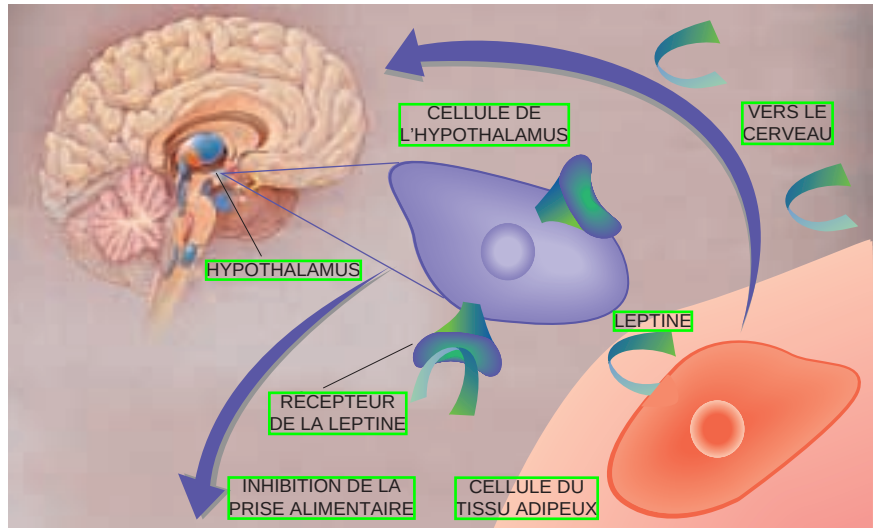
**Quand les signaux de la satiété sont inefficaces, l'obésité s'installe.**

**D**epuis quelques années, on sait que les souris ayant les deux copies de leur gène *ob* mutées sont obèses. Normalement, ce gène code une « hormone de satiété », la leptine : elle est produite exclusivement dans le tissu adipeux et module la prise alimentaire en fonction de la dépense énergétique. Quand la masse grasseuse augmente trop, l'hormone agit sur un « centre de la satiété » localisé dans l'hypothalamus qui, en retour, inhibe l'appétit. Ainsi, chez la souris, certaines obésités sont dues à des mutations du gène de la leptine (l'hormone synthétisée est anormale, donc inefficace). On a aussi montré que l'obésité résulte parfois de mutations du récepteur de la leptine, localisé dans le cerveau ; dans ce cas, même si l'hormone est normale et en quantité suffisante, elle est inefficace, car son récepteur anormal ne transmet pas le signal de régulation pondérale. Des équipes françaises viennent de montrer que ces résultats s'appliquent aussi à l'homme.

Ainsi, Donny Strosberg et ses collègues de l'Institut Cochin de génétique moléculaire ont trouvé, chez trois personnes obèses d'une même famille, une concentration anormalement faible en leptine. Le gène codant cette hormone contenait une mutation ponctuelle, et les trois personnes atteintes avaient les deux copies du gène *ob* mutées. Les autres membres des familles de ces personnes n'étaient pas obèses : elles avaient soit deux copies normales du gène *ob*, soit une seule copie mutée (la copie normale suffit alors à assurer une régulation pondérale normale).

On savait aussi que l'obésité inhibe les fonctions reproductrices de la souris. L'étude de l'Institut Cochin le confirme pour l'homme : sur les trois patients obèses, un garçon de 22 ans était encore impubère et une femme de 34 ans avait une absence totale de règles.

De plus, Philippe Froguel et ses collègues de l'Institut Pasteur de Lille viennent de publier que, comme chez la souris, le récepteur de la leptine contrôle également la satiété chez l'homme. Ils ont trouvé, chez trois sœurs obèses (pesant plus de



La leptine est une hormone sécrétée par le tissu adipeux. Véhiculée par le sang jusqu'au cerveau, elle se lie à son récepteur, localisé sur les cellules de l'hypothalamus. Cette fixation déclenche une cascade de réactions qui aboutissent à l'inhibition de la prise alimentaire. Quand la leptine n'est pas synthétisée ou que son récepteur est anormal, le signal de satiété n'est pas déclenché et la personne devient obèse.

130 kilogrammes), dont le gène *ob* est normal, une mutation du gène du récepteur de la leptine. La protéine est synthétisée en grande quantité puisque le tissu adipeux est abondant, mais le récepteur est incomplet, donc inefficace.

Cette anomalie génétique se traduit par une obésité précoce (159 kilogrammes à 13 ans pour une des sœurs, 133 et 166 pour les deux autres sœurs, à 19 ans) et par des troubles du comportement alimentaire. Ces filles, dont les deux copies du gène codant le récepteur de la leptine sont mutées, sont restées impubères. Outre l'inhibition des fonctions de la reproduction, on note chez ces patientes un retard de croissance et une insuffisance thyroïdienne. Un récepteur fonctionnel de la leptine est indispensable à la régulation de la masse corporelle, mais aussi à la maturité sexuelle et à la sécrétion de diverses hormones. Ainsi la leptine ne commande pas seulement la masse corporelle, elle semble être aussi un signal nécessaire au déclenchement de la puberté. Que le signal lui-même ou son récepteur soit anormal, et la puberté n'a pas lieu.

Toutefois, beaucoup d'obèses n'ont de mutations ni sur le gène de la leptine ni sur celui de son récepteur. Il se pourrait qu'ils aient d'autres gènes mutés : par exemple, ceux qui codent des protéines de la chaîne de régulation déclenchée par la liaison de la leptine à son récepteur.

## La mer envahit la Petite Camargue...

**...pourquoi ne pas la laisser faire?**

**D**u 16 au 18 décembre 1997, le golfe du Lion a été agité par une tempête telle qu'il ne s'en produit que tous les 20 ou 30 ans. Le littoral a été balayé de rafales de vent dont les plus rapides atteignaient 150 kilomètres à l'heure. Le niveau de la mer s'est élevé jusqu'à 1,6 mètre au-dessus de sa cote habituelle, tandis que déferlaient des vagues d'une dizaine de mètres de haut. Cette tempête a accentué l'érosion du rivage de la Petite Camargue, à l'Ouest des Saintes-Maries-de-la-Mer, contre laquelle luttent les pouvoirs publics. Inutilement?

Entre l'embouchure du Petit Rhône et les premiers marais salants d'Aigues-Mortes, la côte du Grand Radeau et des Quatre-Maries s'est repliée de 2,5 kilomètres depuis deux siècles, à cause surtout de la diminution du flux de sédiments apportés à la mer par le Petit Rhône. Depuis une quinzaine d'années, on s'efforce, à grands moyens, d'arrêter

# BRÈVES

## L'intérêt d'une protéine néfaste

Une maladie de la rétine, nommée dégénérescence maculaire, frappe les personnes âgées. Philippe Amouyel, de l'Institut Pasteur, et ses collègues ont montré qu'un gène prétendu mal-faisant protège contre l'une des deux formes de cette maladie : le gène codant la forme E<sub>4</sub> de l'apolipoprotéine E, forme incriminée dans certaines maladies cardio-vasculaires et dans la maladie d'Alzheimer. La protéine accusée de favoriser ces graves maladies protégerait contre la dégénérescence de la rétine.

## Ascendants d'avril

Selon une étude autrichienne, la taille moyenne, mesurée sur plus de 500 000 garçons âgés de 18 ans, dépendrait du mois de naissance. Les plus grands sont nés en avril, les plus petits en octobre. Un argument en faveur de l'astrologie? Une meilleure explication : la concentration en mélatonine, qui favorise la production d'hormone de croissance, augmente avec la durée d'ensoleillement. Toutefois, un décalage de trois mois sépare le mois de naissance des plus grands et la fin du mois de juin, où l'ensoleillement est maximal. La croissance, considérable au cours des trois mois qui suivent la naissance, d'avril au solstice de juin, expliquerait-elle ce décalage?

## Première italienne

Cristiano Del Sasso et Marco Signore, viennent de baptiser le premier dinosaure trouvé en Italie : *Scipionyx samniticus*. Il n'est rattaché à aucun genre connu. Ce jeune théropode, qui ne mesure que 24 centimètres de la pointe de sa mâchoire à l'extrémité de sa queue, a été enseveli il y a 113 millions d'années dans une lagune, et sa fossilisation est d'une qualité remarquable. On y observe des parties molles de l'organisme qui ont disparu dans les autres fossiles : des muscles, un grand morceau de l'intestin et, même, des traces des reins.



ce recul. Des épis en enrochement ont d'abord été construits. Perpendiculaires au tracé de la côte, ils devaient arrêter les sables qui se déplacent parallèlement à celle-ci. Ils ont été inefficaces, car le transit sédimentaire est très faible à cet endroit. Pire, ils ont aggravé la situation : contre ces épis, les courants d'arrachement, dirigés vers le large, sont canalisés et donc plus violents. Leur action érosive s'ajoute à celle des vagues. Le déchaussement de ces épis démontre leur inutilité et leur nocivité.

Pour renforcer cette défense mise à mal, on a ensuite construit une digue en haut de plage. La situation n'a toutefois pas été améliorée : la réflexion des vagues déferlant sur l'obstacle augmente leur pouvoir érosif, et la plage a tendance à disparaître en avant de la digue. Celle-ci, affouillée à sa base, s'affaisse par endroits. Dans ces secteurs, elle a été franchie lors de la tempête de la mi-décembre. On envisage maintenant d'implanter, en avant du rivage, sur une longueur de cinq kilomètres, une vingtaine de brise-lames...

A force d'acharnement et d'enrochements, finira-t-on par fixer la côte de la Petite Camargue? Et à quel prix? La vingtaine de brise-lames projetés coûteraient 60 millions de francs. En outre, ils parachèveraient la défiguration du paysage de plages, de dunes, d'étangs et de terres humides où les libres interactions entre l'eau douce et l'eau salée favorisent une grande diversité biologique.

Si l'on veut conserver le caractère sauvage de cette côte qui est incluse dans le Parc naturel régional de Camargue, il faudrait renoncer à la défendre contre l'érosion. Le prix à payer sera la perte d'espace terrestre au profit de la mer, comme cela s'est fait depuis deux siècles sans que l'on ait cherché à s'y opposer. Les terres cultivées s'arrêtent à environ 1,5 kilomètre du rivage, qui est resté désert, car il est difficile d'accès : si la côte recule d'autant, des indemnisations devraient être versées aux propriétaires lésés par la réduction de leur domaine. Mais ces compensations financières coûteraient bien moins à la collectivité que la défense obstinée de la position actuelle de la côte. Surtout, l'environnement ne serait pas dénaturé puisqu'on assisterait seulement à une translation progressive des différents milieux qui le composent. Quant aux enrochements et à la digue, abandonnés, ils disparaîtront progressivement sous les flots.

Roland PASKOFF  
Université Lumière, Lyon



Malgré tous les efforts entrepris depuis 15 ans, la mer grignote lentement la terre en Petite Camargue (flèche rouge sur la carte), près de l'embouchure du Petit Rhône. Lors d'une tempête, en décembre 1997, elle a ainsi franchi la digue de protection en plusieurs endroits.

Suite page 22

## Le temps plus longtemps

À partir du mois de mai 1998, la Société Météo France publiera des prévisions sept jours à l'avance, au lieu de cinq jusqu'à présent. Dans le futur, des prévisions météorologiques pourraient dépasser dix

jours, voire atteindre 15 jours, mais guère plus : les incertitudes sur l'état de l'atmosphère à un instant donné produisent une erreur

incompressible à cette échéance. En revanche, un nouveau calculateur au centre de prévision de Toulouse permettra, dès juillet 1998, des prévisions mieux localisées, par la prise en compte du relief avec des détails de sept kilomètres, au lieu de dix aujourd'hui.

## Big brother

Un éditeur de logiciels pourra savoir si vous êtes en possession d'un logiciel licite. Comment ? En «écoutant» votre écran d'ordinateur : un écran émet des signaux électromagnétiques que l'on peut analyser pour reproduire ce qui s'y trouve. C'est d'ailleurs une pratique d'espionnage. Des informaticiens britanniques ont mis au point un système qui incorpore un message clandestin à l'écran de votre ordinateur. Si ce message est constitué de quelques pixels répartis sur l'écran, vous ne le verrez pas. En revanche, un récepteur adapté, branché sur un téléviseur, capte les émissions électromagnétiques de votre écran et peut retrouver le message.

## Premiers marins

Les ancêtres de l'homme étaient-ils capables de construire des bateaux et de naviguer il y a 900 000 ans ? Si l'on en croit les âges déterminés pour les sédiments de deux sites où l'on a retrouvé des outils primitifs, ils seraient en tous cas arrivés, dès cette époque, sur l'île indonésienne de Flores, alors qu'elle a toujours été séparée des autres terres par un profond bras de mer. Hélas, on ne connaît aucun reste humain aussi ancien sur l'île.

## La masse du photon

Si le photon avait une masse, les équations de Maxwell qui régissent les variations spatiales du champ électromagnétique seraient altérées. Avec une balance sensible qui mesure les interactions magnétiques, des physiciens de l'Université du Wisconsin ont déterminé que la masse du photon était inférieure à  $2 \times 10^{-54}$  kilogramme.

Suite page 24

## Impact

### Sur le danger des impacts de météorites

*Une énorme masse embrasée, comme une montagne, fut projetée du ciel dans la mer, et le tiers de la mer devint du sang ; il périt un tiers des créatures vivant dans la mer.*

Apocalypse

Ce texte du Nouveau Testament décrit ce qui aurait pu se passer le 26 octobre 2028 si l'orbite de l'astéroïde 1997 XF-11 avait croisé celle de la Terre. Le 11 mars 1998, Brian Marsden, un astronome renommé du Centre pour l'astrophysique d'Harvard, annonçait qu'à cette date, un objet de 1,5 kilomètre de large frôlerait la Terre à moins de 50 000 kilomètres. En fait, les incertitudes étaient telles qu'il n'était alors pas certain que l'astéroïde manquerait notre planète.

Le lendemain, des astronomes utilisèrent des photographies de l'objet prises en 1990 et recalculèrent l'orbite de l'astéroïde ; leur calculs aboutirent à un passage à plus d'un million de kilomètres de notre planète, près de trois fois la distance de la Terre à la Lune. L'apocalypse est donc repoussée, mais le traitement par les médias de telles informations pourrait avoir l'effet inverse de celui escompté : à force de crier au loup, le public pourrait négliger, voire ignorer, une véritable alerte.

Un film américain relatant l'histoire d'une comète qui doit s'abattre sur la Terre sortira dans quelques mois. Cette sortie pourrait nous éclairer sur l'attitude du public

envers cette menace extraterrestre. Dans ce film, intitulé *Impact*, des astronomes repèrent une comète dont la trajectoire croiserait celle de la Terre un an plus tard. Pour éviter aux hommes de subir le même sort que les dinosaures, les dirigeants du monde doivent s'entendre sur un moyen de détourner la comète.

Dans un louable souci de rigueur scientifique, les producteurs et les scénaristes de cette superproduction hollywoodienne ont étudié de nombreuses revues de vulgarisation. Mieux encore, ils s'étaient entourés d'une dizaine de conseillers scientifiques, dont Carolyn et Eugene Shoemaker (les codécouvreurs de la comète Shoemaker-Levy).

Certaines scènes nécessitent pourtant de sacrifier à la rigueur scientifique : la représentation de la poussière cométaire, plus noire que le charbon, aboutirait à filmer de la neige noire sur une surface noire, dans le noir de l'espace... Pour éviter ce manque de contraste, la poussière cométaire du film est blanche. En revanche, les scénaristes ont modifié certains faits pour tenir compte de la réalité scientifique. Ainsi, le noyau cométaire était initialement décrit comme une boule de densité supérieure à celle de l'uranium, alors qu'il s'agit d'une boule de neige sale, de densité proche de celle de l'eau.

Du point de vue du réalisme scientifique, l'épisode le plus difficile à reproduire fut l'atterrissage des astronautes sur la comète pour y poser des explosifs. Une comète n'est pas assez massive pour créer une gravité notable. De surcroît, un rendez-vous spatial avec une comète est un exercice délicat : un tel objet se déplace à plusieurs dizaines de kilomètres par seconde et tourne parfois sur son axe. Pour dévier la comète de sa course initiale, il serait vraisemblablement plus aisé



Contrairement au scénario du film *Impact*, la meilleure méthode pour détourner une comète de sa course n'est sans doute pas d'y placer des explosifs.

de déclencher une explosion au-dessus de la surface de la comète, ou encore de heurter la comète avec un projectile lourd.

De surcroît, en se fondant sur les techniques actuelles, un an de préparation est insuffisant : entre 50 et 100 ans sont nécessaires pour la mise au point d'une telle mission. Pour les astéroïdes, cette alerte à moyen terme est envisageable, car leur vitesse est rarement supérieure à 20 kilomètres par seconde et ils suivent des orbites calculables. En revanche, les comètes se déplacent plus vite et perdent des gaz à l'approche du Soleil, ce qui modifie leur trajectoire et complique

leur suivi. Plusieurs organismes surveillent ces objets nommés croiseurs de la Terre. Pour l'instant, ils ont décelé 108 objets potentiellement dangereux, soit dix pour cent des croiseurs de la Terre connus. Aucun effort concerté n'existe pour mettre au point des techniques de déflexion, sans doute parce que, utilisant des bombes nucléaires, ces études constitueraient un argument pour le reprise de la course aux armements. Cependant, ces considérations politiques pourraient changer : en juillet 1999, l'Organisation des Nations unies coordonne une conférence dont l'ordre du

jour comprend la menace des croiseurs de la Terre.

Quelle est la probabilité que la Terre reçoive l'un de ces objets ? Les objets de moins de 100 mètres de diamètre, mais suffisamment rapides pour raser une ville, frappent la Terre une fois par siècle (un de ces objets a explosé en entrant dans l'atmosphère au-dessus de la vallée du Tunguska, en Sibérie, en 1908). Une centaine de cratères de diamètres supérieurs au kilomètre, la taille de l'astéroïde 1997 XF-11 dont l'impact aurait déclenché un hiver nucléaire de plusieurs années, ont été recensés.

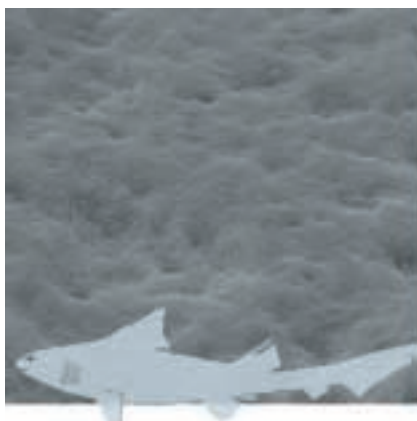
## Un email particulier

### L'évolution des requins revue grâce à l'émail de leurs dents.

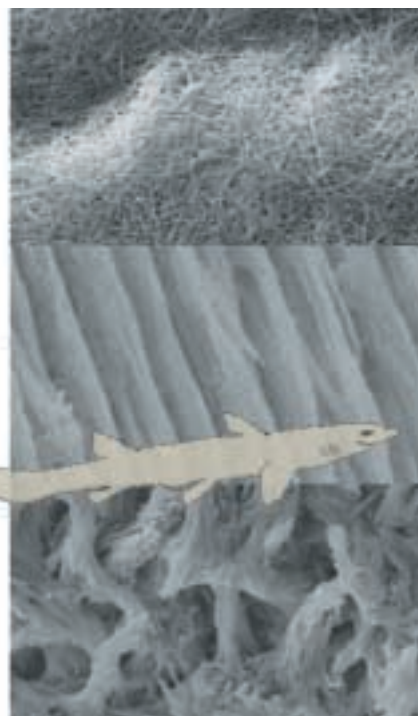
**E**n paléontologie, comme au cinéma, les requins s'effacent derrière leurs mâchoires : leur squelette cartilagineux se fossilise rarement, mais leurs dents, qui se renouvellent plusieurs fois par an au moins, sont présentes en grandes quantités dans les sédiments marins. L'examen de l'émail de ces dents avec une nouvelle méthode bouleverse le scénario évolutif de ces animaux : le groupe des requins actuels, les néosélaciens, s'est diversifié 20 millions d'années plus tôt qu'on ne le pensait.

L'histoire des requins, peut être séparée en trois étapes. Il y a 430 à 245 millions d'années, une dizaine d'ordres, qui n'ont que peu de traits communs avec les requins actuels, apparaissent, se diversifient, puis disparaissent pour la plupart sans laisser de descendance. Entre 245 et 205 millions d'années, au Trias, un nouveau groupe domine : les hybodontes. Ils sont ensuite progressivement remplacés par un autre groupe, les néosélaciens, qui disparaissent complètement à la même époque que les dinosaures, il y a 65 millions d'années.

En règle générale, les dents des hybodontes diffèrent de celles des néosélaciens par une ornementation plus prononcée de la couronne et par l'absence de canaux vasculaires spécialisés à la base de la dent. De plus, les dents des néosélaciens possèdent un émail composé de trois couches : une couche externe de fins cristaux d'apatite, orientés au hasard (l'apatite est le principal constituant minéral de l'os), une couche intermédiaire de faisceaux de fibres d'apatite parallèles à l'axe de la dent et une couche interne de faisceaux de fibres enchevêtrés. L'émail des dents d'hybodontes, plus fin que celui des néosélaciens, est au contraire



**L'émail des dents des requins hybodontes (à gauche), aujourd'hui disparus, est composé d'une seule couche minérale, tandis que celui des dents des néosélaciens (à droite) en contient trois (l'émail est montré ici avec un grossissement de 1 000 en microscopie électronique). Cette caractéristique a permis d'identifier trois nouveaux genres de requins néosélaciens de 230 à 205 millions d'années.**



formé d'une seule couche, dont la structure ressemble à celle de la couche externe de l'émail des néosélaciens.

Plutôt que d'examiner des coupes des dents, comme le font habituellement les paléontologues, nous avons étudié l'émail en le détruisant niveau par niveau et en relevant complètement la structure de la surface dentaire à chaque étape : les variations apparaissent beaucoup plus clairement. Cette nouvelle méthode a révélé que des dents du Trias supérieur (il y a 230 à 205 millions d'années), autrefois attribuées à des hybodontes, possèdent un émail à trois couches, caractéristique des néosélaciens : ceux-ci ont produit près de la moitié des dents de requins du Trias supérieur trouvées en Europe. Avec sept genres, dont trois ont été reconnus grâce à nos travaux, les néosélaciens étaient donc bien représentés dès cette période.

Les dents des «néosélaciens hybodontoides» sont légèrement différentes de celles de leurs successeurs actuels : dans des rides qui ornent leur surface comme celle des dents des hybodontes, la couche intermédiaire de l'émail est formée de faisceaux de fibres perpendiculaires, et non parallèles, à l'axe de la dent. Ces structures, qui renforcent les dents, sont-elles utiles à cause d'un remplacement dentaire plus lent qu'aujourd'hui ou ne sont-elles qu'une adaptation aux rides qui ornent les dents, vestiges des hybodontes ?

Enfin, certaines dents du Trias supérieur ont une morphologie proche de celles des néosélaciens, mais leur émail est monocouche. Une troisième lignée, plus rare, accompagnait donc probablement les néosélaciens et les hybodontes.

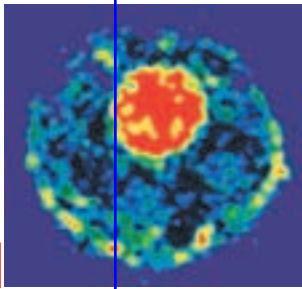
Gilles CUNY, Université de Bristol

### Fumigations à la naphthaline

Pour se défendre, certains termites, qui s'abritent dans des nids, utilisent de la naphthaline. Des biologistes américains ont trouvé des concentrations notables en naphthalène dans les matériaux de construction de ces nids : du bois mâché, de la salive et des excréments qui servent à consolider le sol. Le naphthalène est un répulsif pour diverses espèces animales ; les termites l'utiliseraient pour se défendre contre les fourmis, que la substance paralyse, ou contre d'autres micro-organismes pathogènes. Reste à comprendre comment ils incorporent le naphthalène dans leur nid et comment eux-mêmes y résistent.

### Les trithérapies

Les trithérapies associent plusieurs médicaments qui empêchent le VIH de se multiplier chez les personnes séropositives. Chez un tiers environ des personnes traitées, le virus n'est plus détectable dans le sang. Une équipe suisse vient de montrer que, même lorsque le virus est encore (ou à nouveau) détectable, la trithérapie maintient les lymphocytes CD4 à une concentration suffisante pour assurer la défense de l'organisme contre les infections opportunistes fatales. Le traitement semble rester efficace, même quand des particules virales circulent dans le sang.



### Parfums de femmes

Les animaux produisent des substances chimiques odorantes, les phéromones, qui agissent sur le comportement de leurs congénères. Une équipe américaine a montré que cette communication chimique existe aussi chez l'homme. Ces biologistes ont imprégné un coton de transpiration prélevée sous l'aisselle de femmes, soit dans la phase pré-ovulatoire, soit au moment de l'ovulation. Avec ces cotons, ils frottaient la lèvre supérieure d'autres femmes. Le cycle menstruel de celles-ci a été raccourci dans le premier cas, allongé dans le second. Ainsi, des composés que le cerveau conscient ne détecte pas modifient la longueur du cycle menstruel. Ces phéromones expliqueraient pourquoi les femmes qui cohabitent ont des cycles synchronisés.

## Des nurseries familiales

### Des tumulus de terre protègent les souriceaux apparentés des rigueurs de l'hiver.

La souris moissonneuse, qui vit dans les steppes d'Europe centrale et orientale, ressemble à la souris commune. Toutefois, elle a la particularité de construire chaque année, à l'automne, des tumulus, sortes de grosses fourmilières ; quelques adultes et une dizaine de jeunes immatures du même âge s'y regroupent pour passer l'hiver. L'équipe de Pierre Boursot, au Laboratoire génome et population du CNRS, à Montpellier, a étudié le degré d'apparentement des souriceaux de ces nurseries champêtres et a montré que ces souris ont l'esprit de famille.

En général, les animaux investissent pour se reproduire et pour sauvegarder leur descendance. Certaines espèces ont un comportement altruiste, c'est-à-dire bénéfique pour le destinataire et coûteux pour l'acteur ; d'autres un comportement coopératif, c'est-à-dire que chacun bénéficie de l'entraide. Ainsi, les insectes sociaux vivant en colonies se partagent le travail : par exemple, les fourmis et les abeilles, chez qui les ouvrières stériles se dévouent pour la collectivité. Chez les mammifères, l'organisation sociale du rat-taube (en Somalie et au Kenya) ressemble à celle des abeilles : une femelle reproductrice est entourée de mâles reproducteurs, d'ouvriers stériles et d'individus migrants, ce qui reflète des fonctions sociales bien établies.

Dans le cas de la souris moissonneuse, l'édification des abris communautaires est un investissement à intérêt

réciroque : des adultes s'associent pour construire un réseau de galeries souterraines surmontées d'un monticule de terre et de végétaux qui mesure environ un mètre de diamètre et 60 centimètres de hauteur.

Le biologiste anglais W. Hamilton a étudié ces comportements et a supposé que le «degré d'altruisme» ou d'entraide d'un individu vis-à-vis d'un autre dépend de leur degré de parenté. Ces comportements seraient d'autant plus fréquents que les individus auraient de gènes communs. Afin de tester cette hypothèse, l'équipe de Montpellier a comparé les liens de parenté des souriceaux cohabitants sous un tumulus et des souriceaux cachés dans des tumulus voisins ; les biologistes ont comparé les séquences microsatellites du génome (chaque microsatellite est constitué de l'assemblage de courtes séquences d'ADN identiques). Au sein d'une même espèce, les séquences microsatellites varient, mais leur nombre et leur composition se ressemblent d'autant plus que les individus sont des parents proches.

Les jeunes d'une quarantaine de tumulus ont été analysés. L'étude des différentes combinaisons de leurs séquences microsatellites a montré que les jeunes regroupés sous un même tumulus proviennent de deux ou trois portées différentes et que leurs parents sont plus apparentés entre eux qu'ils ne le sont avec les parents des souriceaux des autres tumulus. En outre, ce sont les mères qui sont apparentées ; les pères, étrangers au clan familial maternel, apportent des séquences microsatellites nouvelles.

Les femelles, moins mobiles que les mâles, se regrouperaient et se reproduiraient près de l'endroit où elles sont nées. Chaque tumulus serait édifié par des sœurs ou par des cousines pour servir de nurserie familiale.

Marie-Thérèse LANDOUSY



Ce tumulus abrite des jeunes souris moissonneuses d'une même famille.

## Racines carnivores

**Des feuilles souterraines attirent et engloutissent des micro-organismes.**

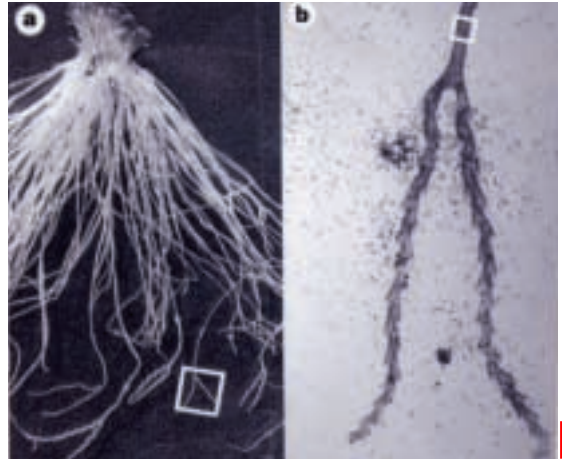
**L**es plantes insectivores utilisent des structures dont l'étrangeté étonne les botanistes : feuilles à charnière, pièges collants... Wilhelm Barthlot et ses collègues de l'Institut botanique de Bonn ont étudié l'espèce *Genlisea* et démontré que ses feuilles absorbent les protozoaires (des micro-organismes unicellulaires).

Cette démonstration met fin à une longue quête : Darwin, déjà, s'était demandé si ces plantes devaient être regroupées avec les espèces qu'il avait signalées dans son traité des plantes insectivores, mais il n'avait pas prouvé qu'elles ingurgitaient des animaux. Et, tandis que les botanistes et entomologistes portaient à 450 le nombre de plantes insectivores, le mystère de *Genlisea* demeurait, lancinant.

W. Barthlot et ses collègues ont appris à cultiver *Genlisea*, afin de l'étudier. Ces

plantes forment une rosette de trois centimètres de diamètre, au ras du sol, avec des feuilles fines ou spatulées ; leurs fleurs, jaunes ou violettes, sont portées au bout d'une tige qui atteint une vingtaine de centimètres de hauteur. Sous la rosette, un faisceau s'enfonce à plus de 15 centimètres, mais ces structures ne sont pas des racines : ce sont des feuilles souterraines, sans chlorophylle, dont la partie inférieure est ramifiée, formant un canal dont le diamètre atteint 200 micromètres ; les branches inférieures portent des ouvertures tapissées de rangées de poils et de glandes.

Que sont ces structures ? Darwin y avait vu des pièges à insectes, et ses successeurs y avaient trouvé des restes d'araignées, mais les botanistes de Bonn ont jugé que des insectes seraient trop gros pour être piégés. Des protozoaires, en revanche, pouvaient-ils être les proies de *Genlisea* ? Pour tester l'hypothèse, les botanistes ont mis en contact des *Genlisea* avec des micro-organismes ciliés,



La rosette de feuilles aériennes de *Genlisea* (en haut, sur l'image de gauche) surmonte des structures souterraines, ramifiées à leur base (à droite). Ces structures piègent des micro-organismes.

tels *Blepharisma americana*, dans des boîtes de Pétri : les protozoaires ont été attirés par les feuilles modifiées et, quelques minutes après, plusieurs d'entre eux y étaient piégés. Les ciliés ayant absorbé préalablement des composés contenant un isotope radioactif du soufre, les botanistes ont montré que le soufre des ciliés avait ultérieurement été intégré aux tissus des plantes.

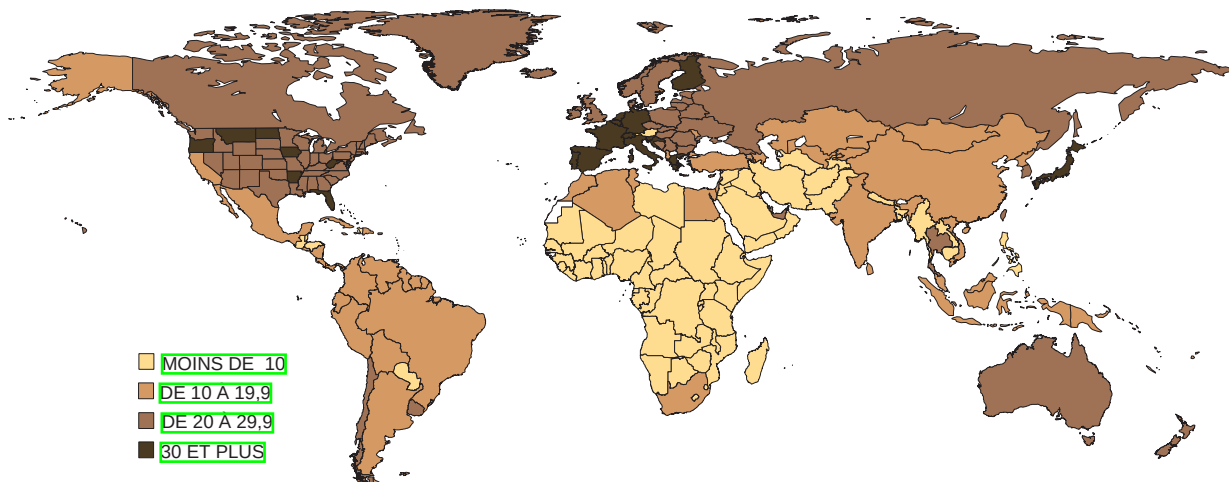
## L'avenir des personnes âgées

**P**our connaître l'avenir de la population mondiale, regardons l'Europe, où la fécondité est faible et où le nombre de personnes âgées augmente. En France, par exemple, 20 pour cent de la population a plus de 60 ans et, si la fécondité n'augmente pas, cette proportion dépassera 30 pour cent en 2025.

La France, comme les autres pays d'Europe de l'Ouest et le Japon, est à l'avant-garde de la transition démographique qui accompagne le développement des sociétés industrielles. Si les niveaux de vie moyens augmentent dans les pays en développement, la fécondité baissera et, dans

quelques générations, la proportion de population âgée sera élevée.

L'évolution de la population des États-Unis ne suit pas ce modèle, en partie à cause d'un afflux continu d'immigrants. D'ici 2025, la population des États-Unis augmentera de 24 pour cent et les immigrants constitueront une grande part de l'accroissement. À cette date, seulement 25 pour cent de la population américaine aura plus de 60 ans, contre 31 pour cent en Europe de l'Ouest. La proportion mondiale s'établirait alors, selon une prévision moyenne des Nations unies, autour de 15 pour cent et n'atteindrait 30 pour cent que vers 2100.



POURCENTAGE DE PERSONNES AGEES DE 60 ANS ET PLUS EN 2025

## Autant en emporte le vent

*Une analogie optique éclaire le savoir-faire des vieux loups de mer.*

**S**elon le principe de Fermat, un rayon lumineux suit le chemin le plus court d'un point à un autre. Si, dans un milieu homogène, ce chemin est une droite, dans un milieu d'indice variable, c'est une courbe que l'on sait calculer. Pour les bateaux à voile, la trajectoire optimale est également une courbe qui se calcule au moyen de l'analogie optique : John Kimball et Harold Story, de l'Université d'Albany, ont ainsi calculé la route la plus rapide pour un voilier.

Sur un plan d'eau sans courant et balayé par un vent régulier, on connaît la vitesse du bateau en fonction de la direction suivie. Un tel diagramme de vitesse est uniquement fondé sur les équations de l'hydrodynamique, mais, en pratique, sa détermination est expérimentale. Il réserve des surprises : en naviguant vent arrière, on va moins vite qu'en recevant le vent de trois quarts arrière.

Le but d'un régatier est d'arriver à destination le plus rapidement possible, exercice difficile lorsque la destination finale est contre le vent, et plus encore lorsque la direction et la force du vent varient. Pour aller contre le vent, le marin tire des bords, c'est-à-dire qu'il zigzague autour de la direction du vent.



Lors d'une régate, tel *Le trophée multicoques Normandie*, les marins doivent s'adapter rapidement aux conditions de vent. Une analogie optique permet d'optimiser la route.

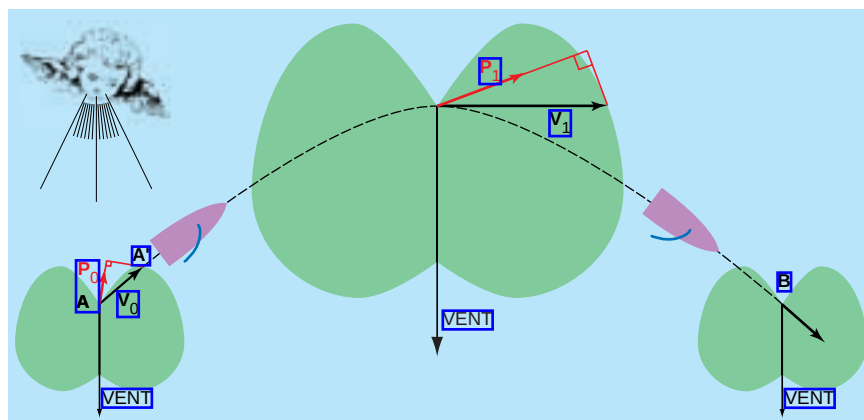
Les physiciens ont remarqué que la traversée d'un milieu d'indice variable par un rayon lumineux est analogue au déplacement optimal du bateau. Analysant le problème du déplacement du bateau en termes optiques, ils ont montré que le calcul du chemin le plus rapide imposait la résolution d'une équation vectorielle, une relation mathématique entre deux vecteurs. L'un de ces vecteurs est la vitesse du bateau, et l'autre, un vecteur dont la taille varie inversement à la vitesse : si la vitesse est doublée, la taille de ce vecteur est divisée par deux. Pour cette raison, on nomme ce dernier la «lenteur». En général, sa direction n'est pas celle de la vitesse. Son évolution est donnée par une équation différentielle.

La difficulté du calcul réside dans le choix du vecteur lenteur initial. Utili-

sons un exemple : lorsqu'on lance un caillou avec une vitesse initiale donnée, il est relativement aisé de déterminer son point de chute. En revanche, si l'on veut lancer le caillou à une distance précise, plusieurs essais seront nécessaires avant de trouver la vitesse initiale adéquate. Dans le calcul nautique, à partir d'une direction initiale pour le vecteur lenteur, l'évolution de la position du bateau est unique. Cependant, pour être certain d'arriver à la position voulue, des ajustements du vecteur lenteur initial sont nécessaires.

Le vecteur lenteur initial déterminé, comment connaître la vitesse ? L'équation vectorielle qui relie la vitesse à la lenteur est interprétable géométriquement : il suffit de tracer une droite perpendiculaire à la direction du vecteur lenteur, tangente au diagramme de vitesse. La vitesse initiale optimale est alors dirigée vers ce point de contact. À chaque instant, on calcule le nouveau vecteur lenteur et on répète cette construction du vecteur vitesse. Ainsi, quelles que soient les conditions de vent, et même lorsqu'il faut remonter au vent, on construit un chemin optimal.

Si à bord des bateaux on plaçait des ordinateurs qui calculent en permanence ce meilleur chemin, on ne testerait plus la capacité des marins, mais les qualités intrinsèques du bateau dans des conditions météorologiques données. Cependant, ces calculs ne seront jamais plus précis que les prévisions météorologiques utilisées. Les vieux loups de mer savent depuis longtemps que pour aller le plus rapidement possible d'un point à un autre, la route directe n'est pas nécessairement la meilleure. Les physiciens savent la calculer plus exactement.



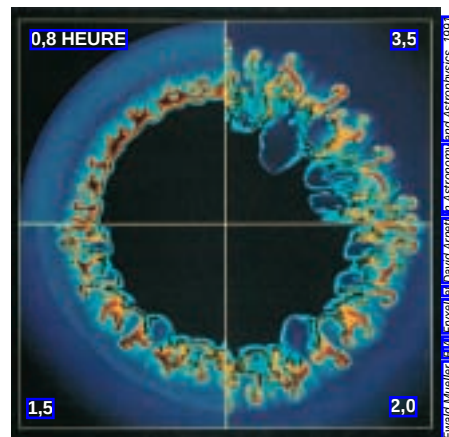
Un bateau doit se rendre de A à B le plus rapidement possible. Dans cette configuration météorologique, le vent est dirigé vers le bas, mais son intensité augmente de bas en haut. Comment construire le chemin optimal ? On trace d'abord le diagramme de vitesse (surface verte), l'ensemble des vitesses que peut prendre le bateau situé en A. On choisit ensuite le vecteur «lenteur» initial  $p_0$ . Pour construire la vitesse initiale  $v_0$ , on trace la perpendiculaire à la direction du vecteur  $p_0$ , tangente au diagramme de vitesse. L'extrémité du vecteur vitesse initial est situé au point de contact. On calcule alors le nouveau vecteur lenteur et on répète la construction à chaque instant.

## Jouer avec les étoiles

**Un système à dix lasers pour analyser les supernovae.**

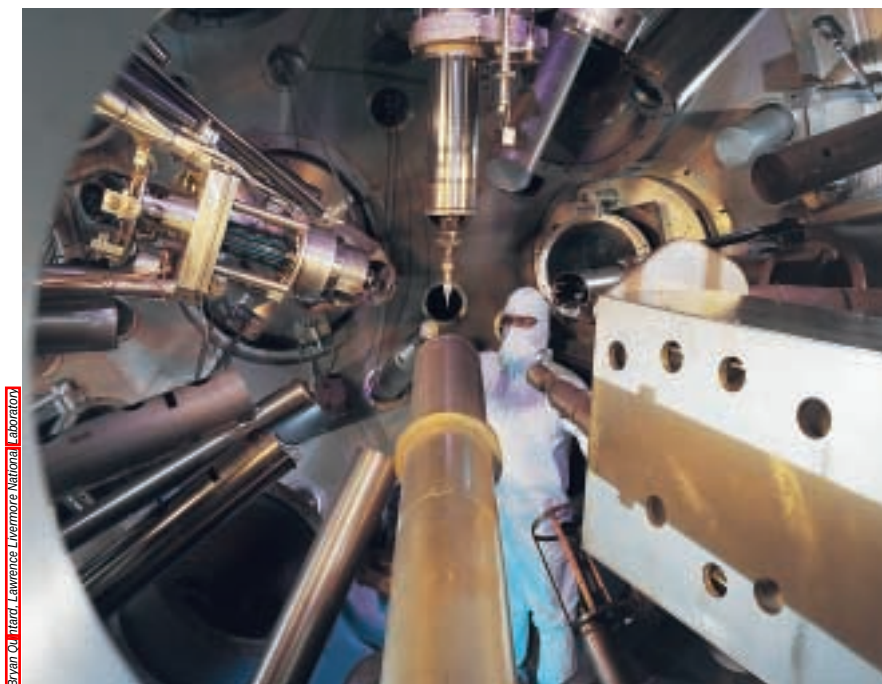
Il y a 11 ans, le 23 février, des astronomes de l'hémisphère Sud observaient un point brillant dans une galaxie voisine de la nôtre : c'était une supernova, l'explosion d'une étoile géante bleue, qui, faute de combustible nucléaire, s'était effondrée sur elle-même, tel un soufflé que l'on cesse de chauffer. Rebondissant sur le cœur, la matière des couches externes provoqua une titanique onde de choc et libéra, sous la forme de lumière, une quantité d'énergie égale à la totalité de l'énergie rayonnée par toutes les étoiles et galaxies visibles de l'Univers... mais en seulement dix secondes. Cette lumière se propagea pendant 160 000 ans, atteignant la Terre le 23 février 1987 ; d'où le nom SN 1987 A donné à la supernova.

Comment reproduire un tel phénomène en laboratoire ? Des physiciens du Laboratoire Lawrence Livermore utilisent aujourd'hui le laser Nova afin de recréer des conditions comparables à celles qui ont propulsé la couche externe de l'étoile dans l'espace. Évidemment, la reproduction se fait à petite échelle : les faisceaux laser – portant une énergie totale de 30 000 milliards de watts – sont focalisés sur un cylindre en or de trois millimètres de long, en partie recouvert d'une double couche de cuivre et de plastique.



**Simulation numérique de l'explosion d'une supernova.**

Les dix lasers émettent simultanément, vaporisant le cylindre d'or et formant une pluie de rayons X, qui engendrent un plasma. Les images réalisées par les caméras qui équipent le dispositif montrent des phénomènes analogues à ceux qui avaient été prévus par les simulations de supernova... au moins à deux dimensions. À trois dimensions, les simulations n'ont pas reproduit correctement la supernova SN 1987A : la vitesse de la matière éjectée par la supernova était deux fois supérieure à la vitesse calculée. Les physiciens américains espèrent que les paramètres mesurés lors des expériences menées à l'aide du laser Nova, extrapolées aux dimensions cosmiques, expliqueront les insuffisances des simulations.



**Le laser Nova délivre une énergie lumineuse de 30 000 milliards de watts sur une minuscule cible (à l'extrémité de la pointe verticale). Cette cible est un modèle réduit de supernova.**

## Le ressort et l'amortisseur

**Des matériaux poreux et des liquides non mouillants stockent ou dissipent l'énergie.**

Un nouveau groupe d'études industrielles qui réunit des laboratoires privés ou publics, civils ou militaires, prépare l'exploitation d'une idée physique apportée en France par le physicien russe Valentin Erochenko, aujourd'hui professeur à l'École nationale supérieure des techniques avancées (ENSTA) : le stockage ou la dissipation d'énergie par des matériaux poreux où circulent des liquides non mouillants.

L'idée est si simple qu'on s'étonne de la voir apparaître si tardivement : quand un liquide ne mouille pas une surface, on ne peut le mettre en contact avec cette dernière que si on lui apporte de l'énergie ; et puisque le liquide ne mouille pas la surface, il restitue l'énergie stockée en se séparant de la surface, quand il en a la possibilité. N'est-ce pas le principe du ressort ? Toutefois, comme l'énergie ainsi stockée par unité de surface est très faible, le seul moyen de l'augmenter notablement consiste à augmenter l'aire de la surface et, par exemple, à forcer la pénétration du liquide dans un matériau poreux, dont la surface totale développée atteint classiquement celle d'un terrain de football pour quelques centimètres cubes de solide.

Pourquoi un tel système serait-il supérieur à un ressort ? Tout d'abord parce que l'énergie stockée peut être considérable : elle atteint 200 joules par centimètre cube

de couple solide-liquide, et les forces restituées atteignent un millier de kilogrammes force. D'autre part, un tel système s'utilise peu (il supporte des centaines de milliers de cycles), puisqu'aucune pièce mécanique ne frotte contre une autre. Ensuite il tient parfaitement la « charge » : sans fuite, les molécules qui sont piégées dans le matériau y restent, jusqu'à ce qu'elles aient la possibilité d'en sortir, lors de l'ouverture d'une commande. C'est ainsi que V. Erochenko conserve un de ses systèmes depuis 12 ans, mesurant périodiquement la pression libérable : elle n'a pas changé de façon mesurable.

Si le principe du système a été bien étudié à Kiev, le groupe d'étude qui vient de se constituer en France cherche aujourd'hui les matériaux poreux et les liquides adaptés à chaque utilisation. La gamme des matériaux poreux est vaste : le silica gel, le charbon poreux, le verre poreux, l'alumine ou divers autres oxydes préparés par le procédé sol-gel peuvent accueillir de l'eau, du mercure ou des sels fondus... Toutes les associations sont possibles, à condition que le principe de base soit respecté : le liquide ne doit pas mouiller le solide poreux.

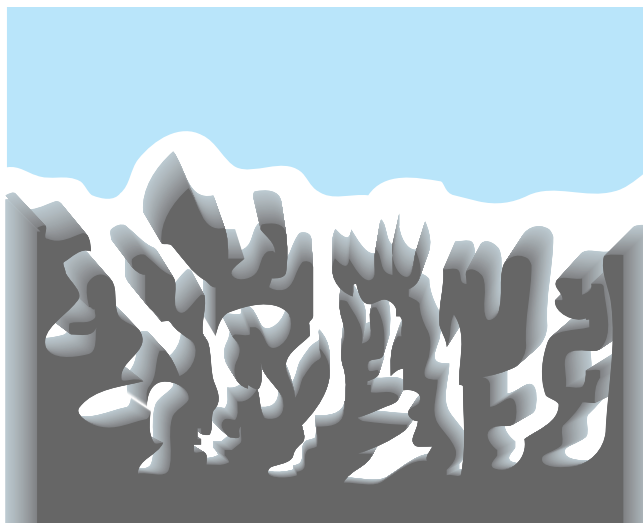
De surcroît, des variations inattendues du système sont possibles : si les pores du solide sont suffisamment gros et connectés de façon appropriée, la quantité de liquide qui vient au contact direct de la surface est proportionnellement faible, et le liquide circule beaucoup dans le matériau, dissipant l'énergie ; le système est alors un amortisseur.

L'Aérospatiale, Bouygues, Dassault aviation, Elf Atochem, Giat industries, Jarret, la Snecma, DLDI et dix laboratoires de recherche publique s'intéressent au

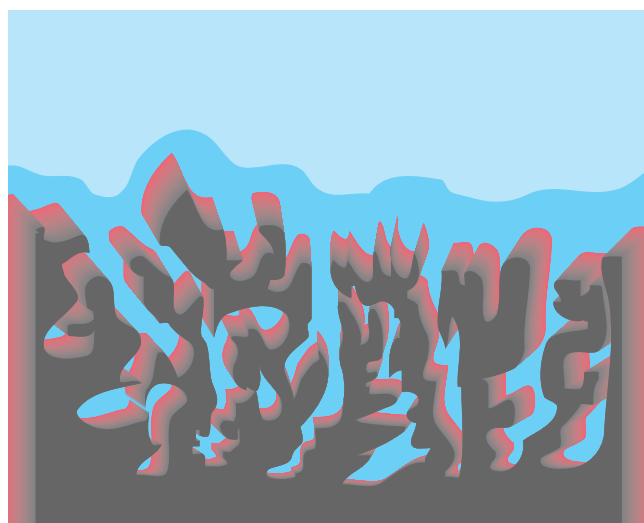


**Clé thermique à trois temps : (1) compression après chauffage ; (2) solidification du liquide par refroidissement ; (3) restitution de l'énergie mécanique lors du réchauffage.**

procédé, avec des besoins variés. On entrevoit des dispositifs pour ouvrir les panneaux solaires des engins spatiaux, des bistouris chirurgicaux, des systèmes antisismiques, des systèmes de transformation de la chaleur en énergie mécanique. Par exemple, on a créé une « clé thermique », où l'on utilise les variations de l'énergie interfaciale pour stocker l'énergie : à chaud, on profite de cette réduction de l'énergie interfaciale pour faire entrer le liquide dans le solide poreux ; puis on solidifie le liquide en le refroidissant ; et on réchauffe le système quand on veut récupérer l'énergie. Enfin, des amortisseurs qui ressembleraient à ceux qui ont été employés pour les avions-cargo russes de type Antonov sont à l'étude.



**On doit fournir de l'énergie pour faire pénétrer dans un solide poreux un liquide (en bleu) qui ne mouille pas le solide (en noir). Quand on**



**relâche la contrainte appliquée, l'énergie de surface (en rouge) est entièrement restituée.**

# Comment prévenir la prochaine crise pétrolière?



**C**es dernières années, la consommation mondiale de pétrole était supérieure à celle d'avant les crises pétrolières. Jamais les nations n'ont autant consommé qu'en 1997. La production, qui a atteint neuf millions de tonnes par jour, a limité l'augmentation des cours et ralenti l'inflation.

Pourquoi une telle consommation, qui oublie trop facilement les deux crises récentes? Selon les auteurs du premier article de ce dossier, la production pétrolière augmentera encore jusque vers l'an 2000, avant de décliner régulièrement. Dans cette hypothèse, fondée sur des statistiques affinées, l'humanité devrait réagir rapidement pour éviter les hausses de prix, les récessions et les guerres.

Des voies se font jour, pour éviter le pire : les autres articles du dossier montrent que l'exploitation pétrolière classique n'est pas l'unique possibilité. On sait aujourd'hui reprendre l'exploitation de gisements déjà bien exploités et forer des puits à des profondeurs croissantes sous les fonds océaniques. La chimie apprend également à transformer le gaz naturel et les sables asphaltiques, abondants, en carburants liquides aussi bon marché que ceux qui sont obtenus par le raffinage du pétrole brut. Les pays industrialisés pourraient progressivement limiter leur consommation de pétrole brut «classique» : ce n'est qu'une affaire de volonté, de temps et d'argent.



# La fin du pétrole bon marché

COLIN CAMPBELL • JEAN LAHERRERE

*La production mondiale de pétrole bon marché déclinera dans une dizaine d'années.*

**E**n 1973 et en 1979, deux brusques hausses des prix du pétrole ont rappelé aux pays industrialisés combien leur économie était fondée sur la consommation de pétrole. Un embargo des pays arabes provoqua un triplement des cours, et la déposition du shah d'Iran fit encore doubler le prix du pétrole. Les grandes économies mondiales reculèrent. Des analystes déclarèrent que ces crises annonçaient une pénurie prochaine de pétrole. Pourtant, ils avaient tort.

Les compagnies pétrolières savaient que ces prévisions pessimistes étaient fausses : peu auparavant, des équipes

de prospection avaient découvert d'énormes bassins pétroliers au Nord de l'Alaska et sous la mer du Nord. En 1973, on n'avait apparemment consommé qu'un huitième environ des réserves de pétrole brut facilement accessible. Les cinq membres de l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP), au Moyen-Orient, augmentèrent leurs prix non pas parce que le pétrole était plus rare, mais parce qu'ils avaient capté 36 pour cent du marché. Lorsque la demande diminua et que les acheteurs s'approvisionnèrent en mer du Nord et en Alaska, l'OPEP fut affaibli et les cours diminuèrent.

En revanche, la prochaine crise pétrolière sera plus durable. Même si l'on tient compte des récentes découvertes de pétrole, l'offre «classique», celle du pétrole bon marché, ne satisfera plus la demande dans moins d'une dizaine d'années. Cette conclusion s'oppose aux prévisions de l'industrie pétrolière qui, début 1998, annonçait

fièrement des réserves prouvées s'élevant à 140 milliards de tonnes. En divisant ce chiffre par les 3,2 milliards de tonnes annuels correspondant à la production actuelle, on prévoirait une production sereine durant 43 ans, voire plus, car les statistiques officielles montrent un accroissement des réserves.

Toutefois ce raisonnement contient trois erreurs graves. Premièrement, il repose sur une mauvaise estimation des réserves. Deuxièmement, il suppose que la production pétrolière restera constante. Enfin il postule que l'on extraira les dernières gouttes de pétrole tout aussi facilement qu'aujourd'hui. Or la production d'un puits – ou d'un gisement – n'est pas régulière : après le moment de production maximale, elle diminue quand les réserves ont diminué environ de moitié.

D'un point de vue économique, peu importe de savoir quand la planète manquera totalement de pétrole : ce qui compte, c'est la date à partir de

**1. LA PRODUCTION PETROLIERE a augmenté régulièrement, aux États-Unis, jusque dans les années 1970 (courbe rouge). Les restrictions des importations du Moyen-Orient, en 1973 et en 1979 (courbe grise), conduisirent à une hausse des prix et à des pénuries. La guerre du Golfe a rappelé au monde industriel sa dépendance énergétique (courbe grise).**



1859 PREMIER PUITS AMÉRICAIN À TITUSVILLE (PENNSYLVANIE)



1920 LA RUEE VERS L'OR

laquelle la production déclinera. Les prix augmenteront alors, sauf si la demande décroît. Plusieurs méthodes d'estimation des réserves classiques actuelles et de la quantité de pétrole restant à découvrir nous font conclure que ce déclin commencera avant 2010.

## Comment obtenir les chiffres véritables?

Nous avons passé la majeure partie de nos carrières à rechercher du pétrole, à analyser les réserves et à estimer les quantités à découvrir, d'abord au service de grandes compagnies pétrolières, puis comme consultants indépendants. Progressivement nous avons compris que les évaluations sont bien plus difficiles qu'elles ne le paraissent au premier abord.

Trois valeurs doivent intervenir dans les prévisions de la production de pétrole. La première valeur est la quantité de pétrole déjà extraite à ce jour, encore nommée «production cumulée». La deuxième est une estimation des réserves ou, plus exactement, de la quantité de pétrole que les compagnies extrairont des gisements connus avant de les abandonner. La troisième valeur est une estimation argumentée de la quantité de pétrole brut restant à découvrir et à exploiter. En ajoutant ces trois nombres, on obtient la production ultime, c'est-à-dire le nombre total de tonnes qui auront été extraites lorsque la production cessera.

Comment déterminer ces trois valeurs? Les publications des compagnies pétrolières sont utiles pour la détermination de la production cumulée, car les compagnies comptabilisent les quantités de pétrole qui sortent de leurs puits. Toutefois ces statistiques sont imprécises : par exemple, aucune compagnie n'a comptabilisé les quelque 300 millions de tonnes qui ont été brûlées en pure perte par l'Irak, au Koweït, en 1991. En estimant les erreurs de ce type, les experts admettent que, à la fin de 1997, l'industrie avait extrait un peu plus de 110 milliards de tonnes de pétrole.

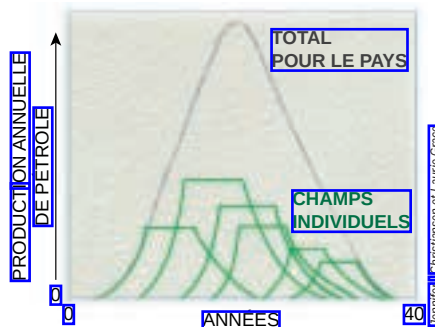
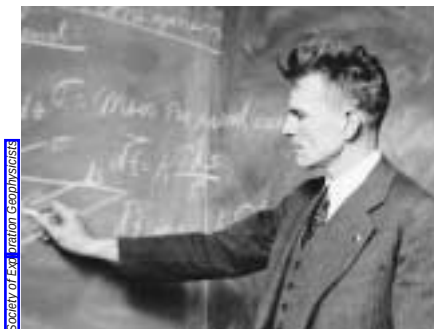
L'estimation des réserves est beaucoup plus difficile. La plupart des statistiques disponibles proviennent de recensements effectués par deux revues spécialisées, *Oil and Gas Journal* et *World Oil*, qui, chaque année, enquêtent auprès des compagnies pétrolières et des États, puis publient les chiffres de production et de réserves qui leur sont communiqués, sans toutefois les vérifier. Ces valeurs, souvent acceptées sans analyse, contiennent des erreurs systématiques. Nombre d'entre elles sont irréalistes, parce que, l'estimation des réserves n'étant pas une science exacte, les ingénieurs pétroliers pondèrent leurs estimations par des probabilités. Par exemple, les géologues estiment à 90 pour cent la probabilité que le gisement d'Oseberg, en Norvège, contienne 95 mil-

lions de tonnes de pétrole récupérable, et ils estiment à 10 pour cent la probabilité que l'on puisse en extraire 340 millions de tonnes : la première valeur est une estimation P90 (pour «probabilité de 90 pour cent»), et la seconde une réserve P10.

En pratique, les compagnies et les gouvernements hésitent à avancer de telles probabilités, et ils préfèrent afficher des estimations qui leur conviennent, tant que leur probabilité est comprise entre 10 et 90 pour cent : les estimations optimistes, par exemple, peuvent faire monter le prix des actions d'une compagnie pétrolière.

Les membres de l'OPEP gonflent encore plus volontiers leurs estimations, car plus leurs réserves sont élevées, plus ils peuvent exporter de pétrole. Les compagnies nationales qui détiennent l'exclusivité des droits pétroliers, dans les principaux pays de l'OPEP, n'ont pas à publier (et ne publient pas) des statistiques détaillées sur chaque gisement : celles-ci pourraient être utilisées pour des vérifications des réserves totales du pays concerné. On soupçonne ainsi que, lorsque, vers la fin des années 1980, six des onze pays de l'OPEP annoncèrent une augmentation considérable de leurs réserves (comprise entre 42 et 197 pour cent), leur unique motivation fut d'accroître leurs quotas à l'exportation.





**2. DANS CHAQUE GRANDE REGION PETROLIERE du monde, la production commence à chuter lorsque les réserves sont à moitié épuisées. Quand on additionne les productions de gisements de tailles et d'âges divers (courbes vertes à droite), on obtient habituellement une courbe en forme de cloche. À partir de cette observation, King Hubbert (à gauche), géologue du Groupe Shell, a prédit en 1956 que la production pétrolière des 48 premiers États américains culminerait vers 1969, ce qui fut effectivement le cas.**

Les estimations antérieures, établies par les compagnies privées avant leur nationalisation par les pays de l'OPEP, étaient probablement prudentes, affectées d'une probabilité de 90 pour cent. Leur révision à la hausse était inévitable, mais aucune nouvelle découverte de gros gisements, ni aucune percée technique ne justifiaient l'accroissement colossal annoncé : 40 milliards de tonnes, soit plus que tout le pétrole jamais découvert aux États-Unis. Naturellement, les pays qui ne sont pas membres de l'OPEP ne se privent pas, eux non plus, d'annoncer de fausses estimations : en 1997, 59 pays ont annoncé des réserves inchangées par rapport à 1996. Comme les réserves diminuent avec l'assèchement des vieux gisements et augmentent avec la découverte de nouveaux gisements, la constance des réserves, pendant plusieurs années, est très improbable.

De surcroît, la définition des réserves varie. Aux États-Unis, la Commission des opérations de bourse auto-

rise les sociétés à mentionner des réserves «prouvées» à condition que le pétrole se trouve près d'un puits en activité et qu'il y ait une «certitude raisonnable» que son extraction soit rentable avec le prix actuel du pétrole brut et avec les techniques actuelles. Ainsi, aux États-Unis, une réserve prouvée équivalait environ à une estimation P90.

### Les réserves non prouvées

Les organismes de contrôle de la plupart des autres pays n'imposent pas de telles définitions. Durant de nombreuses années, les anciens pays communistes ont couramment publié des valeurs exagérément optimistes, de type P10. Pourquoi les experts ont-ils souvent mêlé ces valeurs à celles des réserves prouvées? La revue *World Oil* a calculé qu'en 1996 les réserves prouvées de l'ex-Union soviétique s'élevaient à 25 milliards de tonnes, alors que la revue *Oil and Gas Journal* mentionnait seulement 8 milliards de tonnes. La différence montre les difficultés d'évaluation.

On ne résoudrait pas le problème en n'utilisant que les estimations P90, car l'addition de valeurs probables à 90 pour cent, pour chaque gisement, conduirait à une sous-estimation globale des réserves du pays. La seule

méthode convenable pour estimer correctement les réserves consiste à additionner les estimations moyennes pour chaque gisement. En pratique, on considère que la fiabilité est suffisante quand on utilise l'estimation médiane, autrement dit la valeur correspondant aux réserves P50, encore qualifiées de «prouvées et probables». Cette valeur P50 représente le nombre de tonnes qui ont autant de chances de sortir que de ne pas sortir d'un puits durant son existence, en supposant que les prix restent contenus dans une étroite fourchette. Les erreurs sur les diverses estimations P50 se compensent.

L'examen des statistiques recueillies à Genève par la Société *Petroconsultants* nous a permis de contourner nombre de difficultés d'estimation. Ces statistiques, constituées durant plus de 40 ans à partir de sources variées, concernent quelque 18 000 gisements pétroliers du monde. Nous avons cherché à corriger les valeurs douteuses.

Selon nos calculs, les réserves mondiales de pétrole brut classique s'élevaient, à la fin de 1996, avec une probabilité de 50 pour cent, à environ 120 milliards de tonnes, soit nettement moins que les 140 milliards de tonnes annoncés par la revue *Oil and Gas Journal* et que les 160 milliards de tonnes estimés par le journal *World Oil*. La différence est peut-être même supérieure, car notre estimation représente la quantité de pétrole qui sera très probablement extraite des gisements connus, tandis que celle du journal *World Oil* est supposée être une estimation prudente des réserves prouvées.

La date à laquelle la production pétrolière culminera dépend bien moins du volume des réserves mondiales P50 que de la quantité de pétrole ultime classique. Afin d'évaluer cette quantité, nous devons savoir si les réserves croissent ou décroissent, et à quel rythme. C'est ici que les statistiques officielles deviennent dangereusement trompeuses.

**3. LES RESERVES MONDIALES DE PETROLE BRUT bon marché sont à moitié épuisées. Ces réserves (définies ici par la quantité de pétrole ayant 50 pour cent de chances d'être extraite des gisements connus) et les découvertes de nouveaux gisements fourniront à peine plus que la quantité de pétrole déjà consommée.**

**A DECOUVRIR :  
20 MILLIARDS DE TONNES**

**RESERVES EN 1998 :  
120 MILLIARDS DE TONNES**

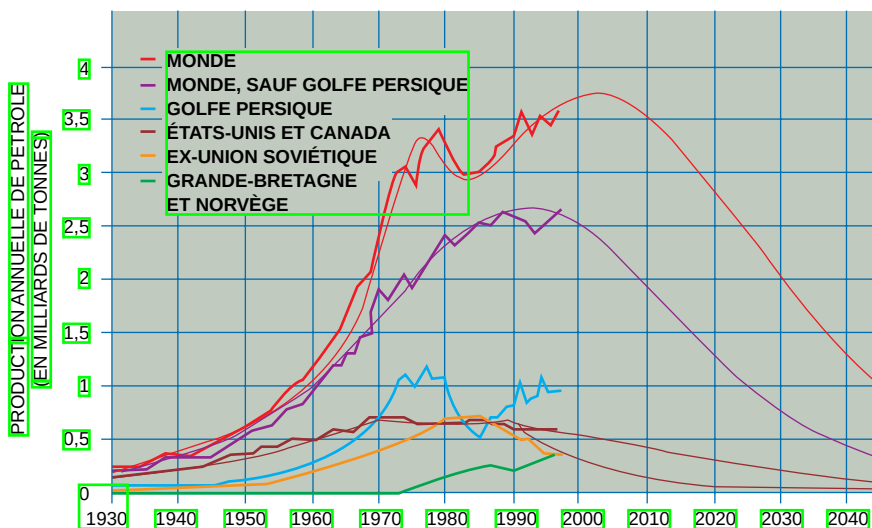


## Des rendements en baisse

Celui qui examine les statistiques officielles observe avec étonnement que les réserves mondiales de pétrole n'ont cessé de croître au cours des 20 dernières années. Peut-on extrapoler cette tendance et conclure, comme l'ont fait les services américains d'information sur l'énergie, que la production de pétrole continuera de croître durant les prochaines décennies, atteignant vers l'an 2020 une valeur supérieure des deux tiers à celle d'aujourd'hui? Une telle croissance est illusoire : 80 pour cent du pétrole produit aujourd'hui provient de gisements découverts avant 1973 ; la grande majorité de ces gisements sont en déclin.

Dans les années 1990, les compagnies pétrolières ont découvert en moyenne un milliard de tonnes par an ; en 1997, elles ont extrait plus de trois fois cette valeur. Pourtant, les chiffres officiels indiquaient que les réserves prouvées n'avaient pas chuté de 2,2 milliards de tonnes, comme on s'y serait attendu, mais avaient au contraire augmenté de 1,5 milliard de tonnes : plusieurs dizaines de pays ont choisi de ne pas mentionner le déclin de leurs réserves, peut-être pour renforcer leur prestige politique et leur capacité à obtenir des prêts. En outre, certaines compagnies pétrolières ont rehaussé les estimations de nombreux gisements. Ces rectifications n'ont pas nécessairement une volonté de tromper, mais elles faussent sérieusement les prévisions déduites des rapports publiés.

Pour mieux évaluer les gisements à découvrir, on doit rapporter chaque révision à l'année où fut découvert le gisement, et non à l'année où une compagnie ou un pays a révisé ses estimations antérieures. En procédant ainsi, on voit que les découvertes mondiales ont été maximales au début des années 1960, puis n'ont cessé de diminuer. En prolongeant cette tendance jusqu'à la valeur zéro, on estime les réserves qui restent à découvrir.



4. LA PRODUCTION MONDIALE DE PÉTROLE (courbe rouge) a repris, après une chute en 1973 et en 1979. Un modèle fondé sur des courbes de Hubbert (courbes fines) indique que la production déclinera plus durablement dans dix ans. La production des États-Unis et du Canada réunis (courbe marron) a atteint son maximum en 1972 ; la production de l'ex-Union soviétique (courbe orange) a diminué de 45 pour cent depuis 1987. La production des pays producteurs qui ne sont pas situés dans le golfe Persique (courbe mauve) semble aujourd'hui proche de son maximum.

D'autres méthodes d'estimation (voir l'encadré de la page 34) nous ont permis de calculer que l'industrie pétrolière pourra extraire encore 140 milliards de tonnes environ. Bien qu'impressionnant, ce nombre n'est que légèrement supérieur aux 110 milliards de tonnes déjà extraits.

## Prédire l'inévitable

Même si l'on consacre davantage d'argent à la prospection pétrolière, cette situation ne changera pas. Après la flambée des cours du brut, au début des années 1980, les prospecteurs ont mis au point de nouvelles techniques de détection et d'extraction du pétrole, puis ils ont parcouru le monde à la recherche de nouveaux gisements. Ils en ont peu trouvé : la fréquence des découvertes a inexorablement décliné. Notre planète renferme une quantité finie de pétrole, et les compagnies pétrolières en ont découvert environ 90 pour cent.

Après avoir estimé la quantité de pétrole restant à extraire, nous avons

prédit quand la production pétrolière commencera à diminuer. Nous avons appliqué une version améliorée d'une méthode publiée pour la première fois par King Hubbert, en 1956. Hubbert, qui travaillait pour la Société Shell, avait observé que, dans toute région suffisamment vaste du monde, l'extraction incontrôlée d'une ressource limitée suit une courbe en cloche qui est maximale lorsque la moitié environ de cette ressource est épuisée. Pour démontrer sa théorie, Hubbert plaqua une courbe en cloche sur les statistiques de la production pétrolière, puis affirma que la production des 48 premiers États américains croîtrait durant encore 13 années pour culminer en 1969, à une année près. Il eut raison : la production fut maximale en 1970 et, depuis, elle n'a cessé de suivre sa courbe en cloche, à quelques faibles écarts près. Les productions de plusieurs autres nations, tels l'ex-Union soviétique et l'ensemble de tous les pays pétroliers qui ne sont pas au Moyen-Orient, ont également suivi des courbes de Hubbert.

PRODUCTION CUMULÉE :  
110 MILLIARDS DE TONNES



L'évolution mondiale est plus difficile à cerner, car les pays membres de l'OPEP ont délibérément ralenti leurs exportations dans les années 1970, tandis que d'autres pays continuaient de produire normalement. Notre analyse révèle cependant que certains des plus gros producteurs, dont la Norvège et le Royaume-Uni, atteindront leur production maximale au tournant du millénaire, sauf s'ils réduisent considérablement leur production. Vers l'an 2002, le monde dépendra des pays du Moyen-Orient, notamment de cinq pays du golfe Persique (l'Iran, l'Irak, le Koweït, l'Arabie saoudite et les Émirats arabes unis), pour combler l'écart entre une offre en diminution et une demande en augmentation.

Puis, quand 125 milliards de tonnes auront été consommés, la production chutera probablement. À moins d'une récession planétaire, la production mondiale de pétrole brut sera maximale dans la première décennie du XXI<sup>e</sup> siècle.

Cette prédiction reste vraie si les estimations sont augmentées ou diminuées de quelques milliards de tonnes : Craig Bond Hatfield, de l'Université de l'Ohio, a fondé sa propre analyse sur une estimation des réserves égale à 210 milliards de tonnes (55 pour cent de plus que nos estimations), effectuée par le Service américain de recherches géologiques, et il a pareillement conclu que la production pétrolière mondiale sera

maximale dans les 15 prochaines années. Même John Edwards, de l'Université du Colorado, qui a publié en août 1997 l'une des plus optimistes estimations récentes des réserves de pétrole (280 milliards de tonnes), tout en reconnaissant que les compagnies pétrolières n'ont que 5 pour cent de chances de récupérer tout ce pétrole, a prédit que la production de brut culminera en 2020.

### Peut-on retarder le déclin ?

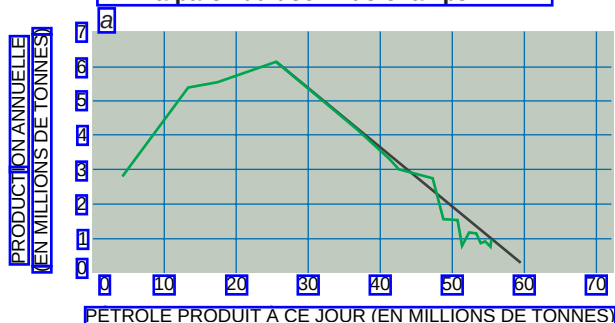
Divers événements pourraient précipiter ou différer le déclin de la production pétrolière. Trois d'entre eux, notamment, ont souvent conduit des géologues et des économistes à nier les

## Combien reste-t-il de pétrole à découvrir ?

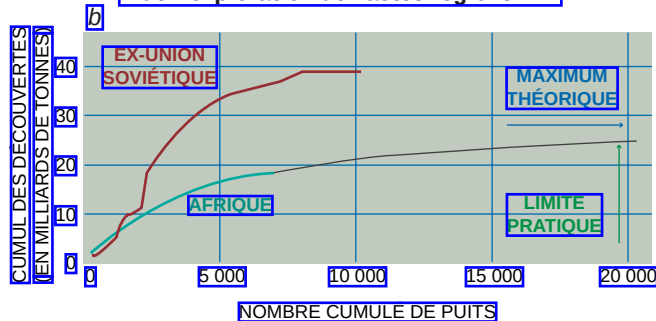
Pour déterminer que la quantité de pétrole classique susceptible d'être encore produite s'élève à environ 140 milliards de tonnes, nous avons associé plusieurs techniques. Tout d'abord, nous avons extrapolé les chiffres de production publiés pour les gisements anciens déjà sur le déclin (a). Ainsi, le gisement Thistle, au large de l'Angleterre, produira environ 60 millions de tonnes. Ensuite, nous avons tracé le graphe de la quantité de pétrole découverte jusqu'ici dans quelques régions du Globe en fonction du nombre cumulé des puits forés dans ces régions à titre exploratoire. Comme les gisements les plus importants sont généralement découverts en premier, la courbe croît d'abord rapidement, puis tend vers un maximum théorique : pour l'Afrique, 25 milliards de tonnes. Toutefois, les temps et

les coûts de prospection imposent une limite plus réaliste, située aux alentours de 23 milliards de tonnes (b). Troisièmement, nous avons analysé la distribution des tailles des gisements pétroliers de diverses régions, notamment du golfe du Mexique. Après classement en fonction de la taille, puis report sur une échelle logarithmique, on remarque que ces gisements tendent à suivre une parabole qui s'élargit de manière prédictible au cours du temps (c). Enfin, nous avons vérifié nos estimations en confrontant nos projections de la production pétrolière dans de grandes régions, par exemple le monde, à l'exception du golfe Persique, avec l'augmentation et la diminution des quantités découvertes annuellement dans ces régions quelques décennies plus tôt (d).

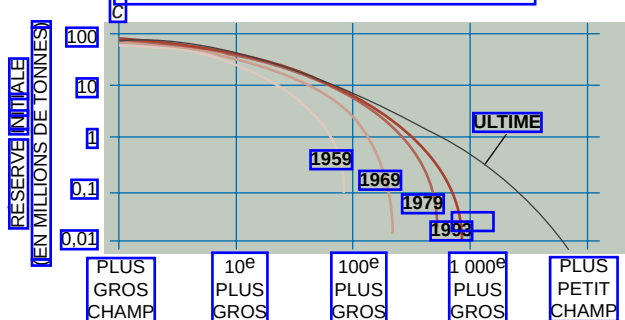
On prévoit la quantité de pétrole restante à partir du déclin de champs...



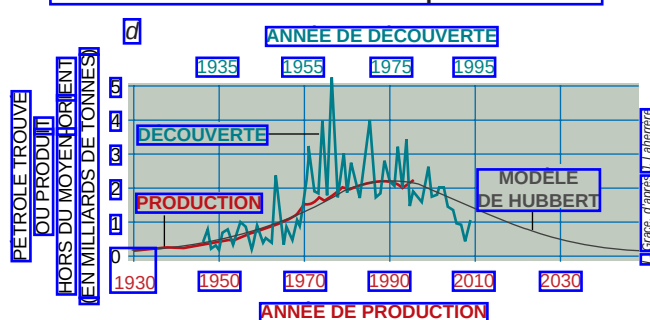
... à partir des rendements décroissants de l'exploration de vastes régions...

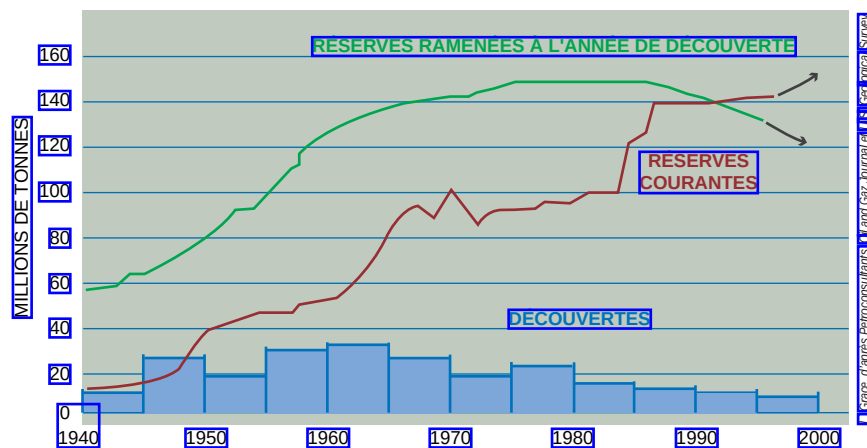


... en extrapolant la taille des champs à découvrir...



... et en comparant la production aux découvertes décalées dans le temps.





**5. LA CROISSANCE DES RESERVES PETROLIERES depuis 1980 n'est qu'une illusion reposant sur des révisions tardives des estimations initiales. En rapportant ces révisions à l'année de découverte des gisements, on constate que les réserves ont chuté, en raison d'un déclin continu des découvertes de nouveaux gisements (histogramme en bleu).**

prochaines difficultés de l'exploitation pétrolière.

Premièrement, certains ont prétendu que des endroits reculés de la planète renfermeraient d'énormes gisements encore inconnus. Leur hypothèse est improbable : les contrées encore inexplorées sont rares (seules les très grandes profondeurs sous-marines et les zones polaires n'ont pas été totalement testées), et les potentialités de ces régions sont limitées. Les progrès accomplis en géophysique et en géochimie théoriques ont permis de dresser, avec une précision impressionnante, la carte des éventuels gisements rentables : de vastes zones continentales et une grande partie des zones océaniques profondes sont probablement stériles.

La mer Caspienne renferme-t-elle des trésors pétroliers sous-estimés ? Selon nos modèles, la production augmentera dans cette région jusque vers 2010, mais certains experts américains admettent que les réserves totales de la mer Caspienne sont analogues à celles de la mer du Nord, soit environ sept milliards de tonnes, et certainement pas des dizaines de milliards de tonnes, comme l'ont parfois signalé des journaux.

D'autre part, on a souvent prétendu que des techniques nouvelles augmenteraient la part de pétrole (le «taux de récupération») que l'on peut extraire des gisements. Dans les années 1960, les compagnies pétrolières supposaient qu'on ne pouvait récupérer que 30 pour cent d'un gisement ; aujourd'hui, elles avancent une moyenne de 40 à 50 pour cent. Le perfectionnement des techniques permettrait-il d'accroître notablement les réserves planétaires ?

Un peu (voir *La production du pétrole au XXI<sup>e</sup> siècle*, par Roger Anderson, p. 40), mais l'amélioration apparente des taux de récupération est en grande partie un effet d'annonce. Quand les gisements vieillissent, leurs propriétaires cherchent souvent de nouvelles techniques pour ralentir leur déclin. Ce déclin permet également aux ingénieurs d'évaluer plus précisément la taille des gisements et de corriger à la hausse les estimations antérieures sous-estimées, notamment les estimations P90, qui, par définition, avaient 90 pour cent de chances d'être dépassées (la probabilité que les réserves d'un champ soient supérieures à zéro est égale à 100 pour cent ; la probabilité que les réserves réelles soient supérieures aux réserves prouvées est égale à 90 pour cent).

Une autre raison pousse à douter d'une amélioration notable des taux de récupération : lorsqu'elles estiment leurs réserves, les compagnies pétrolières comptent déjà sur d'éventuels progrès techniques. En outre, les techniques le plus en pointe apportent peu à l'exploitation des plus grands gisements, à savoir ceux du Proche-Orient, dont le pétrole n'a nullement besoin d'aide pour jaillir du sol.

Enfin, certains économistes prétendent que la planète renferme d'énormes réserves de combustibles que l'on pourra substituer au pétrole brut dès que celui-ci sera trop coûteux. Ces gisements abondent effectivement : on estime que la ceinture pétrolière de l'Orénoque, au Venezuela, contient 160 milliards de tonnes de ce liquide figé nommé pétrole lourd. Les sables asphaltiques du Canada et de l'ex-

Union soviétique contiendraient l'équivalent de plus de 40 milliards de tonnes de pétrole (voir *L'exploitation du pétrole à ciel ouvert*, par Richard George, p. 38). En théorie, une fois terminée la grande époque du pétrole classique, ces réserves non classiques pourraient être la source à partir de laquelle on produira des carburants liquides. Toutefois l'industrie pétrolière risque de manquer de temps et d'argent pour effectuer sa reconversion.

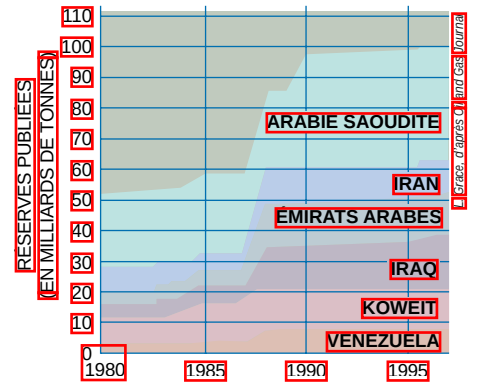
L'exploitation des réserves nouvelles pourrait également être écologiquement redoutable. Les sables asphaltiques, par exemple, sont exploités surtout dans des mines à ciel ouvert, de sorte que la récupération du pétrole à partir de ces sables pollue l'atmosphère. Les huiles lourdes de l'Orénoque, d'autre part, contiennent des métaux lourds et du soufre qu'il faut éliminer. Ainsi, les pays s'opposent probablement à un développement débridé de cette nouvelle industrie pétrolière. Face à ces obstacles potentiels, nous pensons qu'au cours des 160 prochaines années, seuls 100 milliards de tonnes seraient au maximum extraits des réserves de pétrole non classique.

### Le déclin

La consommation mondiale de pétrole croît aujourd'hui à un rythme supérieur à deux pour cent par an. Depuis 1985, la consommation d'énergie augmente d'environ 30 pour cent en Amérique latine, de 40 pour cent en Afrique et de 50 pour cent en Asie. D'après l'administration américaine, la demande mondiale en pétrole augmentera de 60 pour cent vers 2020, pour atteindre alors environ 5,5 milliards de tonnes par an.

Le déclin de la production pétrolière engendrera probablement des tensions économiques et politiques. À moins que l'on n'utilise rapidement d'autres formes d'énergie, la part de marché de l'OPEP augmentera rapidement pour dépasser 30 pour cent dans deux ans, atteignant ainsi le niveau des années 1970, au cours des chocs pétroliers.

Le prix du pétrole augmentera sans doute considérablement : les augmentations réduiront la demande et ralentiront la production durant peut-être dix années (la demande a chuté de plus de dix pour cent après le choc pétrolier de 1979 et a mis 15 ans pour retrouver son niveau antérieur), mais, vers 2010 envi-



**6. CETTE DOUTEUSE AUGMENTATION DES RÉSERVES, rapportée par six pays membres de l'OPEP, a ajouté 40 milliards de tonnes de pétrole au recensement officiel des réserves, sans pourtant avoir été suivie d'aucune découverte majeure de gisements nouveaux.**

ron, nombre de pays du Moyen-Orient auront eux-mêmes épuisé plus de la moitié de leurs réserves. La production pétrolière mondiale chutera.

Si l'on s'y prépare suffisamment tôt, la transition ne sera pas nécessairement traumatisante. Si l'on rentabilise et si l'on diversifie les techniques de production de carburants liquides à partir du gaz naturel, ce dernier pourrait devenir la prochaine source d'énergie des transports (voir *Des carburants liquides à partir du gaz naturel*, par Safaa Fouda, p. 46). Une énergie nucléaire plus sûre, des énergies renouvelables moins chères et des plans de stockage du pétrole retarderaient également le déclin inévitable du pétrole classique.

Dès aujourd'hui, les pays devraient planifier la gestion de l'énergie et investir dans de nouvelles recherches. La planète n'est pas encore à court de pétrole, mais nous devons envisager la fin du pétrole bon marché et abondant.

Colin CAMPBELL est géologue. Jean LAHERRÈRE est géologue et membre du Groupe Énergie 2010-2020 du Commissariat général du plan.

Jean LAHERRÈRE, *Distributions de type fractal parabolique dans la Nature*, in *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 322, IIa, n° 7-4, pp. 535-541, avril 1996.

Jean LAHERRÈRE et Alain PERRODON, *Technologies et réserves*, in *Pétrole et technique*, janvier-février 1997.

Jean LAHERRÈRE, *De quoi sont faites les réserves*, in *Pétrole informations*, n° 1732, février-mars 1998.

Adresses Internet : Jean Laherrère au [j.h.laherrere@infonie.fr](mailto:j.h.laherrere@infonie.fr), et Colin Campbell à [clanjou@perigord.com](mailto:clanjou@perigord.com)

# L'extraction du pétrole à ciel ouvert

RICHARD GEORGE

*Certains sables du Canada renferment plus de pétrole que n'en contiennent tous les gisements d'Arabie saoudite. On sait aujourd'hui exploiter ces ressources de façon rentable.*

On a longtemps assimilé le «pétrole» au pétrole brut, mélange liquide d'hydrocarbures qui filtre à travers les couches poreuses du sous-sol et jaillit généreusement des trous de sonde. Toutefois une bonne partie des réserves pétrolières mondiales se présente sous la forme, moins directement utilisable, d'une substance noire et visqueuse, nommée bitume, qui s'écoule difficilement entre les grains de sable et de certains schistes (des boues

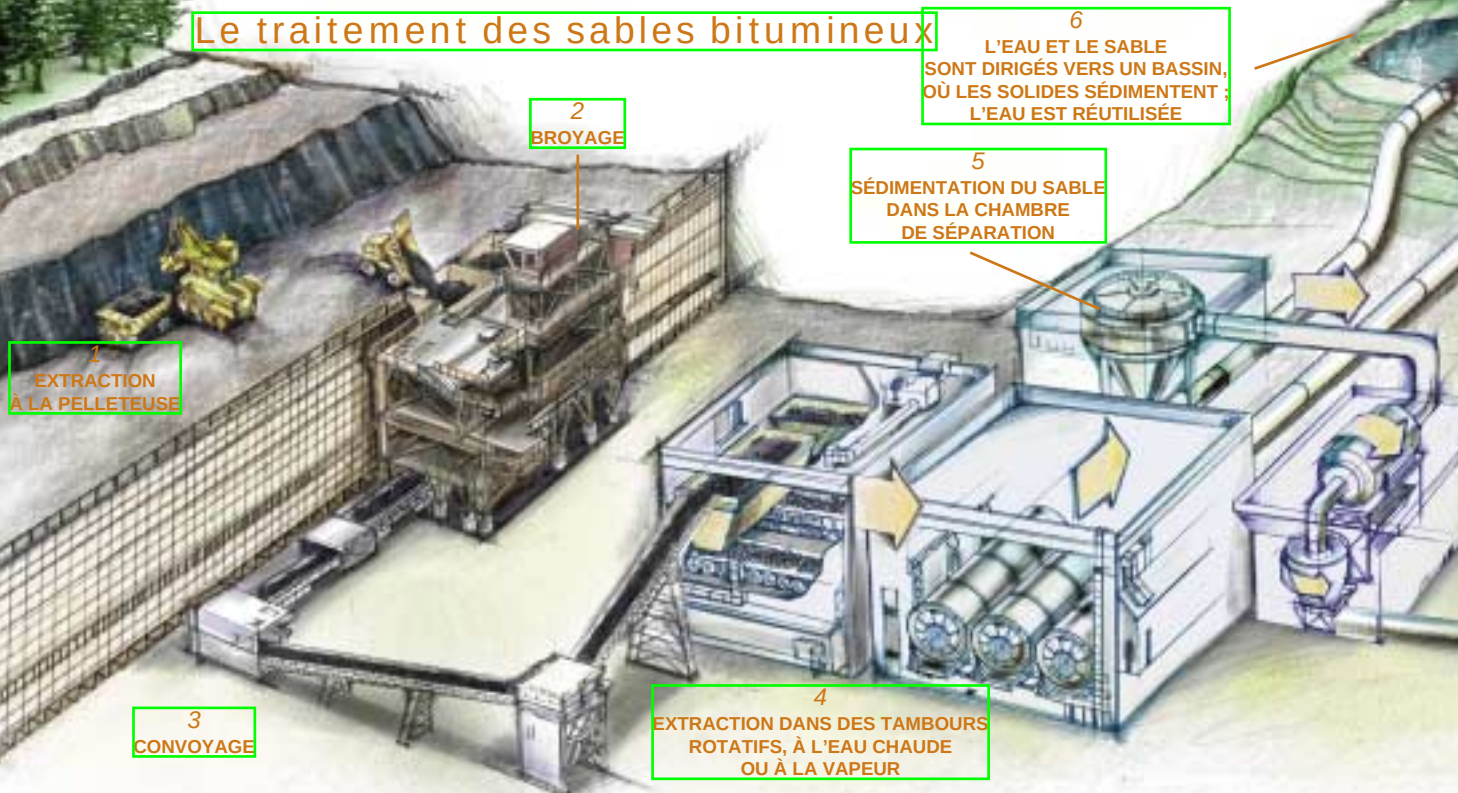
solidifiées). Des sociétés apprennent à récupérer ce pétrole dans des mines à ciel ouvert.

Creuser le sol pour en extraire ensuite du pétrole semble plus difficile que forer un puits et pomper du pétrole brut, mais les formes non classiques du pétrole sont si abondantes qu'on ne peut les négliger. Dans la seule province d'Alberta, au Canada, les méthodes actuelles de traitement récupéreraient 41 milliards de tonnes de sables asphaltiques, soit plus que les réserves de pétrole (publiées) de l'Ara-

bie saoudite. Les schistes bitumineux semblent moins abondants, mais l'Australie en contient au moins 3,8 milliards de tonnes, et l'Estonie, le Brésil, la Suède, les États-Unis et la Chine en possèdent également de grandes quantités. Au total, ces sables et ces schistes des quatre coins du Globe renfermeraient plusieurs centaines de milliards de tonnes de pétrole.

Quelle part de ces réserves serait récupérable de manière rentable? On l'ignore, car le traitement nécessaire pour transformer les sables asphal-

## Le traitement des sables bitumineux



tiques et les schistes bitumineux en produits pétroliers utilisables est techniquement complexe.

Depuis des siècles, les indigènes du Nord de la province d'Alberta utilisaient le bitume suintant des berges de la rivière Athabaska pour colmater les fuites de leurs canoës. Dès 1893, le gouvernement canadien finança des études sur les «sables goudronnés» de l'Athabaska, qui semblaient être une source prometteuse de pétrole. Puis, en 1920, Karl Clark, du Conseil de recherche de l'Alberta, découvrit un moyen pratique de séparer le bitume du sable : après avoir introduit, dans la machine à laver familiale, une pellette d'asphalte additionnée d'eau chaude et de soude caustique, il constata que le bitume flottait à la surface du mélange sous forme d'une mousse qu'il pouvait ensuite écumer.

L'idée de Clark resta négligée jusqu'en 1967, quand l'ancêtre de la Société Suncor Energy, la Société Great Canadian Oil Sands, mit à son programme industriel l'exploitation des sables asphaltiques. La hausse des cours du pétrole, durant les années 1970, favorisa cette

coûteuse entreprise, mais diverses pannes du matériel d'excavation contrarièrent le travail des mineurs jusqu'en 1992 ; la Société Suncor modernisa alors ses équipements.

Ces cinq dernières années, mes collègues ont ainsi extrait du pétrole de mines à ciel ouvert à un prix qui n'est pas supérieur à celui du pétrole brut. Notre production a augmenté de 38 pour cent : nous vendons annuellement 3,8 millions de tonnes de ce pétrole tiré des mines. Cette croissance, partiellement limitée par les préoccupations écologiques, pourrait encore augmenter considérablement : nous nous préoccuons notamment du traitement des résidus, nommés «produits de queue». Les grains les plus gros, qui se déposent rapidement dans une boue d'eau et de sable, sont directement rejetés dans le sol, mais l'eau contient également de nombreuses particules en suspension ; nous devons la conserver dans de grands bassins de rétention, afin d'éviter la pollution des cours d'eau environnants. Spontanément, ces minuscules résidus mettraient des siècles à se déposer, mais nos ingénieurs ont découvert que l'ajout de gypse (du sulfate de calcium extrait du pétrole) dans les bassins réduit à une ou deux décennies le temps de décantation de ces résidus. Le sol perturbé semble alors retrouver un état proche de son état naturel. Notre société consacre un



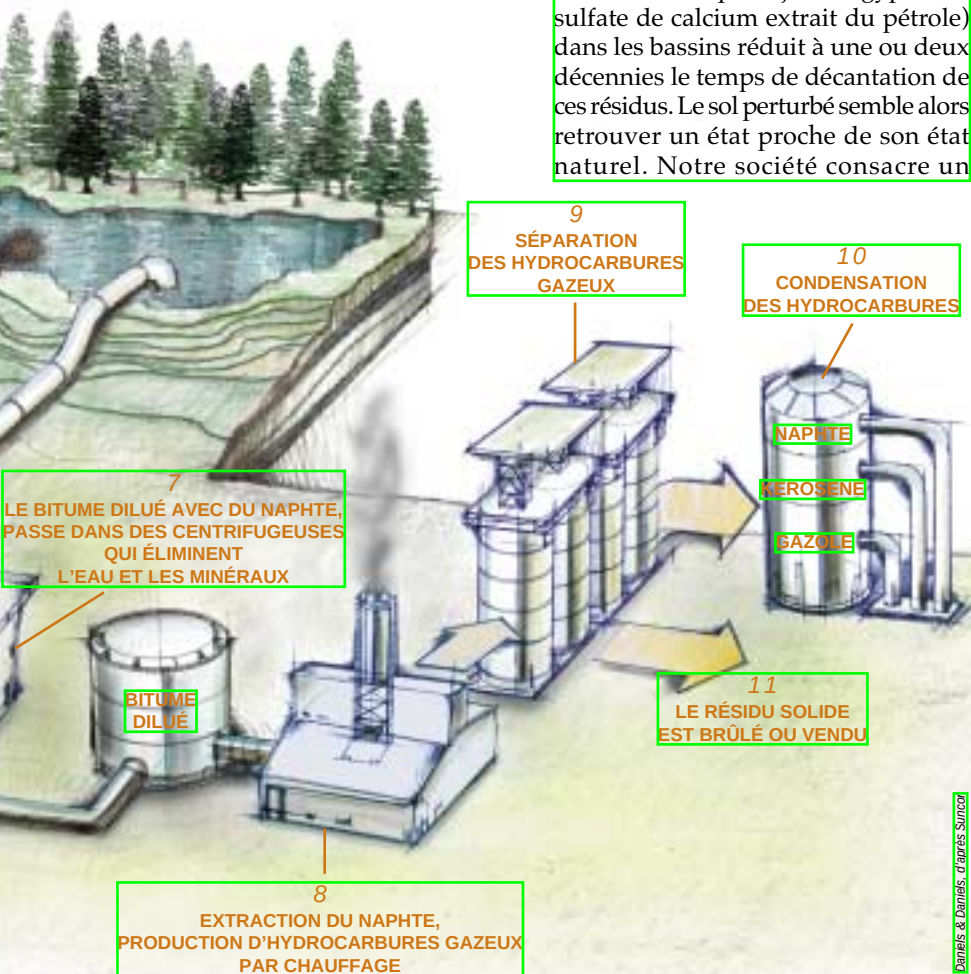
**COUVERTS DE BITUME, les grains de sables asphaltiques ressemblent à du marc de café.**

sixième de son chiffre d'affaires à la lutte contre la pollution.

Une nouvelle technique évite ces problèmes et permet, en principe, d'atteindre les gisements trop profonds pour être exploités à ciel ouvert : on draine le pétrole de ces sables en injectant de la vapeur dans le sol. Une fois chauffé, le bitume se fluidifie, formant sous le site d'injection une nappe que l'on ramène en surface à l'aide d'un matériel de forage classique. Ce procédé de «drainage par gravité assisté par vapeur» est aujourd'hui testé par des compagnies pétrolières telles que la Société Alberta Energy. Nous prévoyons de l'utiliser.

Nos ingénieurs mettent également au point un système qui extrait le pétrole de roches broyées en les chauffant dans un gigantesque four cylindrique. Bien que cette technique ne convienne pas pour les sables asphaltiques, elle semble utile pour le traitement des schistes bitumineux. Si le site de démonstration que nous construisons avec nos partenaires australiens fait ses preuves, une industrie des schistes bitumineux pourrait se développer en Australie durant la prochaine décennie.

Ainsi, alors que la production de pétrole classique décline, les schistes bitumineux et les sables asphaltiques pourraient devenir une source d'énergie importante du siècle à venir.



Richard GEORGE est président de la Société Suncor Energy.

Richard L. George, *Canada's Oil Sands: The Unconventional Alternatives*, in *Hart's Petroleum Engineer International*, pp. 33-36, mai 1997.

Site Internet de Suncor Energy :

<http://www.suncor.com>

Site Internet Syncrude :

<http://www.syncrude.com>



# La production du pétrole au XXI<sup>e</sup> siècle

ROGER ANDERSON

*De récents perfectionnements de l'imagerie souterraine, du forage téléguidé et de l'exploitation sous-marine permettront de mieux récupérer le pétrole.*

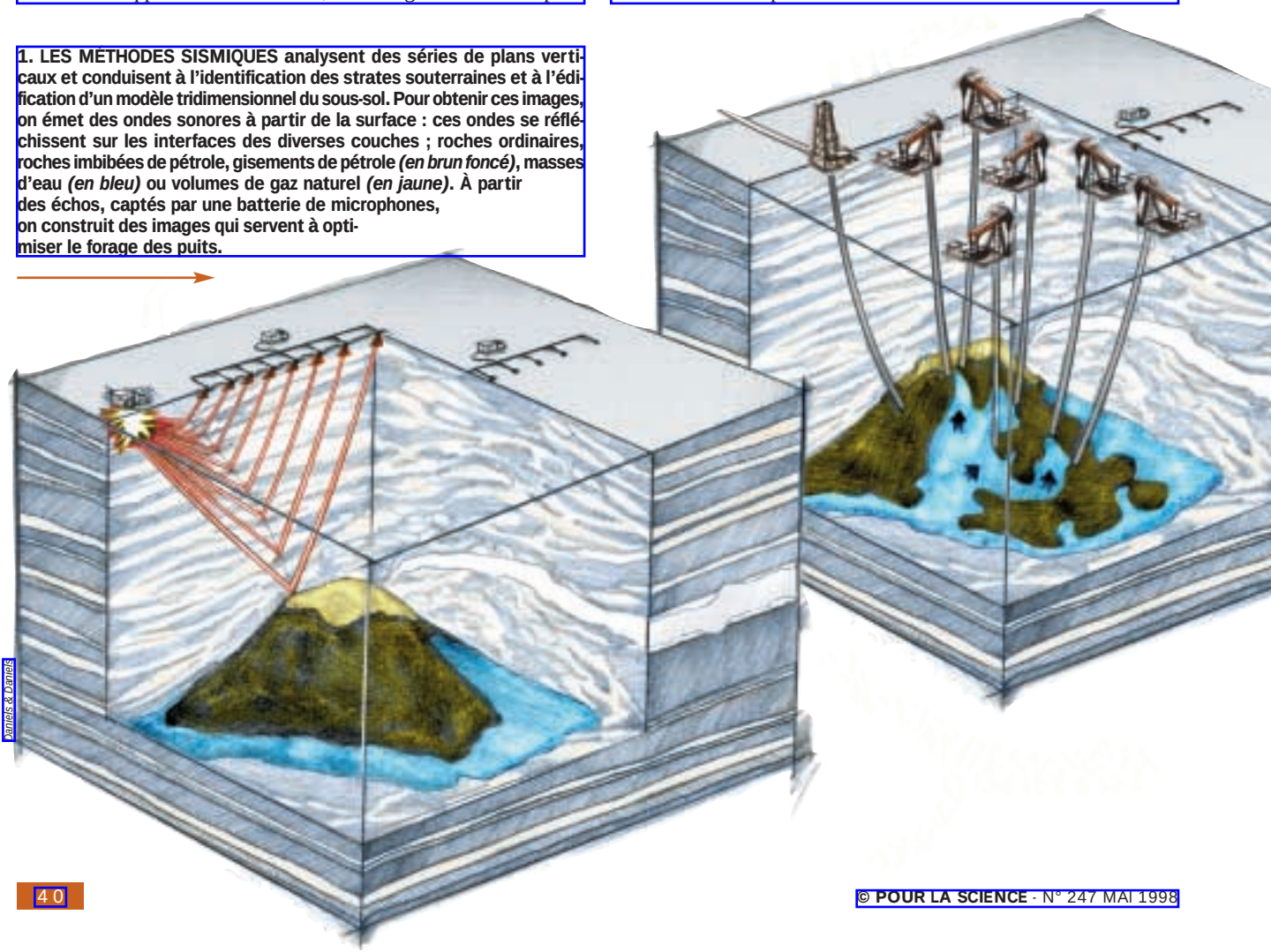
**E**n 2010, les économies mondiales auront besoin de 1,4 milliard de tonnes de pétrole de plus que n'en produira sans doute l'industrie pétrolière. Un tel écart entre l'offre et la demande (près de la moitié de tout le pétrole extrait en 1997) risque de conduire à une flambée des prix, à une récession économique, voire à des guerres.

Toutefois, quatre innovations majeures faciliteront la découverte de nouveaux gisements et accroîtront spectaculairement la proportion de pétrole – le «taux de récupération» – que l'on peut extraire des gisements actuels à un coût raisonnable. Si ces techniques sont mises en œuvre dans les cinq prochaines années, elles augmenteront la pro-

duction mondiale de plus de 20 pour cent. Une adaptation aussi rapide peut sembler ambitieuse pour une industrie où les inventions ne s'imposent qu'après 10 à 20 ans, mais ce changement sera aiguillonné par de formidables enjeux économiques.

Par exemple, ces deux dernières années, le Groupe Elf a découvert des gisements géants au large des côtes de l'Afrique de l'Ouest. L'exploitation se fera par les nouvelles techniques évoquées ici. Les autres grandes compagnies adoptant des techniques analogues, elles pourraient fournir, vers 2010, un supplément de 0,7 milliard de tonnes par an.

**1. LES METHODES SISMIQUES** analysent des séries de plans verticaux et conduisent à l'identification des strates souterraines et à l'édification d'un modèle tridimensionnel du sous-sol. Pour obtenir ces images, on émet des ondes sonores à partir de la surface : ces ondes se réfléchissent sur les interfaces des diverses couches ; roches ordinaires, roches imbibées de pétrole, gisements de pétrole (en brun foncé), masses d'eau (en bleu) ou volumes de gaz naturel (en jaune). À partir des échos, captés par une batterie de microphones, on construit des images qui servent à optimiser le forage des puits.



## Une prospection quadridimensionnelle

La première des quatre innovations est une nouvelle méthode de prospection.

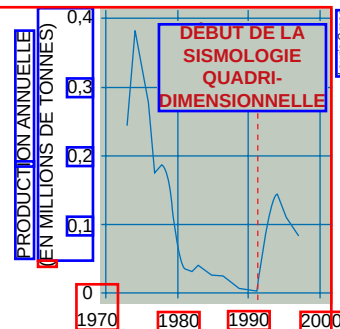
La prospection pétrolière avait considérablement accru son efficacité à partir de 1927, lorsque des géologues réussirent pour la première fois à utiliser les échos d'ondes acoustiques émises dans la croûte terrestre afin de former des images détaillées de sections de la croûte. Puis les sismologues apprirent à combiner des instantanés pour créer des modèles tridimensionnels qui montraient le pétrole piégé à l'intérieur des roches pétrolifères. L'industrie pétrolière, à l'aide de ces «analyses sismiques tridimensionnelles», a découvert de nouveaux gisements et augmenté jusqu'à 20 pour cent les taux de récupération.

Ces dernières années, quelques équipes de géophysiciens ont mis au point des techniques encore plus puissantes, afin de suivre les mouvements du pétrole, du gaz et de l'eau à mesure que l'on exploite les puits. La sismologie quadridimensionnelle, qui intègre le temps en plus des trois dimensions de l'espace, permet de tester des idées de répar-

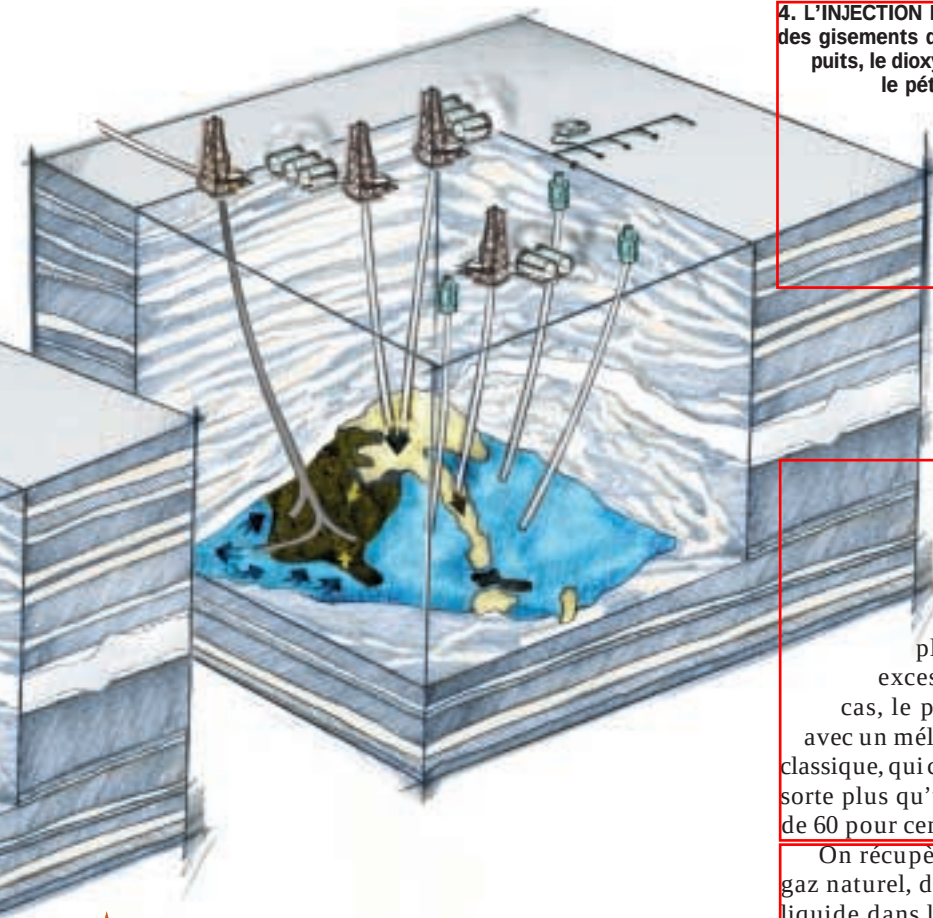
tition des puits et de déterminer les moyens d'extraire le maximum de pétrole en un temps et pour un coût aussi réduits que possible.

Contrairement à l'approche tridimensionnelle, la sismologie quadridimensionnelle semble s'imposer rapidement : le nombre de gisements qui en bénéficient a doublé au cours de chacune des quatre dernières années et s'élève aujourd'hui à environ 60. Elle accroît les facteurs de récupération de 10 à 15 pour cent. Malheureusement, elle

ne fonctionne véritablement que sur la moitié environ des grands gisements mondiaux, ceux qui sont composés de roches poreuses, gorgées de pétrole et de gaz naturel.



**3. LE DÉBIT A AUGMENTÉ, dans le plus grand des gisements pétroliers situés au large des côtes de la Louisiane, en 1992, quand la compagnie qui l'exploitait a utilisé l'analyse sismique quadridimensionnelle.**



**4. L'INJECTION DE DIOXYDE DE CARBONE LIQUIDE** peut régénérer des gisements qui déclinent. Injecté sous haute pression dans les puits, le dioxyde de carbone diffuse dans le gisement et repousse le pétrole restant vers les puits en activité (on remplace parfois le dioxyde de carbone liquide par de la vapeur d'eau ou par du gaz naturel). De même, de l'eau injectée sous une poche de pétrole brut pousse ce dernier vers un puits. Les puits «intelligents» du futur auront une structure ramifiée ; ils récupéreront le pétrole dans certaines branches et utiliseront d'autres branches pour réinjecter l'eau dans son emplacement d'origine.

## Faire le plein

Lorsque les géologues commencèrent l'étude de la sismologie quadridimensionnelle, on supposait que le pétrole se répartissait spontanément entre du gaz plus léger, au-dessus de lui, et des eaux souterraines, plus lourdes, en dessous. Cette description est excessivement simplifiée. Dans la majorité des cas, le pompage engendre un drainage complexe, avec un mélange de pétrole, d'eau et de gaz ; la technique classique, qui consiste à pomper un puits jusqu'à ce qu'il n'en sorte plus qu'un mince filet de pétrole, laisse souvent plus de 60 pour cent du pétrole dans le gisement.

On récupère une partie de ce reliquat si l'on injecte du gaz naturel, de la vapeur d'eau ou du dioxyde de carbone liquide dans les puits : le fluide injecté diffuse alors à travers les pores de la roche et, quand tout se passe bien, pousse vers un puits voisin le pétrole resté dans la roche. Parfois, aussi, on injecte de l'eau sous la roche imbibée de pétrole.

Si l'injection de vapeur d'eau ou de dioxyde de carbone augmente le taux de récupération de 10 à 15 pour cent, elle augmente également de 50 à 100 pour cent le coût de production ; cette dépense supplémentaire s'ajoute au surcoût de 10 à 25 pour cent dû à l'utilisation de la sismologie quadridimensionnelle.

**2. QUAND ON EXPLOITE LES PUITS** en faisant venir dans les roches, vidées de leur pétrole, l'eau et le gaz situés respectivement au-dessous et au-dessus de la couche, des zones imprégnées de pétrole brut subsistent souvent, loin des puits : les exploitations classiques laissent de côté jusqu'aux deux tiers du pétrole d'un gisement. On combine aujourd'hui des séries d'analyses sismiques pour obtenir un modèle quadridimensionnel qui localise le pétrole, le gaz et l'eau du gisement, et qui prévoit également leurs déplacements durant l'exploitation. Cette sismologie avancée donne de bons résultats pour la moitié des gisements mondiaux.

## À la recherche du pétrole oublié

Un troisième progrès technique majeur, le «forage dirigé», permet de reprendre l'exploitation de gisements taris à un coût moindre que l'injection. Les ingénieurs de l'industrie pétrolière disposent aujourd'hui d'équipements variés afin de forer dans n'importe quelle direction, à plusieurs kilomètres de profondeur.

La méthode classique de forage est la mise en rotation sur son axe d'un long train de tiges d'acier terminé par un trépan : la rotation communiquée en surface se transmet aux tiges de profondeur. Par cette méthode, on ne peut pas toujours contourner des massifs rocheux : la courbure risque de casser le train de tiges en rotation. Ainsi a-t-on mis au point des trains de tiges de forage téléguidés, munis d'un moteur à boue à leur extrémité, au voisinage du trépan ; seules tournent les dents aux pointes de diamant qui creusent la roche. Un segment spécial, entre le moteur à boue et le trépan, commande la direction du forage.

Un forage de plusieurs kilomètres, pour atteindre une zone pétrolière d'une épaisseur de quelques dizaines de mètres seulement, est un travail de dentellière. Les Sociétés *Schlumberger*, *Halliburton* et d'autres compagnies pétro-

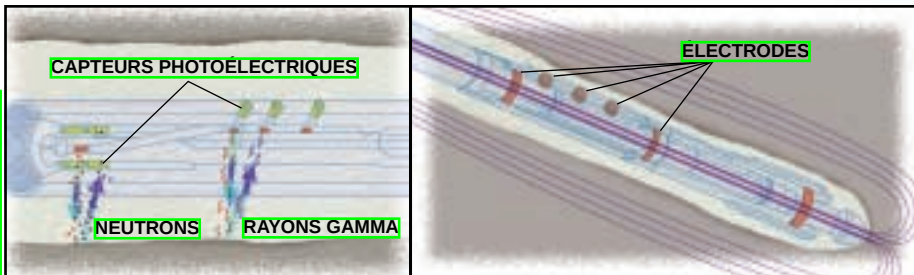
lières internationales ont conçu des capteurs complexes qui améliorent considérablement la précision des forages. Ces capteurs, qui fonctionnent jusqu'à des profondeurs de 6 000 mètres et jusqu'à des températures de 200 °C, sont fixés sur la tige de forage, juste au-dessus ou au-dessous du moteur à boue. Certains de ces capteurs mesurent la résistance électrique de la roche environnante ; d'autres émettent des neutrons et des rayons gamma, puis analysent l'écho renvoyé par les roches et par les fluides présents dans les pores de ces roches. Ces mesures, ainsi que la détermination de la position du trépan (par un système de guidage inertiel), sont alors transmises en surface sous la forme de pulsations du même courant de boue que celui qui actionne le moteur et qui lubrifie les parois du puits. Se fondant sur ces données, les ingénieurs qui commandent le forage dévient la trajectoire du trépan et guident celui-ci vers les zones les plus riches du gisement.

Une fois le forage terminé, les ouvriers installent classiquement un équipement de production au fond du puits. Plusieurs compagnies mettent aujourd'hui au point des capteurs capables de détecter le mélange de pétrole, de gaz et d'eau, et ils envisagent des systèmes pour séparer l'eau de ce mélange et la réinjecter sous la couche de pétrole.

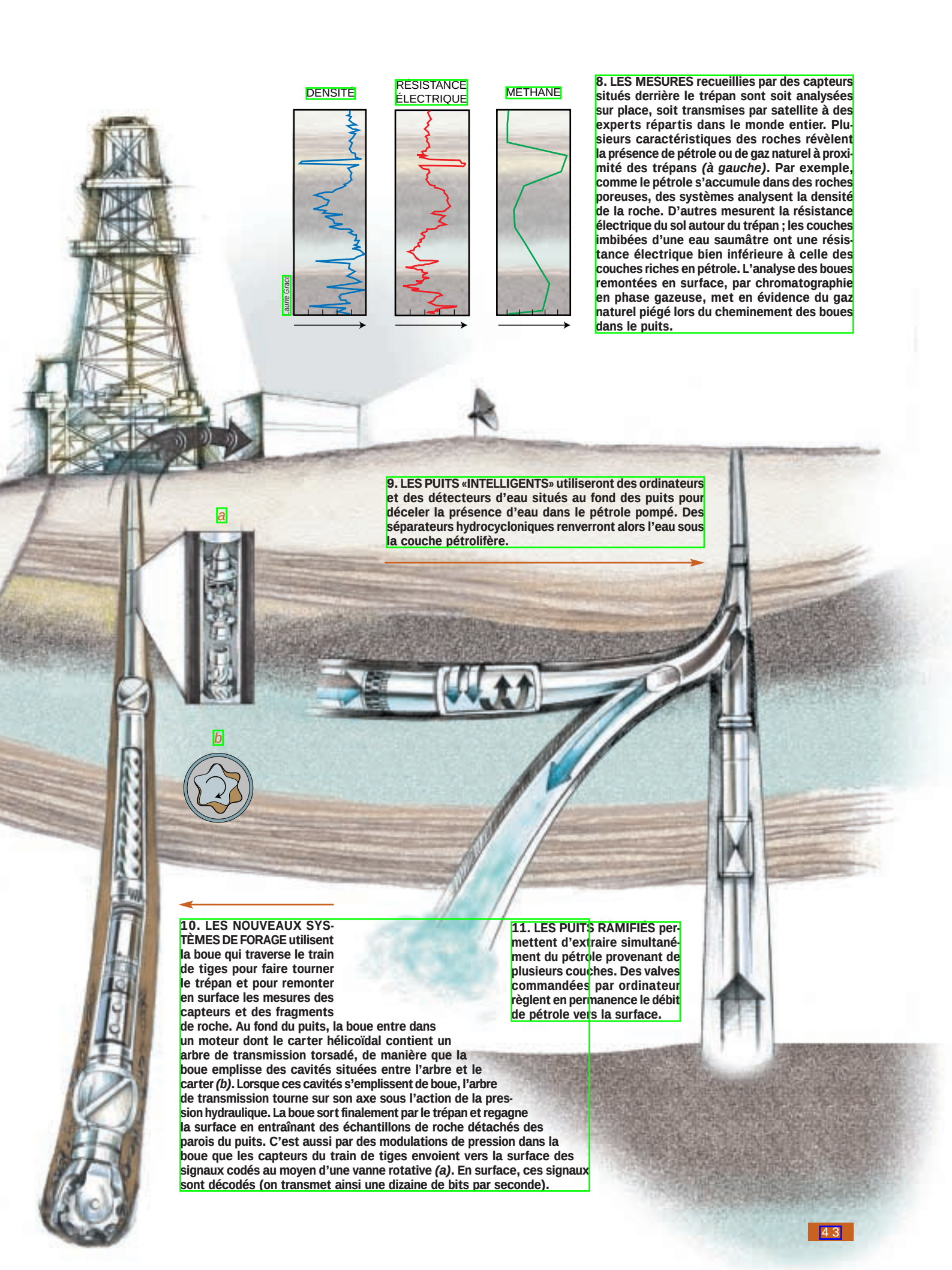
5. LE FORAGE HORIZONTAL était difficile quand on faisait tourner des trains de tiges de forage atteignant 5 800 mètres de longueur. Aujourd'hui, les trépanants sont mis en rotation par des moteurs qui équipent l'extrémité inférieure des trains de tiges : la direction de forage peut ainsi être modifiée de 90 degrés en moins d'une centaine de mètres. L'arbre du moteur est relié au trépan par un système de transmission situé dans un tronçon incurvable du train de tiges.



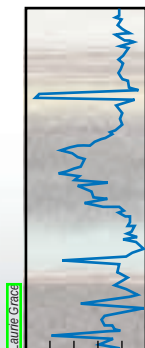
**6. CETTE CONSOLE DE FORAGE** permet à un ingénieur de surveiller des capteurs proches du trépan afin de savoir si celui-ci est dans la bonne direction pour forer la couche qui contient du pétrole. Le trépan peut alors être orienté.



**7. DES CAPTEURS situés derrière le trépan** détectent le pétrole, l'eau et le gaz naturel. Un système mesure la porosité de la roche environnante en émettant des neutrons, qui sont réfléchis par les atomes d'hydrogène. Un autre système détermine la densité du milieu en émettant des rayons gamma qui interagissent avec les atomes voisins. Enfin la présence de pétrole et d'eau modifie la résistance électrique des roches ; on mesure cette résistance en faisant circuler dans la roche un courant électrique à partir d'électrodes situées sur la paroi du train de tiges.



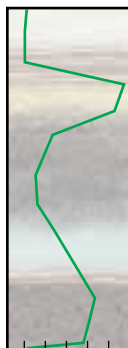
#### DENSITE



#### RESISTANCE ÉLECTRIQUE



#### METHANE



8. LES MESURES recueillies par des capteurs situés derrière le trépan sont soit analysées sur place, soit transmises par satellite à des experts répartis dans le monde entier. Plusieurs caractéristiques des roches révèlent la présence de pétrole ou de gaz naturel à proximité des trépan (à gauche). Par exemple, comme le pétrole s'accumule dans des roches poreuses, des systèmes analysent la densité de la roche. D'autres mesurent la résistance électrique du sol autour du trépan ; les couches imbibées d'une eau saumâtre ont une résistance électrique bien inférieure à celle des couches riches en pétrole. L'analyse des boues remontées en surface, par chromatographie en phase gazeuse, met en évidence du gaz naturel piégé lors du cheminement des boues dans le puits.

9. LES Puits «INTELLIGENTS» utiliseront des ordinateurs et des détecteurs d'eau situés au fond des puits pour déceler la présence d'eau dans le pétrole pompé. Des séparateurs hydrocycloniques renverront alors l'eau sous la couche pétrolière.

a

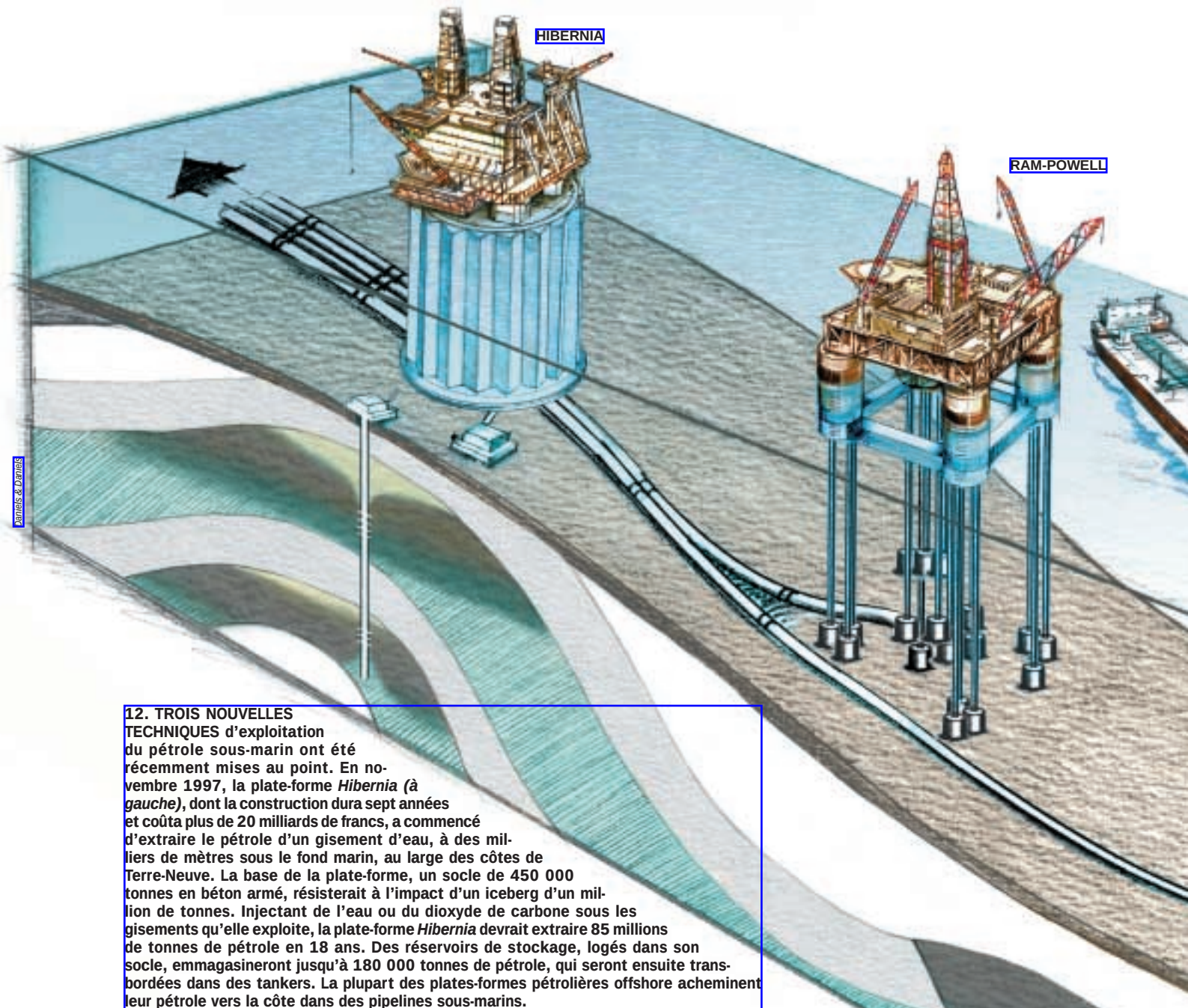


b



10. LES NOUVEAUX SYSTÈMES DE FORAGE utilisent la boue qui traverse le train de tiges pour faire tourner le trépan et pour remonter en surface les mesures des capteurs et des fragments de roche. Au fond du puits, la boue entre dans un moteur dont le carter hélicoïdal contient un arbre de transmission torsadé, de manière que la boue remplisse des cavités situées entre l'arbre et le carter (b). Lorsque ces cavités s'emplissent de boue, l'arbre de transmission tourne sur son axe sous l'action de la pression hydraulique. La boue sort finalement par le trépan et regagne la surface en entraînant des échantillons de roche détachés des parois du puits. C'est aussi par des modulations de pression dans la boue que les capteurs du train de tiges envoient vers la surface des signaux codés au moyen d'une vanne rotative (a). En surface, ces signaux sont décodés (on transmet ainsi une dizaine de bits par seconde).

11. LES Puits RAMIFIÉS permettent d'extraire simultanément du pétrole provenant de plusieurs couches. Des valves commandées par ordinateur règlent en permanence le débit de pétrole vers la surface.



**12. TROIS NOUVELLES TECHNIQUES** d'exploitation du pétrole sous-marin ont été récemment mises au point. En novembre 1997, la plate-forme *Hibernia* (à gauche), dont la construction dura sept années et coûta plus de 20 milliards de francs, a commencé d'extraire le pétrole d'un gisement d'eau, à des milliers de mètres sous le fond marin, au large des côtes de Terre-Neuve. La base de la plate-forme, un socle de 450 000 tonnes en béton armé, résisterait à l'impact d'un iceberg d'un million de tonnes. Injectant de l'eau ou du dioxyde de carbone sous les gisements qu'elle exploite, la plate-forme *Hibernia* devrait extraire 85 millions de tonnes de pétrole en 18 ans. Des réservoirs de stockage, logés dans son socle, emmagasineront jusqu'à 180 000 tonnes de pétrole, qui seront ensuite transbordées dans des tankers. La plupart des plates-formes pétrolières offshore acheminent leur pétrole vers la côte dans des pipelines sous-marins.

### La production en mer

Les derniers équipements mis au point permettent d'exploiter des gisements situés en mer, par des profondeurs supérieures à 1 000 mètres. À de telles profondeurs d'eau, le forage semblait impossible. Aujourd'hui, des robots sous-marins téléguidés installent sur les fonds océaniques un matériel qui évite les jaillissements du pétrole malgré sa pression élevée. Le pétrole produit par ces puits sous-marins sera ensuite acheminé, par de longs pipelines, vers des tankers servant de stockage et vers des plates-formes assises en eaux moins profondes. De telles installations existent déjà, et plusieurs compagnies prévoient d'en construire de nouvelles dans le golfe du Mexique et au large des côtes de la Norvège, du Brésil et de l'Afrique de l'Ouest.

Les compagnies apprennent également à mieux détecter les couches de terrain contenant le pétrole. De grandes couches horizontales de sel et de basalte se trouvent parfois sous la surface du fond océanique, dans les eaux pro-

fondes des marges continentales. Lors des sondages sismiques classiques, elles renvoient presque toute l'énergie sonore et dissimulent ainsi les gisements de pétrole qu'elles surmontent. À l'aide d'un dispositif récemment déclassifié par la Marine américaine, qui mesure d'infimes variations de l'intensité et de la direction du champ gravitationnel, les géophysiciens voient aujourd'hui sous ces couches de sel ou de basalte.

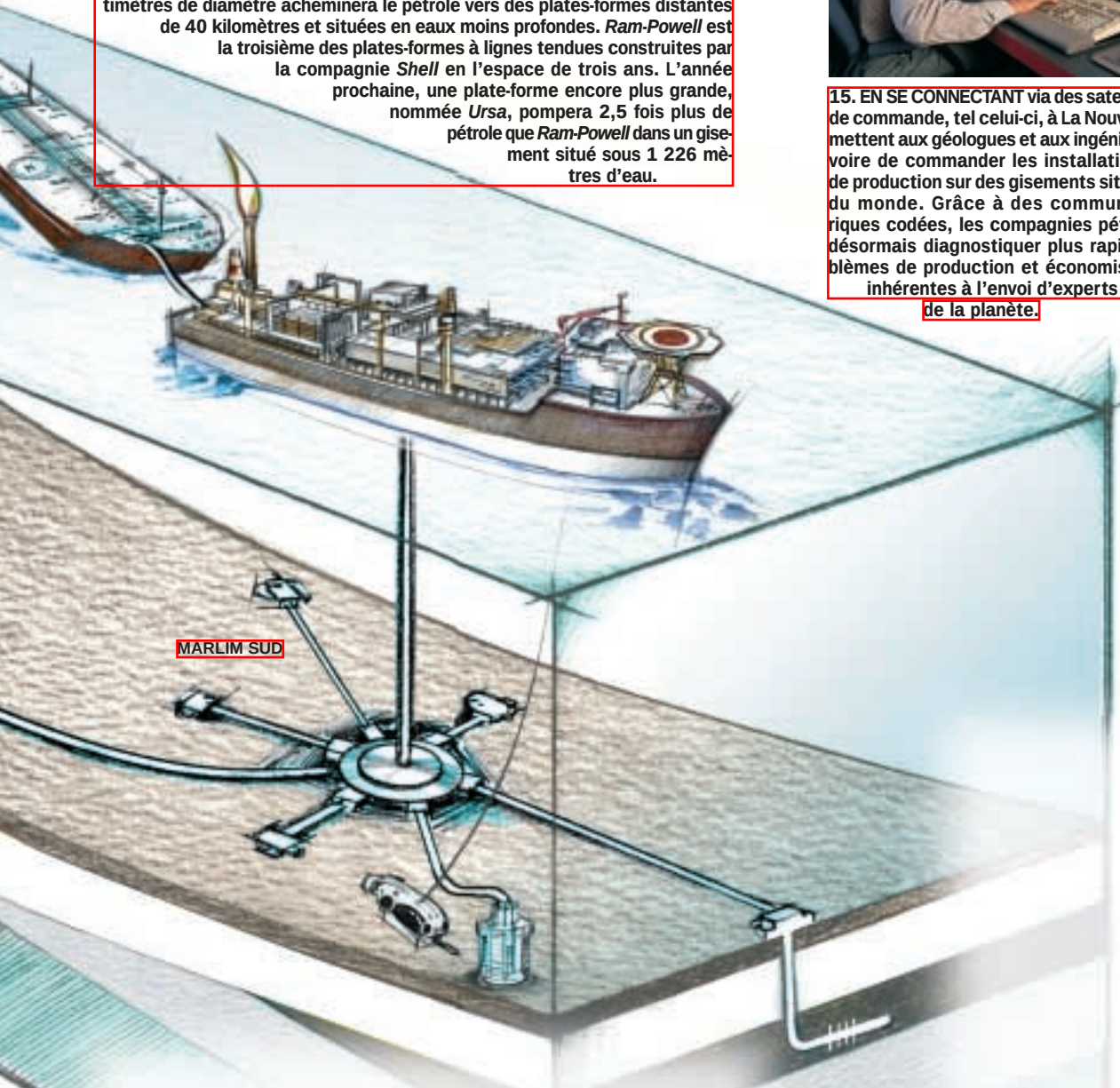
Bien que l'extraction du pétrole profondément enfoui sous les océans reste très coûteuse, les dix plus grosses compagnies pétrolières ont déjà découvert, à ces profondeurs, de nouveaux gisements, qui accroîtront de cinq pour cent leurs réserves pétrolières. Cet accroissement n'est pas encore comptabilisé dans les réserves mondiales.

Les techniques de prospection et de production pétrolières continueront de progresser au XXI<sup>e</sup> siècle. Elles n'éviteront probablement pas une pénurie possible de pétrole brut, mais elles donneront le répit nécessaire pour que les économies mondiales s'adaptent à d'autres sources d'énergie.

13. LA PLATE-FORME RAM-POWELL (au centre), construite dans le golfe du Mexique, par plus de 1 000 mètres de profondeur d'eau, par les compagnies Shell Oil, Amoco et Exxon, fonctionne depuis septembre 1997. Haute comme un immeuble de 46 étages, cette plate-forme est fixée sur des piliers de 270 tonnes, enfoncés dans le fond océanique, à 980 mètres au-dessous de la surface de l'eau. Avec ses douze lignes d'ancrage périphériques, chacune d'un diamètre de 71 centimètres, elle résisterait à des vagues de 22 mètres de hauteur et à des vents de 225 kilomètres par heure. Cette installation, qui a coûté cinq milliards de francs, peut percer des puits jusqu'à six kilomètres sous le fond océanique afin d'extraire les 17 millions de tonnes de pétrole qui, selon les estimations, sont récupérables dans le gisement. Un pipeline de 30 centimètres de diamètre acheminera le pétrole vers des plates-formes distantes de 40 kilomètres et situées en eaux moins profondes. Ram-Powell est la troisième des plates-formes à lignes tendues construites par la compagnie Shell en l'espace de trois ans. L'année prochaine, une plate-forme encore plus grande, nommée Ursa, pompera 2,5 fois plus de pétrole que Ram-Powell dans un gisement situé sous 1 226 mètres d'eau.



15. EN SE CONNECTANT via des satellites, des centres de commande, tel celui-ci, à La Nouvelle-Orléans, permettent aux géologues et aux ingénieurs de surveiller, voire de commander les installations de forage et de production sur des gisements situés à l'autre bout du monde. Grâce à des communications numériques codées, les compagnies pétrolières peuvent désormais diagnostiquer plus rapidement des problèmes de production et économiser les dépenses inhérentes à l'envoi d'experts aux quatre coins de la planète.



14. UNE DES TÊTES DE PUIXS les plus profondes installées sous l'eau (ci-dessus) se trouve à plus de 1 709 mètres sous la surface de l'océan Atlantique Sud, dans le champ de Marlim, au large du Brésil. À elle seule, la zone Sud de ce champ contiendrait 1,4 milliard de tonnes de pétrole brut. Il y a peu, ces réserves étaient inaccessibles. Des sous-marins téléguidés installent aujourd'hui un équipement de production sur le fond océanique. Le pétrole sera alors soit acheminé vers une plate-forme voisine située en eaux moins profondes, soit stocké provisoirement dans un navire en surface, avant d'être transvasé à bord de navettes. Les techniques d'immobilisation des navires de stockage, à la verticale du puits, ont beaucoup progressé. Quand le fond est à moins de quelques centaines de mètres de profondeur, on stabilise les navires par un système d'ancres. Au-delà, l'immobilisation doit être active : le navire doit utiliser le système de positionnement par satellite et des balises fixées sur le fond marin pour actionner ses moteurs et compenser sa dérive. Ces techniques devraient permettre d'exploiter des gisements sous-marins situés à plus de 3 000 mètres de profondeur d'eau.

Roger Anderson est directeur du Groupe «Pétrole» du Centre de l'énergie, à l'Université Columbia.

George A. COOPER, *Le forage dirigé*, in *Pour la Science*, juillet 1994.

*Deepwater Technology*, Gulf Publishing, supplément de *World Oil*, août 1997.

*World Oil's 4-D Seismic Handbook : The Fourth Dimension in Reservoir Management*, Gulf Publishing, 1997.



# Des carburants liquides à partir du gaz naturel

SAFAA FOUDA

*Le gaz naturel est plus propre et plus abondant que le pétrole. De nouveaux procédés chimiques le transforment en carburants liquides aussi efficaces et bon marché que l'essence.*

**D**epuis peu, des véhicules consomment du gaz naturel : des véhicules utilitaires, des camions, des autobus et des automobiles s'approvisionnent en gaz sous une pression de 200 atmosphères et stockent ce carburant dans des réservoirs spéciaux, qui libéreraient immédiatement leur contenu en cas d'accident, afin d'éviter les risques d'explosion. Ces véhicules sont silencieux, leur moteur s'utilise moins que les moteurs à essence, et ils polluent moins, car le gaz naturel ne contient ni composés soufrés, ni composés azotés, ni métaux lourds.

Toutefois, une autre mutation est en cours : dans quelques pays, les automobilistes ont changé de carburant... sans s'en rendre compte : leur gazole, liquide, a été produit en partie à partir de gaz naturel. Un tel carburant, aujourd'hui fabriqué par la Société *Sasol*, en Afrique du Sud, satisfait aux plus strictes réglementations sur la pollution de l'air.

Combustible fossile très propre, le gaz naturel est aussi très abondant : la Terre en renferme suffisamment pour que l'on produise facilement 80 milliards de mètres cubes d'hydrocarbures liquides, soit plus de deux fois la quantité de pétrole jamais découverte aux États-Unis. Certains gisements de charbon et d'autres formations géologiques en contiendraient même deux fois plus. Aujourd'hui, le gaz naturel sortant des puits de pétrole de nombreuses régions du monde a si peu de valeur qu'il est soit brûlé sur place, soit réinjecté dans le sol. En Alaska, par exemple, les compagnies pétrolières en réinjectent quotidiennement 200 millions de mètres cubes, principalement pour éviter que

le dioxyde de carbone formé lors de la combustion ne surcharge l'atmosphère en gaz carbonique, qui accroît l'effet de serre.

Toutefois, lorsque les réserves de pétrole brut diminueront, les combustibles liquides dérivés du gaz naturel pourraient prendre la relève pendant encore une décennie. Bien qu'abondant, le gaz naturel se trouve souvent dans des gisements éloignés des consommateurs. Or, en raison de sa faible densité, son transport par pipeline est quatre fois plus coûteux que celui du pétrole. Le gaz récupéré sur les gisements peut être liquéfié par refroidissement et compression, avant un transport par tanker, mais les installations nécessaires à une telle transformation sont massives et complexes ; en outre, les gaz naturels liquéfiés sont difficiles à manipuler. Ne pourrait-on en faire un carburant directement consommable par les véhicules existants, au prix d'un réglage des moteurs ?

De récentes découvertes techniques ont amené plusieurs compagnies pétrolières à envisager la construction de sites de transformation du gaz naturel, afin de le convertir en hydrocarbures liquides qu'elles achemineraient ensuite à peu de frais. En Louisiane, par exemple, la Société *Exxon* a fait fonctionner une unité de démonstration d'une telle conversion. Dans la péninsule d'Arabie, le Qatar négocie aujourd'hui avec trois compagnies pétrochimiques pour faire construire des usines qui transformeraient le gaz naturel extrait d'un énorme gisement de gaz sous-marin (un réservoir d'un seul tenant qui renferme environ un dixième de toutes les réserves

prouvées). De surcroît, la plus grande compagnie pétrolière norvégienne, la Société *Statoil*, projette de construire de petits modules, montés sur des plates-formes flottantes, pour convertir le gaz naturel de gisements en mer du Nord. Les divers projets utiliseront des techniques relativement différentes, mais ils seront tous confrontés au même problème de chimie : comment fabriquer de grosses molécules d'hydrocarbures à partir de molécules plus petites ?

## La formule classique

Le principal composant du gaz naturel est le méthane, dont la molécule est constituée de quatre atomes d'hydrogène symétriquement disposés autour d'un atome de carbone. Cette symétrie tétraédrique rend le méthane particulièrement stable. Pour le transformer en hydrocarbures liquides, on doit d'abord rompre ses liaisons chimiques, ce que l'on fait en le chauffant sous pression ou en le mettant en contact avec des catalyseurs, c'est-à-dire des substances qui favorisent des réactions chimiques sans servir de réactif.

Pour transformer le gaz naturel, les chimistes ont d'abord testé la méthode la plus directe : dans un premier temps, on rompt les liaisons chimiques du méthane en le chauffant en présence de vapeur d'eau, grâce à un catalyseur à base de nickel. Ce «reformage à la vapeur» engendre un «gaz de synthèse», mélange d'hydrogène et d'oxyde de carbone. Puis, à partir de ce gaz de synthèse, on produit des hydrocarbures plus lourds (des molécules composées seulement d'atomes de carbone et d'atomes



1. CE GAZ BRULE en tête d'un puits de pétrole du Wyoming échauffe inutilement l'atmosphère. Des réserves de gaz naturel sont aujourd'hui gaspillées parce que le transport du gaz naturel par pipeline est bien plus coûteux que le transport du pétrole.

d'hydrogène), par une méthode qui fut inventée en 1923 par Franz Fischer et Hans Tropsch (ces deux chimistes voulaient donner une autonomie énergétique à l'Allemagne, lors de la Seconde Guerre mondiale : ils partaient également d'un gaz de synthèse, mais celui-ci était obtenu à partir de charbon et d'oxygène atmosphérique).

En Afrique du Sud, pendant plusieurs décennies, la Société *Sasol* a utilisé la méthode de Fischer-Tropsch pour fabriquer des carburants liquides en utilisant du gaz de synthèse dérivé du charbon. Aujourd'hui encore, cette société emploie la même technique : le gaz de synthèse est transformé en hydrocarbures liquides par un catalyseur composé de cobalt ou de fer. La réaction de Fischer-Tropsch libère de la chaleur, qui actionne les compresseurs d'oxygène nécessaires à l'obtention du gaz de synthèse. Les hydrocarbures formés dépendent de la température de réaction. Entre 330 et 350 °C, par exemple, on obtient principalement de l'essence et des oléfines (des hydrocarbures insaturés, souvent utilisés pour la synthèse des plastiques). À des températures inférieures (de 180 à 250 °C), on récupère surtout du gazole et des cires. Dans tous les cas, ces produits sont des mélanges qu'on doit raffiner pour obtenir des carburants utilisables. Toutefois, le raffinage est plus facile que celui du pétrole brut naturel : les mélanges contiennent très peu de soufre et beaucoup moins de composés cancérogènes que

le pétrole. Les produits finis sont des carburants de qualité, dont la combustion pollue moins que le gazole ou l'essence issus du pétrole.

### Une solution partielle

Malgré sa fiabilité, la méthode précédente consomme beaucoup d'énergie. Le reformage à la vapeur classique s'effectue à une pression environ 30 fois supérieure à la pression atmosphérique et à des températures d'environ 900 °C. De surcroît, la réaction consomme de l'énergie, que l'on produit en injectant dans le mélange une petite quantité d'oxygène, qui brûle une partie du méthane (et, avantage supplémentaire, produit davantage de gaz de synthèse) : on effectue ainsi ce que l'on nomme une «oxydation partielle».

La composition exacte du gaz de synthèse fabriqué dépend de la part de reformage à la vapeur et de la part de l'oxydation partielle. Dans la plupart des cas, la fabrication consomme de grandes quantités d'oxygène, lequel coûte cher. Aujourd'hui, on sépare l'oxygène de l'air en le liquéfiant, par des cycles de compression et de détente : c'est un procédé coûteux. Pour obtenir du gaz de synthèse meilleur marché, on doit chercher des moyens moins coûteux de produire l'oxygène.

Malgré cette difficulté, la technique d'oxydation partielle est promise à un bel avenir. Des chimistes de la Société *Syntroleum* ont récemment pro-

posé un procédé de production du gaz de synthèse où l'air est la source d'oxygène : on effectue le reformage à la vapeur à partir d'un mélange d'air et de méthane, puis on effectue une réaction de Fischer-Tropsch avec les produits formés. Sur les sites où le gaz naturel est suffisamment bon marché (par exemple, sur les sites où il est aujourd'hui brûlé), le procédé pourrait devenir rentable. Les Sociétés *Texaco*, *Brown & Root* et *Syntroleum* projettent de construire, d'ici à deux ans, une unité qui utilisera cette technique.

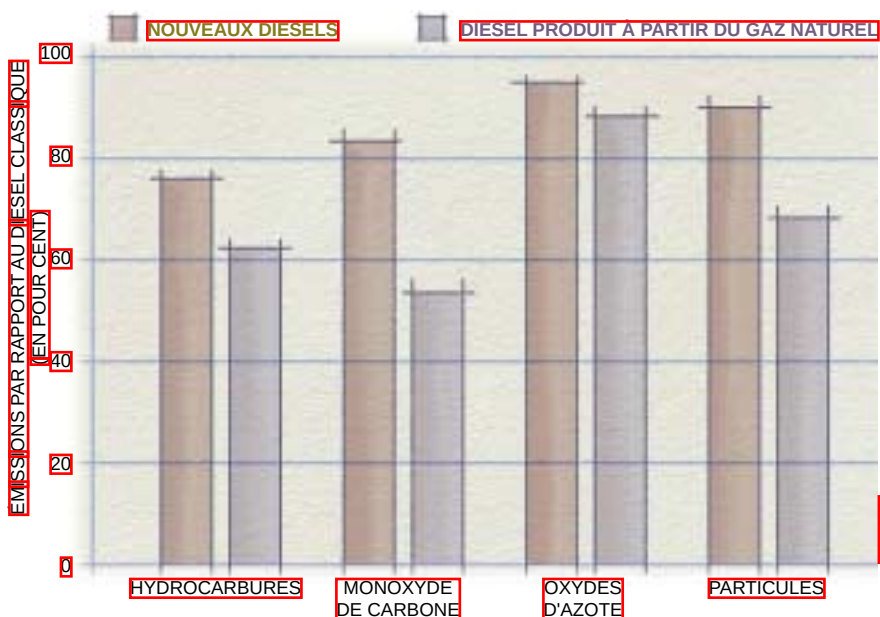
Plusieurs autres sociétés, ainsi que des laboratoires publics de recherche, testent aujourd'hui une approche radicalement différente, en utilisant des membranes céramiques spécifiquement perméables à l'oxygène : ces membranes se comportent comme des filtres, qui purifient l'air de son oxygène. Bien que d'une construction encore délicate et coûteuse, les prototypes fonctionnent parfaitement. Des unités à membrane devraient être opérationnelles dans une dizaine d'années.

Grâce à ces progrès, le coût de fabrication du gaz de synthèse pourrait être réduit de 25 pour cent environ ; le coût de production des hydrocarbures liquides formés à partir du gaz naturel serait alors réduit de 15 pour cent. D'autres économies sont possibles si l'on parvient à fabriquer le gaz de synthèse à des températures d'environ 200 °C seulement. Mieux encore, si l'on disposait d'oxygène abondant et bon marché, l'oxydation partielle permettrait d'obtenir du gaz de synthèse sans reformage à la vapeur ; la réaction dégagerait de l'énergie au lieu d'en consommer.

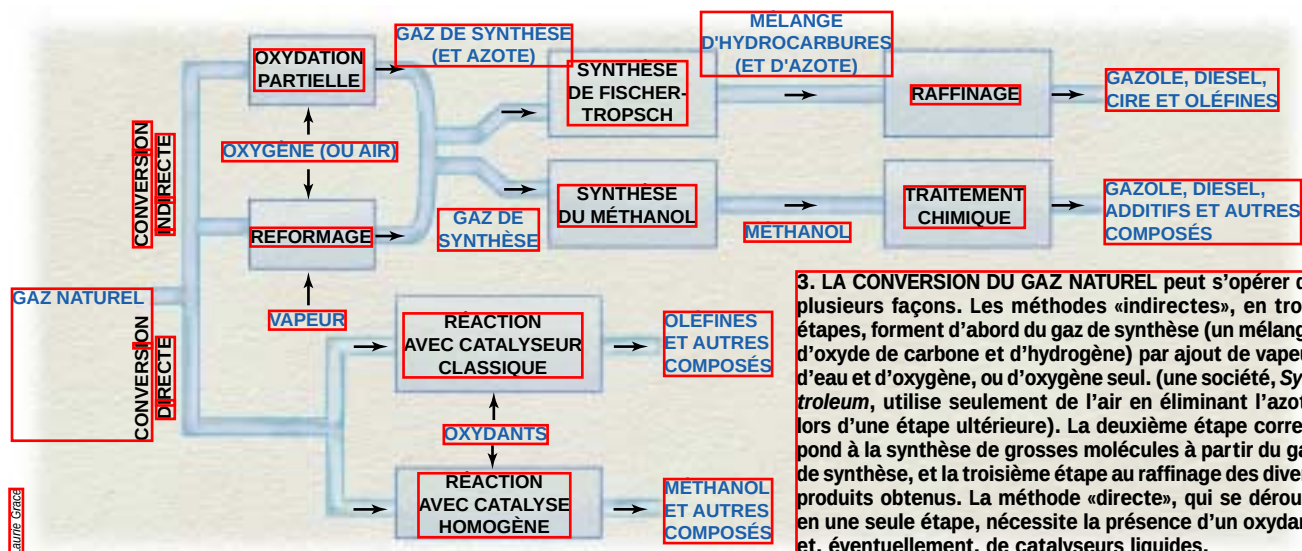
### Moins cher que le pétrole?

Avec mes collègues et des physico-chimistes de l'Université de Floride, nous tentons de mettre au point une membrane céramique qui éliminerait l'hydrogène du mélange gazeux tout en activant l'oxydation partielle du méthane. L'hydrogène éliminé servirait soit à raffiner les produits finis, soit comme source d'énergie.

De nouveaux catalyseurs devraient encore augmenter la rentabilité de la transformation du gaz naturel en hydrocarbures liquides. Notamment, des chercheurs de l'Université d'Oxford étudient des carbures métalliques, tandis que nous nous intéressons aux zéolites, des silicates à gros pores. Ces deux matériaux devraient réduire



**2. LES EMISSIONS DE POLLUANTS par les véhicules à moteur ont été réduites lorsque les législations ont imposé une reformulation du gazole. Le carburant de synthèse dérivé du gaz naturel par la méthode de Fischer et Tropsch est encore moins polluant que les nouveaux gazoles.**



3. LA CONVERSION DU GAZ NATUREL peut s'opérer de plusieurs façons. Les méthodes «indirectes», en trois étapes, forment d'abord du gaz de synthèse (un mélange d'oxyde de carbone et d'hydrogène) par ajout de vapeur d'eau et d'oxygène, ou d'oxygène seul. (une société, *Syntroleum*, utilise seulement de l'air en éliminant l'azote lors d'une étape ultérieure). La deuxième étape correspond à la synthèse de grosses molécules à partir du gaz de synthèse, et la troisième étape au raffinage des divers produits obtenus. La méthode «directe», qui se déroule en une seule étape, nécessite la présence d'un oxydant et, éventuellement, de catalyseurs liquides.

la quantité de suie produite lors du reformage à la vapeur : on évitera l'encrassement des réacteurs, ainsi que la contamination des catalyseurs.

Malgré les progrès réguliers de ces méthodes, des techniques plus ingénieuses devraient bientôt former des hydrocarbures liquides en une seule étape. Par ces techniques, le coût de la conversion serait divisé par deux, rendant les carburants liquides dérivés du gaz naturel moins chers que les produits similaires obtenus par raffinage du pétrole classique.

Les chimistes avaient été déçus par les premiers essais de conversion «directe», par l'emploi de catalyseurs et de grandes quantités d'oxygène : les hydrocarbures formés, plus réactifs que le méthane fourni, se consumaient plus vite qu'ils ne se créaient. À moins d'une extraction immédiate des hydrocarbures, les rendements étaient trop faibles pour que ce procédé soit appliqué industriellement.

Les chimistes ont contourné ce problème en effectuant la réaction à des températures relativement faibles, à l'aide de catalyseurs nouveaux, ou en stabilisant chimiquement les produits de réaction. À l'Université d'État de Pennsylvanie, par exemple, une équipe a directement transformé du méthane en méthanol, à l'aide d'un catalyseur «homogène», un fluide qui, aux températures inférieures à 100 °C, se mélange intimement aux réactifs. La Société *Catalytica* a obtenu des rendements de 70 pour cent par un procédé similaire ; son catalyseur liquide forme un intermédiaire stable, un ester de méthyle qui ne s'oxyde pas. Le produit final, un dérivé du méthanol, s'obtient

facilement lors d'une étape ultérieure. Le méthanol est intéressant, car c'est une molécule qui stocke efficacement l'énergie : il peut être consommé dans un moteur ou être ajouté à un carburant pour augmenter son indice d'octane (on évite que le moteur «cogne»). Si des difficultés techniques gênaient son utilisation en consommation directe, on pourrait le transformer en hydrogène gazeux, afin de l'utiliser dans des piles à combustible.

En outre, les réactions qui conduisent à la synthèse du méthanol peuvent être facilement adaptées à la production de nombreuses autres molécules énergétiques qui, tel le diméthyléther, polluent nettement moins que l'essence, lors de leur combustion. Jusqu'ici, le diméthyléther a été peu utilisé comme carburant automobile : aux températures et aux pressions ordinaires, il se présente à l'état gazeux. En revanche, ces derniers temps, les Sociétés *Air Products*, *Haldor Topsoe* et *Amoco* ont annoncé la synthèse d'un dérivé du diméthyléther qui reste liquide aux températures et aux pressions ordinaires ; ce substitut du gazole classique réduirait les émissions de polluants si l'on ajoutait aux moteurs classiques un système d'injection spécifique.

### Roulerons-nous bientôt au gaz?

Scientifiques et ingénieurs étudient aujourd'hui de nombreux autres moyens d'améliorer le procédé de conversion du gaz naturel. Par exemple, des Sociétés telles que *Exxon*, *Sasol*, ou l'Institut français du pétrole (IFP) perfectionnent les enceintes où s'opère la réaction de

Fischer-Tropsch afin de mieux contrôler la température et le mélange.

Une approche plus ambitieuse consiste à remplacer les catalyseurs par des bactéries qui transforment le méthane en méthanol, en présence d'oxygène. Ces fermentations, qui s'effectuent à basse température, sont prometteuses, parce qu'elles consomment peu d'énergie.

À ce jour, le gaz naturel transformé en carburant liquide coûte encore plus cher que le pétrole brut, mais les perfectionnements techniques modestes qui seront mis en œuvre dans les prochaines années pourront en faire des carburants remarquablement propres et qui, en se mélangeant facilement aux produits plus polluants dérivés des pétroles bruts plus lourds, se conformeront à une législation écologique de plus en plus stricte.

Safaa FOUADA est directeur de recherche au Centre de technologie énergétique de l'Ontario.

*Methane Conversion by Oxidative Processes : Fundamental and Engineering Aspects*, sous la direction de E.E. Wolf, Van Nostrand Reinhold, 1992.

J.M. FOX III, *The Different Catalytic Routes for Methane Valorization : An Assessment of Processes for Liquid Fuels*, in *Catalysis Reviews : Science and Engineering*, vol. 35, n° 2, pp. 169-212, août 1993.

Patrick CHAUMETTE, *Conversion chimique du gaz naturel*, in *Revue de l'Institut français du pétrole*, n° 51, pp. 711 et suivantes, septembre-octobre 1996.

Remote Gaz Strategies. Site Internet de la Société Zeus Development Corporation à l'adresse : <http://www.remotegasstrategies.com/>



# Les peintres et les anomalies de la vision

PHILIPPE LANTHONY

*Une œuvre picturale traduit parfois une anomalie visuelle. Toutefois, aucun diagnostic fiable ne saurait être posé par le seul examen d'une toile : souvent l'artiste utilise avec ingéniosité sa pathologie.*

Le peintre observe, le peintre interprète, le peintre retranscrit sa réalité. Comment réagit-il lorsque sa vision est anormale ou se dégrade ? Confronté à un déficit visuel, l'artiste met en œuvre les ressources de son imagination et de son savoir pour surmonter les handicaps de la maladie. La notoriété des peintres atteints d'une malvision légère ou grave, temporaire ou durable est inégale : certains sont célèbres, tels Edgar Degas, Edvard Munch ou Claude Monet, d'autres moins, tels Silvestro Lega et Charles Meryon.

La lésion, rapide ou progressive, se traduit par une anomalie de la vision des formes ou des couleurs, par un rétrécissement du champ visuel, voire par la cécité. Certains peintres répugnent à montrer leur œil malade, d'autres indiquent leur maladie par un pansement recouvrant l'œil malade sur leur autoportrait, d'autres encore figurent sur leurs œuvres les symptômes visuels subjectifs de leur maladie : Peter Mac Karell peint une tache noire à la place de son œil gauche sur ses autoportraits, Munch des taches indiquant que le corps vitré de son œil, la substance visqueuse normalement transparente emplissant le globe oculaire, perd sa transparence par endroits.

Certaines anomalies influent sur le style de l'artiste ou sur le choix de ses modèles. Une anomalie innée, le daltonisme, une anomalie acquise, la cataracte et des lésions rétinienne, modifient la vision des couleurs. Nous verrons comment Pissarro changea de sujet en raison de sa pathologie oculaire. Certains artistes s'adaptent,

d'autres renoncent à leur art. La reconversion, parfois dramatique, est parfois heureuse : Maillol abandonna la tapisserie et la peinture à regret pour se consacrer à la sculpture.

## Le daltonisme

En 1794, le chimiste John Dalton rapporte : « Je ne fus jamais convaincu d'une particularité dans ma vision, jusqu'à ce que j'observe fortuitement la couleur de la fleur *Geranium zonale* à la lueur d'une chandelle à l'automne 1792. La fleur était rose, mais elle m'apparaissait presque bleu ciel durant la journée ; à la chandelle, cependant, elle était étonnamment changée, [...], étant ce que je nommais rouge, couleur qui forme un contraste frappant avec le bleu. Ne doutant pas alors que ce changement fût le même pour tous, je demandais à quelques amis d'observer le phénomène ; mais je fus surpris de constater que tous s'accordaient à ne guère trouver de différence avec l'aspect en lumière du jour. À l'exception de mon frère qui voyait comme moi, ... »

La description de cette anomalie de la vision des couleurs, aujourd'hui nommée daltonisme, ne traduit pas toujours le monde perçu par les daltoniens, comme en témoigne l'analyse de l'œil de Dalton. Les ophtalmologistes qui avaient lu la description de Dalton s'accordaient sur le diagnostic : il était daltonien au rouge (le pigment qui absorbe les grandes longueurs d'onde manquait). Or, l'œil de Dalton avait été précieusement conservé à Manchester, de sorte que

des biologistes anglais l'ont récemment étudié : cette analyse a révélé qu'il était daltonien au vert (il lui manquait le pigment absorbant les longueurs d'onde moyennes). Sa perception des couleurs était toute différente de celle que l'on avait cru deviner par ses descriptions. Les mots n'avaient pas suffi à traduire cette différence.

Dès 1797, quelques années après la description de Dalton, Goethe s'intéresse aux conséquences du daltonisme sur la peinture : il fait effectuer par un daltonien des appariements colorés à l'aquarelle, il tente de reproduire les couleurs telles que les perçoivent les daltoniens et il peint lui-même un paysage d'après les indications d'un daltonien.

Les confusions de couleurs des daltoniens découlent de l'organisation de leur vision des couleurs, dont seules deux des trois composantes habituelles subsistent. Normalement, on voit « en trois couleurs », en bleu, en vert et en rouge. La rétine contient des cellules photoréceptrices, les cônes, subdivisées en trois sous-types : chacun d'eux est sensible à une bande de longueurs d'onde différentes. La vision normale en trois couleurs nous permet de percevoir environ 150 teintes dans le spectre. Les personnes à la vision correcte, dites trichromates, voient l'ensemble des couleurs de façon continue. Au contraire, les personnes daltoniennes n'ont que deux types de cônes dans la rétine, et ce dichromatisme réduit le spectre à trois teintes : le bleu, le jaune et une teinte intermédiaire perçue comme achromatique, blanche ou grise (voir l'encadré page 54).

On mesure les dilemmes auxquels sont confrontés les peintres daltoniens. En présence d'un modèle vert, ils hésitent entre trois teintes qui leur paraissent quasi identiques : le vert, la couleur réelle, le rouge pourpré, qu'ils ne discriminent pas du vert, et le gris, la couleur qu'ils perçoivent. En présence d'un orange, ils hésitent entre la vraie couleur orange, la couleur avec laquelle ils confondent l'orange, le jaune vert, et la couleur qu'ils perçoivent, le jaune pâle. Les lois des probabilités leur accordent une chance sur trois de choisir la bonne couleur !

Pour étudier les difficultés de discrimination des couleurs d'un daltonien, l'ophtalmologiste dispose de plusieurs méthodes : il lui fait recopier un tableau, observant ainsi directement les confusions faites par le peintre. Il peut aussi analyser les peintures réalisées par les daltoniens, et tenter d'y distinguer la part de l'anomalie chromatique et celle de l'interprétation artistique. L'examen de telles peintures révèle que les peintres font des choix systématiques grâce auxquels on les classe en trois groupes : d'après une étude réalisée en 1978 par l'ophtalmologiste allemand Wolfgang Münchow sur 561 peintres de Dresde, les artistes réalisant une peinture fondée sur les clartés, les «valeurs» du peintre, forment un premier groupe. La perception des valeurs du blanc au noir est normale chez les daltoniens. Dans le second groupe, les peintres utilisent les couleurs dont ils ne doutent pas, c'est-à-dire le jaune et le bleu. Il en résulte des toiles bicolores assez caractéristiques. Enfin, le troisième groupe utilise une tactique opposée aux prudentes méthodes précédentes : les peintres font un usage assez libre et arbitraire des couleurs.

Le daltonisme est une anomalie génétique due à une altération de l'un des types de cônes de la rétine, qui laisse intactes les autres fonctions visuelles.

**1. LES PEINTRES DALTONIENS confondent certaines couleurs, notamment le bleu et le pourpre, ce qui donne au ciel un aspect rosé crépusculaire, et le vert et le jaune, de sorte que le feuillage a un aspect automnal. Goethe s'est intéressé au daltonisme et a réalisé une aquarelle d'après les indications d'un daltonien (en haut). Sur le pastel intitulé *Le vaisseau fantôme*, de Meryon, le jaune et le bleu dominant (au milieu). Le paysage du peintre contemporain J.-J. (en bas) a une apparence automnale caractéristique des peintres daltoniens.**



Avant même la description de Dalton, on connaissait des personnalités atteintes d'une vision anormale des couleurs. Ainsi, c'était le cas du duc de Marlborough (1650-1722), général anglais qui inspira la chanson populaire *Malbrough s'en va-t-en guerre*, ou du poète français Charles Pierre Colardeau (1732-1776), qui se targuait de dessiner, mais se faisait aider pour colorer ses œuvres. Toutefois, aucun cas de

peintre daltonien célèbre n'a été décrit avant les publications de Dalton et de Goethe ; ce n'est qu'au XIX<sup>e</sup> siècle qu'on commença à en décrire quelques cas. L'artiste autrichien Joseph Achten (1822-1867) a dû se borner au dessin et aux gris à cause de son daltonisme.

Meryon (1821-1868) voulait être peintre, mais ses premiers essais à l'aquarelle lui révélèrent son anomalie chromatique. Il passa donc à la

gravure, où il devint maître. Un seul pastel, *Le vaisseau fantôme*, témoigne de son activité de peintre. Sa dominante bleu-jaune est cohérente avec un diagnostic de daltonisme. Un de ses amis, Philippe Burty, a décrit avec précision le daltonisme de Meryon : « Dans les rares peintures ou pastels de Monsieur Meryon que nous avons vus, nous avons cru remarquer que, s'il possède à un haut degré le sentiment des valeurs

## Ce que voient les daltoniens

**P**our comprendre les sensations chromatiques des daltoniens, classons les couleurs le long d'un cercle passant du rouge à l'orange, au jaune, au vert, au bleu et revenant au rouge par les pourpres. Chez une personne dont la vision est normale, cette suite est continue et ne présente aucune zone achromatique, blanche ou grise (*voir le disque de gauche*).

Chez un daltonien, l'ensemble des teintes est remplacé par deux teintes seulement : à la place des couleurs chaudes (orange, jaune, jaune-vert), il perçoit du jaune ; à la place des couleurs froides (bleu-vert, bleu, violet, pourpres), il perçoit du bleu. Une zone achromatique sépare les deux moitiés du cercle (*voir le disque de droite*). Il existe deux types de daltoniens : ceux pour qui la zone achromatique est située dans le rouge (de type protan), et ceux pour qui la zone achromatique est située dans le vert (de type deutan). Au voisinage de la zone achromatique, les teintes ont un aspect délavé, et leur coloration augmente à mesure que l'on s'éloigne de la zone achromatique.

Ces données éclairent les confusions faites par les daltoniens. Ainsi, un vert et un orange sont confondus par un daltonien de type protan, parce qu'ils sont tous deux perçus comme un jaune délavé. Quand on présente à cette personne un échantillon orange et qu'on lui demande de choisir une teinte équivalente,

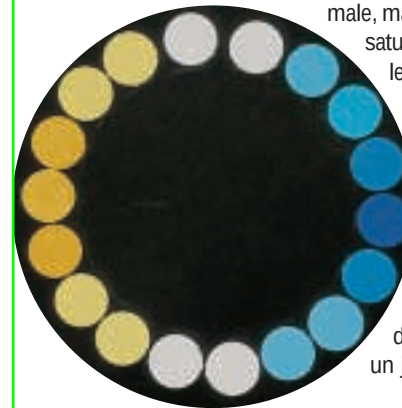


Répartition circulaire des couleurs chez une personne normale.

valente, il hésite entre l'orange (la teinte réelle), le vert avec lequel il confond l'orange (la teinte confondue) et un jaune délavé (la teinte perçue). Effectivement sur le disque de répartition des couleurs, orange et vert sont équivalents et perçus comme un jaune délavé. Quand ce daltonien doit trouver l'équivalent d'un échantillon rouge, il hésite entre le rouge (la teinte réelle), le bleu-vert (la teinte confondue), et le gris (la teinte perçue). Quand on dit que le daltonien confond le rouge et le vert (ou plus exactement le bleu-vert), cela ne signifie pas qu'il voit le rouge comme le vert ou l'inverse, mais qu'il voit les deux couleurs comme des gris, et donc qu'il les confond.

Toutefois, les daltoniens ne confondent jamais les teintes qu'ils perçoivent : le jaune, le bleu et le gris. De surcroît, la couleur est définie par trois attributs psychosensoriels : la teinte, la clarté (ou contrastes lumineux) et la saturation (le degré de coloration). Chez les daltoniens,

la discrimination des teintes est anormale, mais celle des clartés et des saturations est correcte, ce qui leur fournit un moyen de différencier les couleurs : soit par leur clarté (le jaune est plus clair que le violet), soit par leur saturation, qui augmente progressivement à partir de la zone achromatique. Ainsi, ils ne confondent pas un orange réel avec un jaune réel, car le premier ressemble à un jaune délavé et le second à un jaune vif.



Répartition circulaire des couleurs chez une personne daltonienne.



Une personne dont la vision est normale a réalisé une copie du tableau *Ta Matété* de Gauguin (a). Le même tableau a été également recopié par un daltonien (b) qui utilisait ses couleurs « perçues » : les couleurs chaudes sont rendues par du jaune quand elles sont claires et par du brun quand elles sont foncées ; les couleurs froides sont rendues par du bleu. Le rouge et le bleu-vert



sont perçus achromatiques et sont rendus par des nuances de gris. L'ensemble du tableau est assez uniforme. Le tableau de droite (c) a aussi été réalisé par une personne daltonienne qui a utilisé les couleurs « confondues », c'est-à-dire celles qui sur le cercle des couleurs ci-dessus sont équivalentes : le rouge et le bleu-vert, l'orange et le vert.



relatives d'ombre et de lumière, ses yeux ne paraissent pas toujours affectés par les valeurs des tons colorants. Il ne peut distinguer les fraises mûres des feuilles. Sur sa palette, il utilise le rouge pour le jaune, le rose pour le vert, tandis qu'il distingue d'autres couleurs comme pur carmin, or, cobalt, lapis-lazuli avec une extrême délicatesse.»

Pourquoi ne trouve-t-on pas de daltoniens dans l'histoire de l'art classique? Quand la peinture était une stricte représentation d'un modèle, les couleurs devaient être conformes à la réalité. Le daltonien, gêné, optait pour une autre forme d'art, la gravure par exemple, tel Meryon. Comme le daltonisme touche huit pour cent de la population, Meryon ne fut sans doute pas le seul peintre daltonien, et tel graveur ou sculpteur, né dans une famille de peintres, mais qui ne peignit jamais, était peut-être daltonien. Au contraire, dans la peinture moderne, qui a renoncé à l'imitation méticuleuse du modèle, on dénombre plusieurs peintres daltoniens. L'Américain Paulanship (1885-1965) passa de la peinture à la sculpture, mais d'autres, tel Georges Einbeck (1871-1951), restèrent peintres.

Si le daltonisme fausse la vision des couleurs, toute anomalie d'un des constituants de l'appareil visuel risque de perturber la vision des couleurs, mais aussi celle des formes, des détails ou des contrastes. En peinture, ces divers troubles influent sur la réalisation du tableau dont l'aspect varie en fonction de la pathologie.

## La cataracte

La plus commune de ces pathologies est la cataracte dite «nucléaire». Le noyau du cristallin s'opacifie et jaunit. Le cristallin jaune se comporte comme un filtre, situé dans l'œil et absorbant les courtes longueurs d'onde du spectre de la lumière visible. Le mélange des couleurs qui se produit aboutit à un jaunissement apparent des verts et à une mauvaise perception des violets et des bleus.

La cataracte a souvent été invoquée pour expliquer les variations de la palette des peintres âgés, mais, en toute rigueur, on ne peut l'affirmer que pour les peintres opérés. L'extraction du cristallin cataracté fut pratiquée pour la première fois en avril 1745, par le chirurgien français Jacques Daviel (1693-1762), et le premier artiste à en bénéficier



RMN - Musée d'Orsay - Paris 1998



RMN - Musée d'Orsay - Paris 1998

2. CLAUDE MONET a peint *Le bassin aux nymphéas* (en haut) en 1899. Ce tableau, peint avant que n'apparaisse la cataracte du peintre, a une dominante froide. Au contraire, *Le pont japonais* représente la même vue, peinte en 1922 ; elle a une dominante jaune et des formes imprécises qui indiquent que la cataracte a évolué et que le peintre voit désormais la nature avec un filtre jaune dans l'œil.

fut François Devosge (1732-1811) qui, après son opération, fonda l'école des Beaux Arts de Dijon. D'autres peintres ont été opérés : Antonio Verrio (1639-1707), Rosalba Carriera (1675-1757), Honoré Daumier (1808-1879), Claude Monet (1840-1926) et plusieurs contemporains, tels Jean Hélon (1904-1987) ou Jean Bazaine, né en 1904. On peut suivre l'évolution des troubles de la vision des couleurs chez Monet, car l'artiste aimait peindre des séries d'un même motif. Ainsi, il a peint plus de 20 fois le *Pont japonais*, à Giverny ; ces tableaux révèlent l'accentuation du jaunissement et la dégradation des formes.

Un cristallin cataracté agit comme un filtre dont la densité croît avec le temps. L'évolution de la cataracte modifie la vision des formes et des couleurs de façon progressive, de sorte que le peintre s'y habitue. L'opération modifie la vision de façon brutale, restituant une bonne acuité visuelle, mais entraînant un bouleversement de la perception spatiale, lumineuse et colorée.

Chez Monet, l'opération de la cataracte supprime brusquement le filtre jaune qu'il avait dans l'œil : il perçoit à nouveau les courtes longueurs d'onde (les bleus), même mieux qu'avant sa cataracte, car l'opération a supprimé non seulement le filtre pathologique, mais aussi le filtre normal que constitue le cristallin. La perception des bleus est exacerbée. Les tableaux peints par Monet après son opération l'illustrent bien : ils ont une dominante bleue qui contraste avec la teinte des tableaux qu'il a peints avec son cristallin cataracté.

Les grandes décorations exposées aujourd'hui à l'Orangerie illustrent l'ingéniosité de l'artiste qui surmonte ses déficits visuels : à mesure que progressait sa cataracte, il distingue moins bien les détails : il peint plus grand ; il perçoit mal les différences de clarté : il augmente le contraste lumineux ; il ne voit plus les teintes froides, il les applique en suivant son intuition ; il ne voit plus le relief, il fait une peinture plate.

## Les maladies de la rétine

Les maladies de la rétine perturbent aussi la vision des peintres. Quand elles lèsent une des trois catégories de cônes, les modifications résultantes de la vision des couleurs influent sur la palette des artistes qui ont ce type de dégénérescence. Ce fut le cas de Degas (1834-1917), de l'Italien Lega (1826-1895) ou de l'impressionniste anglais Philip Steer (1860-1942).

Même si Degas est classé parmi les impressionnistes, il n'a pas montré beaucoup de goût pour la peinture des paysages, mais une prédilection pour les sujets d'intérieur. Il souffrait de photophobie, c'est-à-dire qu'il ne supportait pas la lumière violente. L'évolution du dessin de Degas est liée à la baisse visuelle de l'artiste. Pour ses dessins, il utilise d'abord la mine de crayon, mais les lignes ainsi tracées finissent par être trop pâles. Il utilise alors des crayons gras, puis des fusains. Cette évolution reflète une

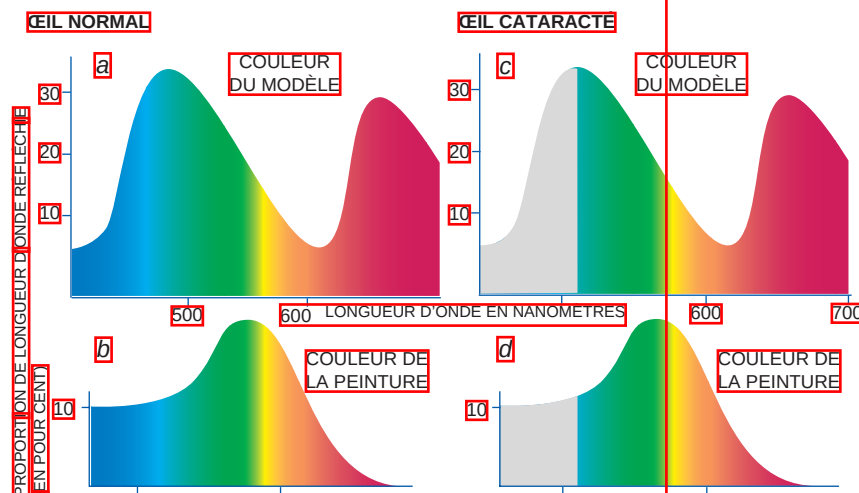
## Cataracte et métamérisme

Le cristallin se comporte comme un filtre. Chez les personnes âgées, il perd sa transparence et jaunit. A mesure que la cataracte, c'est-à-dire l'opacification du cristallin, s'intensifie, l'adaptation chromatique compense l'anomalie : tout se passe comme si la personne atteinte changeait de blanc de référence. Puisque le peintre voit le tableau et le modèle à travers le même filtre jaune de son cristallin, les couleurs du tableau sont-elles celles

de la réalité ? Non, en raison du métamérisme, phénomène qui explique pourquoi un peintre ayant une cataracte choisit sur sa palette une couleur plus jaune que celle que choisirait un peintre n'ayant pas cette anomalie de la vision.

Le métamérisme est le phénomène selon lequel deux couleurs de compositions spectrales différentes semblent identiques dans certaines conditions. Un peintre qui recopie fidèlement les couleurs d'un modèle égalise l'aspect des couleurs naturelles et des couleurs de sa palette. Les compositions chimiques des substances constituant ces deux sortes de couleurs diffèrent notablement. Les courbes de réflexion spectrale diffèrent aussi, et pourtant l'apparence visuelle est semblable (la couleur d'un objet est la résultante des couleurs réfléchies). Dans l'exemple ci-contre l'objet est vert, bien que son spectre fasse apparaître deux maxima. Le pigment est vert également, mais il est beaucoup plus monochromatique.

L'égalité d'aspect disparaît parfois quand les conditions d'observation du tableau changent : par exemple quand on modifie l'éclairage ou que le peintre a une cataracte. La présence d'un filtre jaune dans l'œil rompt l'égalisation métamérique normale : quand un peintre ayant une cataracte reproduit une couleur verte, la teinte que choisirait un peintre sans cataracte lui paraît trop verte, et pour rétablir l'égalité d'aspect, il utilise une peinture plus jaune. Parce que le cristallin cataracté est jaune, les tableaux exécutés par des artistes ayant une cataracte ont aussi une dominante trop jaune.



La composition spectrale d'un modèle vert (a) diffère de celle de la copie peinte (b). Pourtant, les deux couleurs semblent identiques à l'observateur. Quand le cristallin vieillit et jaunit, il absorbe les rayonnements de longueur d'onde inférieure à 510 nanomètres : le spectre est amputé de sa partie gauche. La composante froide (les bleus) du modèle (c) est éliminée. L'aspect coloré du modèle est déterminé par la partie chaude restante, et le modèle n'apparaît plus vert, mais jaune-brunâtre. En revanche, la teinte de la peinture (d) est moins modifiée par le filtre jaune : elle glisse vers les teintes chaudes, mais moins que le modèle, de sorte qu'elle apparaît vert-jaunâtre. La teinte de la peinture paraît au peintre trop verte par rapport au modèle. Pour rétablir l'égalité d'aspect, il utilise une peinture enrichie en composantes plus chaudes, notamment en jaune.



3. DEGAS (*Danseuses bleues*, à gauche) modifie son style à mesure que sa vue baisse. Parfois, il abandonne le pinceau, et applique la peinture au doigt, ce qui donne un aspect moucheté à certains de ses tableaux (la partie supérieure gauche du tableau). Pissarro (ci-dessus) a été contraint d'adapter ses sujets à sa pathologie oculaire. Souffrant d'une inflammation exacerbée par le vent et le froid, il peignait d'une chambre d'hôtel : ici, l'avenue de l'Opéra vue d'une fenêtre donnant sur la place du Théâtre Français.

baisse de la sensibilité aux contrastes. De surcroît, si plusieurs de ses tableaux de jeunesse sont exécutés à l'huile par des techniques classiques, il abandonne le pinceau pour ses œuvres tardives et utilise le doigt pour appliquer la peinture, ce qui donne leur aspect moucheté à certains tableaux.

Nous avons examiné le peintre contemporain M. H., atteint d'une dégénérescence globale de la rétine : sa vision des couleurs se limitait au bleu-vert et au jaune. Les lésions des voies optiques causent des troubles notables du sens chromatique. Les neurologues anglais Robert Hess et Gordon Plant ont publié en 1986 l'auto-observation du peintre Peter Mac Karel, victime d'une névrite optique aiguë de l'œil droit (une lésion inflammatoire du nerf optique). Au cours de sa maladie, cet artiste entreprit de peindre de façon comparative ce qu'il voyait de chaque œil. La séquence des tableaux réalisés montre la différence de perception des couleurs entre les deux yeux. Enfin, citons le cas du peintre américain non figuratif Jonathan I., devenu achromate à la suite d'un traumatisme crânien apparemment mineur.

Nous donnerons un dernier exemple de l'influence des pathologies oculaires sur les tableaux, celui de Camille Pissarro, dont les voies lacrymales étaient obstruées. Pour chaque œil, le canal lacrymal, situé à l'extrémité interne de la paupière, sert à l'évacuation

des larmes, sécrétées en permanence pour humidifier la surface de l'œil. Le canal débouche dans le sac lacrymal, et un orifice situé à la partie inférieure de ce sac permet l'élimination des larmes par la fosse nasale. Quand les voies lacrymales sont obstruées (par exemple à la suite d'une inflammation nasale), l'œil larmoie, le sac lacrymal gonfle et tend à s'infecter. Un abcès douloureux apparaît parfois. En l'absence de traitement efficace, l'inflammation devient chronique. C'est ce qui arriva à Pissarro.

### Obstruction des voies lacrymales

En dehors des poussées aiguës, l'obstruction des voies lacrymales entraînait un larmoiement constant, exacerbé par le vent et le froid. Son médecin lui recommandait de protéger son œil par un bandeau quand il sortait et le força même à rester chez lui lors des poussées inflammatoires. Pissarro, le peintre de la lumière et des paysages, fut contraint de trouver d'autres sujets à peindre chez lui : il ne choisit pas les natures mortes, mais les vues urbaines, des scènes qu'il peignait d'en haut, d'une fenêtre d'hôtel : Hôtel Garnier pour peindre la façade de la gare Saint-Lazare, hôtel de Russie pour les grands boulevards, hôtel du Louvre pour l'avenue de l'Opéra. Il loua même un appartement rue de Rivoli

pour peindre les Tuileries ou place Dauphine pour le Pont-Neuf.

L'étude des pathologies oculaires des peintres ne doit pas seulement se limiter à la constatation de l'effet immédiat de la maladie sur la vision de l'artiste. Si l'on s'en contentait, on manquerait la plus belle partie de l'histoire, celle qui rend fascinante l'étude des maladies des yeux des peintres : la façon dont l'artiste réagit à son handicap visuel. L'artiste talentueux sait explorer des voies nouvelles qu'il aurait sans doute négligées s'il n'avait pas été confronté à sa pathologie oculaire.

Philippe LANTHONY est ophtalmologiste au Laboratoire de la vision des couleurs, au Centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts, à Paris.

R. PICKFORD, *Psychology and Visual Aesthetics*, Éditions Hutchinson, 1972.

RF. HESS, GT. PLANT, *Optic neuritis*, Cambridge University Press, 1986.

P. TREVOR-ROPER, *The World through Blunted Sight*, Éditions Penguin, 1988.

O. SACHS, *Un anthropologue sur Mars*, Éditions du Seuil, 1996.

C. DICKINSON, I. MURAY, D. CARDEN, *John Dalton's Colour Vision Legacy*, Éditions Taylor & Francis, Londres, 1997.

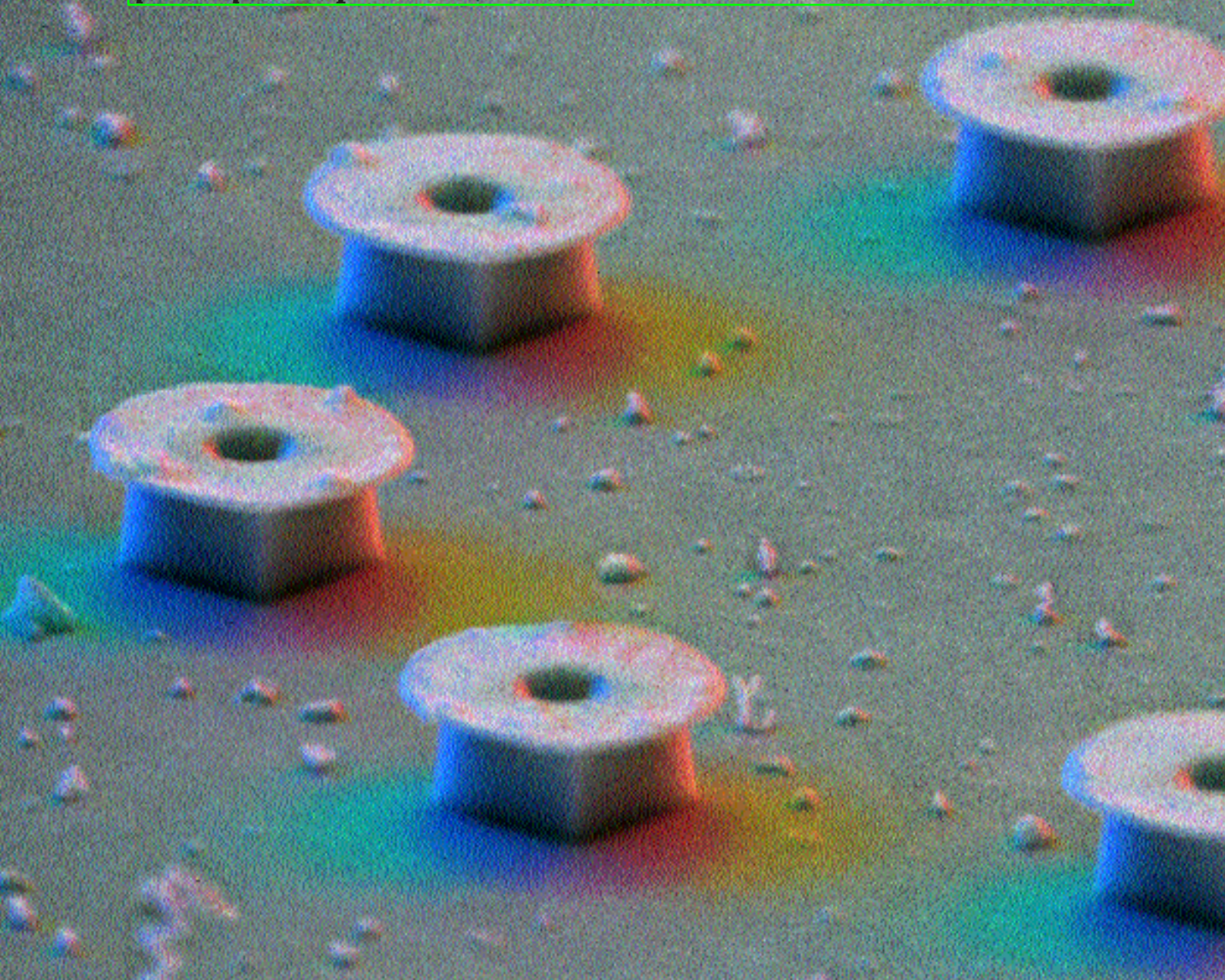
M. MARMOR, J. RAVIN, *The Eye of the Artist*, Éditions Mosby, 1997.



# Les nanolasers

PAUL GOURLEY

*Les lasers à semi-conducteur sont devenus plus petits que la longueur d'onde de la lumière qu'ils émettent. À ces tailles, le comportement quantique des photons améliore le rendement.*



1. CHACUN DE CES MICRODISQUES LASER a un diamètre de quelques micromètres et une épaisseur d'une fraction de micromètre. Ils sont en matériau semi-conducteur et soutenus par un pied. La lumière produite dans le disque se propage le long de sa circonférence avant de s'échapper radialement, comme le montre la figure d'interférence calculée (en bas, à droite). Les dépressions, au centre des disques, et les minuscules protubérances sont d'inévitables conséquences du procédé de gravure chimique utilisé pour fabriquer ces structures.

**D**epuis l'invention du transistor, à la fin des années 1940, la taille des composants micro-électroniques n'a cessé de diminuer, atteignant aujourd'hui quelques dixièmes de micromètres. Les puces sont devenues de plus en plus complexes, de plus en plus rapides, et la puissance de calcul des ordinateurs a augmenté.

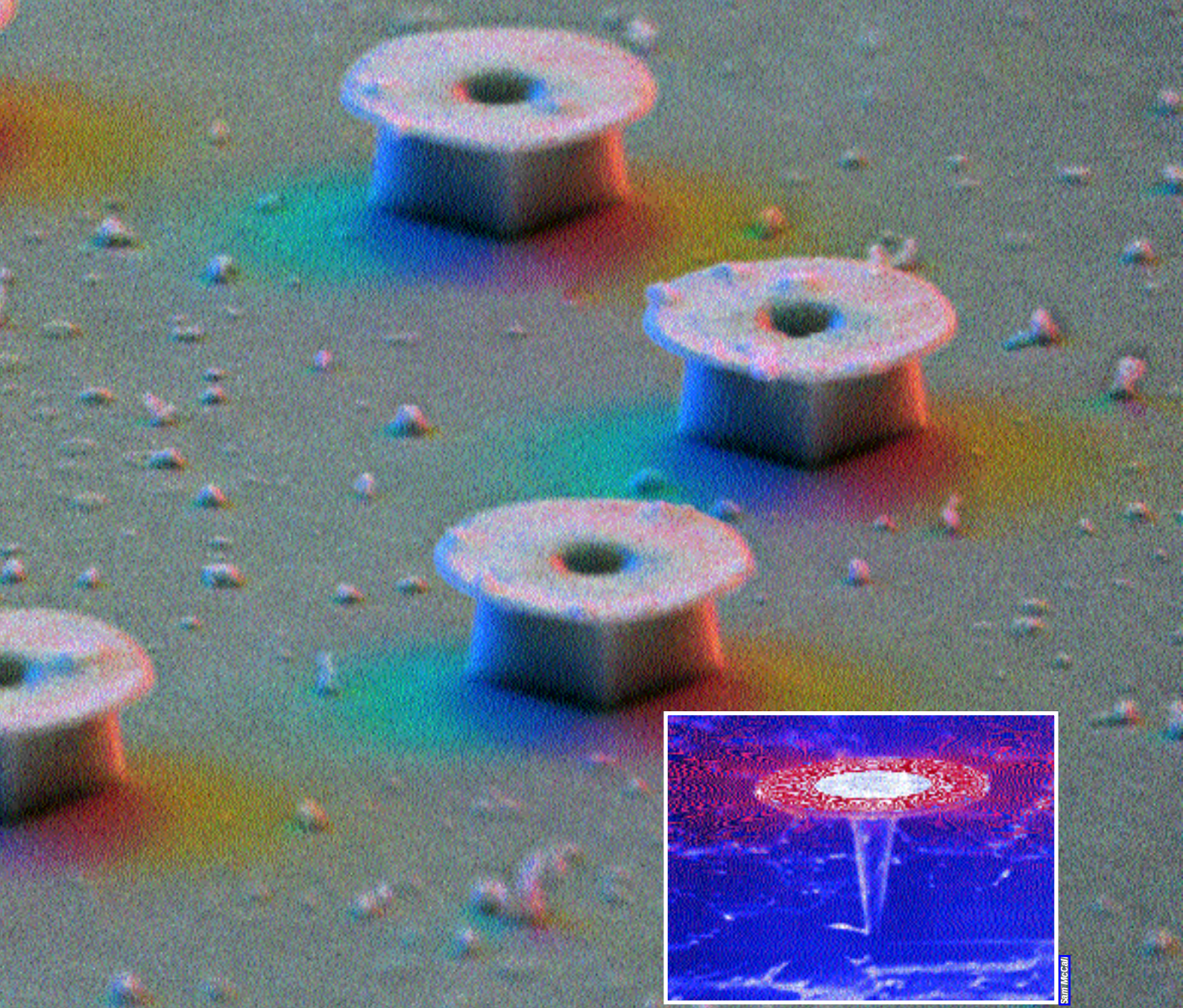
Les lasers à semi-conducteur se miniaturisent également : leurs dimensions atteindront bientôt un nanomètre (un milliardième de mètre), c'est-à-dire moins que la longueur d'onde de la lumière qu'ils émettent. À cette échelle, les électrons et les photons ont de

curieux comportements, qui sont la clef de composants plus efficaces et plus rapides.

Des microlasers sont déjà utilisés pour la transmission d'informations à travers les fibres optiques. Avec des collègues, nous explorons leur application au diagnostic médical.

Le principe de base des lasers à semi-conducteur est le même que celui de leur premier ancêtre, mis au point il y a 35 ans avec un barreau de rubis. Un matériau excitable, un cristal semi-conducteur, est placé entre deux miroirs parallèles. Dans un semi-conducteur, les valeurs possibles pour l'énergie des électrons sont regroupées en deux inter-

valles étroites et bien séparées, les «bandes électroniques». Lorsqu'on excite le semi-conducteur à l'aide de lumière ou d'électricité, ses électrons passent de la bande de plus faible énergie à la bande de plus grande énergie. Les électrons ainsi excités reviennent dans la bande de plus faible énergie en émettant spontanément un photon dont l'énergie est égale, ou légèrement supérieure, à la différence d'énergie entre les bandes électroniques. Les photons qui se propagent perpendiculairement aux miroirs sont réfléchis par ceux-ci et font des aller et retour dans le matériau excité. Ils interagissent alors avec les électrons excités et provoquent



Sam McCull

l'émission de photons identiques (ce mécanisme, l'émission stimulée, a donné son nom au «laser», acronyme anglais d'«amplification lumineuse par émission stimulée»). L'onde lumineuse correspondant à tous ces photons (que l'on nomme le «mode laser») est ainsi amplifiée, et une petite partie de la lumière sort à travers l'un des miroirs (dont la réflectivité n'est pas totale) sous la forme d'un fin faisceau.

Toutefois, tous les photons ne sont pas émis dans le mode laser. Beaucoup sont émis spontanément, indépendamment des autres, à d'autres longueurs d'onde; ils diffusent dans toutes les directions, heurtant les parois du laser, qu'ils échauffent, au lieu de rebondir entre les miroirs. Dans un laser de lecteur de disques compacts, par exemple, un photon émis spontanément sur 10 000 seulement est utile.

En raison de ces pertes, il existe un courant minimum, nommé «courant de seuil», au-dessous duquel on n'excite pas assez d'électrons pour obtenir une émission stimulée. De la même façon, lorsqu'on veut faire bouillir de l'eau dans une casserole, on adapte la taille de la flamme à celle de la casserole : si la flamme est trop petite, les pertes de chaleur empêchent d'atteindre l'ébullition ou la retardent beaucoup.

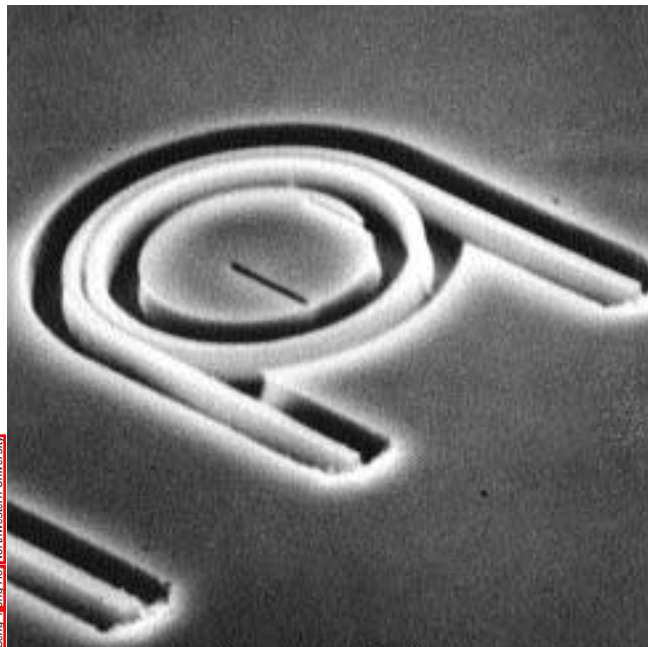
Des lasers pourraient-ils avoir un courant de seuil nul? Ils consommeraient très peu d'énergie (un peu comme si l'on faisait bouillir de l'eau dans un récipient spécial que l'on ne chaufferait qu'avec une allumette). Dans un tel composant, proposé par Yoshihisa Yamamoto, des Laboratoires NTT, et Takoshi Kobayashi, de l'Université d'Osaka, tous les photons, même ceux émis spontanément, le seraient dans le mode laser. À quoi ressemblerait-il? Nous ne sommes certains que d'une chose : il sera très petit, ses dimensions étant de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière émise dans toutes les directions, afin de tirer avantage du comportement quantique des photons.

Les premiers jalons vers un laser sans seuil d'amorçage ont été posés à la fin des années 1970, lorsque Kenichi Iga et ses collègues de l'Institut de technologie de Tokyo ont mis au point des «microlasers» dont les dimensions sont de l'ordre du micromètre et qui diffèrent sur plusieurs points des diodes laser semi-conductrices utilisées dans les lecteurs de disques compacts. Les diodes laser sont des parallélépipèdes découpés dans une plaque de semi-conducteur et qui émettent leur lumière perpendiculairement aux faces coupées. Plus petits et cylin-

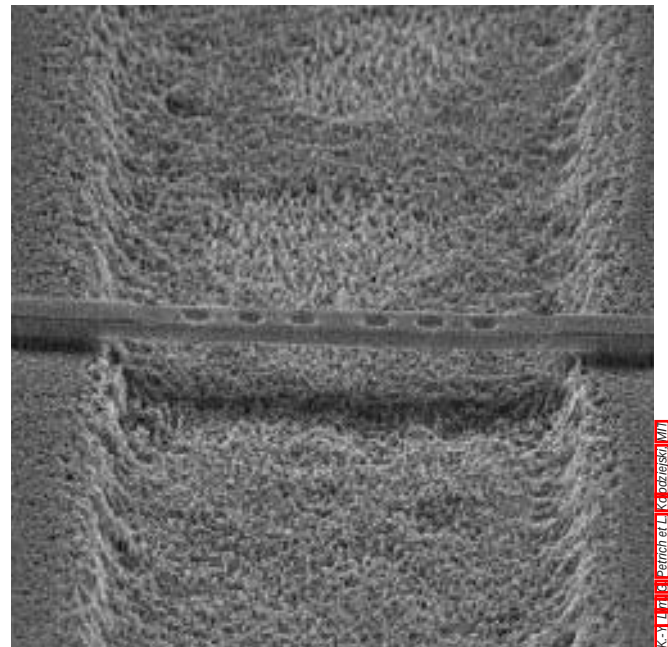
driques, les microlasers émettent des faisceaux lumineux parfaitement circulaires, perpendiculairement aux disques de matériaux semi-conducteurs dont ils sont formés. Ils peuvent être simultanément fabriqués et testés en grand nombre, car ils sont disposés en rangées sur une même plaquette de semi-conducteur, comme les puces électroniques.

Les miroirs des microlasers sont formés de couches alternées de matériaux semi-conducteurs aux indices de réfraction différents, tels l'arséniure de gallium et l'arséniure d'aluminium : à l'interface des deux milieux, une partie de la lumière est réfléchie, comme sur une fenêtre transparente dont le verre a un indice de réfraction supérieur à celui de l'air. Lorsque les couches sont épaisses d'un quart de longueur d'onde exactement, les réflexions partielles successives se renforcent mutuellement. Dans le cas d'une alternance d'arséniure de gallium et d'arséniure d'aluminium, une douzaine de couches réfléchit 99 pour cent de la lumière (plus que les miroirs métallisés de nos salles de bains).

En réduisant encore la taille des microlasers, on améliore le rendement de conversion, grâce au comportement quantique des photons. Lorsque l'épaisseur du laser est inférieure à la



2. CE MICRO-ANNEAU LASER semi-conducteur gravé qui émet de la lumière dans toutes les directions du plan est entouré d'une structure semi-conductrice en forme de U, qui guide la lumière hors du dispositif en deux faisceaux parallèles le long de ses branches. Le laser proprement dit est un tore semi-conducteur, dont la section rectangulaire mesure 0,4 sur 0,2 micromètres.

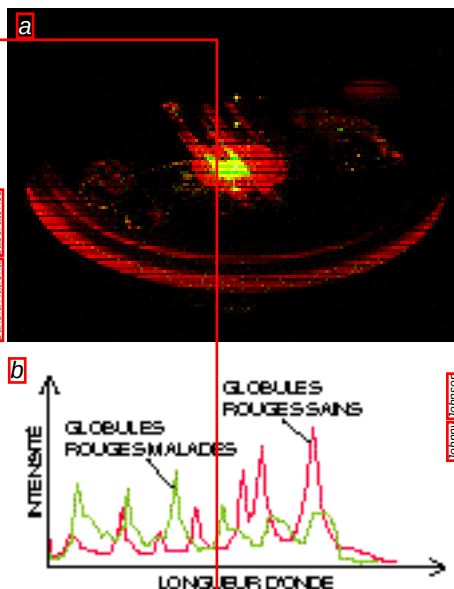


3. LA LUMIÈRE qui se propage dans ce pont semi-conducteur est bloquée par le «réseau» unidimensionnel de trous percés dans sa longueur. En espaçant les deux trous les plus proches du centre du pont, on crée une «boîte» d'un vingtième de micromètre cube de volume, où une émission laser pourrait s'établir, le réseau de trous remplaçant les miroirs d'un laser classique.

## Des biocavités laser pour détecter les maladies

**P**lus les lasers semi-conducteurs seront rapides et efficaces, plus ils auront d'applications. Avec mes collègues des Laboratoires *Sandia*, nous les utilisons pour le diagnostic médical : nous avons mis au point une «biocavité laser» (a) qui permet, par exemple, de distinguer des cellules cancéreuses d'avec des cellules saines.

Le dispositif est un microlaser, minuscule morceau d'arséniure de gallium entouré de deux miroirs, qui émet un rayonnement infrarouge. Ce rayonnement est réfléchi par les miroirs et amplifié jusqu'à ce qu'il sorte sous la forme d'un faisceau laser fin. Lorsqu'on interpose une mince couche de tissu humain entre l'arséniure de gallium et l'un des miroirs, le tissu se comporte comme une lentille interne qui focalise la lumière : les cellules modifient le faisceau laser en introduisant des harmoniques, dont la signature spectrale est caractéristique de la taille, de la forme ou de la composition cellulaires. Les médecins peuvent utiliser cette information pour différencier les tissus malades d'avec les tissus sains, car ils détectent en sortie de laser des spectres lumineux différents (b), comme un piccolo et une flûte qui jouent la même note peuvent être distingués par leurs spectres d'harmoniques différents.



Nous avons breveté une version portable de cette biocavité laser, afin que les médecins n'aient plus à envoyer des échantillons aux laboratoires pour obtenir des analyses. Dans ce dispositif, le sang circule dans de minuscules rainures dont la largeur est à peine le dixième de l'épaisseur d'un cheveu, gravées dans l'un des miroirs. En analysant le faisceau laser résultant, le dispositif détecte rapidement la présence de globules rouges en forme de croissant, caractéristiques de l'anémie falciforme. Les médecins peuvent aussi utiliser le laser pour étudier les modifications de la structure des cellules du sang causées par le virus du SIDA ou dépister des cellules cancéreuses dans des prélèvements du col de l'utérus. Des perfectionnements permettront l'analyse d'ADN.

Les méthodes classiques d'analyse des tissus requièrent une coloration chimique pour rendre visible la structure des cellules lors de l'examen au microscope en laboratoire ; les lames sont parfois difficiles à examiner. Les biocavités laser produisent directement des spectres simples qu'un dispositif portable peut analyser presque instantanément et n'importe où.

longueur d'onde de la lumière émise, l'énergie des photons ne peut prendre que des valeurs particulières. Les grands lasers émettent des photons de plusieurs longueurs d'onde, comme une longue corde de guitare que l'on pince produit un son constitué d'une fréquence fondamentale et de plusieurs harmoniques, multiples de la fréquence fondamentale. Plus la corde de guitare est courte, plus la note fondamentale est aiguë et plus le nombre d'harmoniques est petit, jusqu'à une limite fixée par l'épaisseur et la nature du matériau de la corde. De même, lorsqu'on réduit la taille des lasers, on réduit aussi le nombre de modes possibles pour les photons. La plus petite dimension pour laquelle les photons continuent de rebondir entre les miroirs est la demi-longueur d'onde du mode laser. Si les photons sont confinés dans ce petit espace dans les trois dimensions, seul le mode laser peut alors exister, et aucun photon n'est gaspillé : le laser n'a pas de seuil d'amorçage.

Il y a une dizaine d'années, avec des collègues des Laboratoires *Sandia*, nous avons ainsi réduit le spectre d'émission d'un microlaser à quelques modes seulement, en rapprochant les miroirs situés à ses extrémités. Toute-

fois, nos systèmes, et même les plus perfectionnés des nanolasers actuels, n'ont pas un courant de seuil nul : une centaine de modes sont encore possibles, bien moins que les dizaines de milliers des diodes laser, mais trop pour supprimer toutes les pertes.

Comment améliorer encore les nanolasers ? Richard Slusher et ses collègues des Laboratoires *Bell* ont fabriqué des microdisques laser. Avec des techniques de micro-électronique, ils ont découpé un disque de quelques micromètres de diamètre et de seulement 100 nanomètres d'épaisseur. Ce disque semi-conducteur est entouré d'air et monté sur un minuscule support, ce qui donne à l'ensemble l'aspect d'une table microscopique. La petite taille du disque limite le nombre de modes optiques possibles.

Comme le semi-conducteur et l'air ont des indices de réfraction très différents, la lumière émise dans le disque se réfléchit à l'intérieur de la structure, par un phénomène similaire à celui qui permet d'entendre des paroles chuchotées à l'autre extrémité d'une pièce voûtée : les vibrations sonores se réfléchissent sur les murs et se renforcent mutuellement. Chaque photon fait ainsi un grand nombre de

tours dans le disque avant de s'échapper, et il stimule l'émission de beaucoup d'autres photons. Ces lasers ont un très bon rendement, et un courant de seuil très petit.

Une variante du microdisque est le micro-anneau laser, où les photons circulent. Seng-Tiong Ho et ses collègues de l'Université Northwestern ont sculpté un tel anneau d'un diamètre de 4,5 micromètres et dont la section, rectangulaire, ne mesure que 0,4 par 0,2 micromètres. Pour collecter la lumière émise, ils ont entouré le micro-anneau d'un guide en forme de U, dont les branches guident les photons en deux faisceaux parallèles.

Une autre voie de recherche pour l'amélioration des nanolasers concerne le remplacement des miroirs par des réseaux dont la disposition réduit le nombre de modes optiques du composant. Au début des années 1900, William Henry Bragg et son fils William Lawrence Bragg, physiciens anglais qui se partagèrent le prix Nobel en 1915, étudièrent la réflexion des rayons X par la structure périodique d'un réseau cristallin. Selon la «loi de réflexion de Bragg», l'intensité du rayonnement réfléchi dépend de la longueur d'onde des rayons X, de l'espacement des

## Des diodes électroluminescentes plus rapides et plus efficaces

Les composants opto-électroniques émetteurs de lumière, lasers et diodes électroluminescentes, sont formés d'un matériau semi-conducteur au sein duquel des électrons, excités par un courant électrique, se dés excitent en émettant chacun un photon. L'introduction de microcavités optiques dans ces composants permet de tirer un meilleur parti des photons émis spontanément. Dans les lasers, le courant de seuil, courant d'excitation minimum nécessaire à l'obtention de l'effet laser, a ainsi été divisé par cent ; le rendement de conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse des diodes électroluminescentes a été multiplié par dix.

Fabriqués industriellement depuis 1994, les microlasers à cavité verticale sont aujourd'hui commercialisés par plusieurs sociétés. Ces composants présentent l'avantage sur les diodes laser classiques, utilisées par exemple dans les lecteurs de disques compacts, d'émettre un faisceau laser circulaire dans une direction bien définie : leur raccordement à une fibre optique est plus facile. On peut aussi les fabriquer et les tester en grand nombre simultanément, ce qui réduit considérablement les coûts de production et de montage (les coûts du test et du montage en boîtier d'une diode laser entrent pour 80 pour cent dans le coût total).

Leurs performances sont bien adaptées aux besoins de transmission à haut débit entre serveurs informatiques ou entre processeurs au sein d'ordinateurs massivement parallèles. On commercialise aujourd'hui des câbles optiques qui utilisent en parallèle une dizaine de microlasers et qui transmettent jusqu'à six milliards d'informations binaires à la seconde sur quelques centaines de mètres. La réalisation récente de lasers à cavité verticale émettant de la lumière bleue (de longueur d'onde plus courte, donc permettant une résolution spatiale plus fine) ouvre par ailleurs de nouvelles perspectives pour l'impression laser ou le stockage d'informations sur des disques optiques.

Ces microlasers commerciaux ont une longueur d'une dizaine de micromètres et un courant de seuil d'environ un milliampère. Les microdisques laser, les fils photoniques ou les microlasers à cavité verticale de faible diamètre, qui ne sont encore que des objets de laboratoire, ont des courants de seuil beaucoup plus faibles, le record étant huit micro-ampères, ce qui leur ouvrira de nouveaux champs d'applications.

Toutefois, le marché des diodes électroluminescentes, en pleine expansion, engendre aujourd'hui un chiffre d'affaires cinq fois plus grand que celui des diodes laser. En effet, les diodes électroluminescentes remplacent progressivement les lampes à incandescence pour la visualisation (feux tricolores, signalisation autoroutière), les écrans plats actifs en couleur et bientôt l'éclairage domestique. Leurs atouts principaux sont leur rendement d'émission supérieur et leur fiabilité (leur durée de vie est de l'ordre du siècle). Nous allons voir que la réduction de la taille de ces diodes améliore, comme pour les lasers, et pour des raisons analogues, leur efficacité.

Une diode électroluminescente est formée d'un semi-conducteur qui, excité par un courant, émet spontanément des photons à une longueur d'onde fixée par la nature du matériau (au contraire de ce qui se passe dans un laser, la lumière n'est pas amplifiée par une émission stimulée). L'une des principales limitations physiques de ces diodes est liée au phénomène de réflexion interne à l'interface entre le semi-conducteur, de fort indice de réfraction, et l'air : deux pour cent seulement des photons émis spontanément le sont dans une direction proche de la normale à l'interface et peuvent donc sortir de la diode. Les autres restent piégés à l'intérieur du semi-conducteur, où ils sont réabsorbés. Le rendement de l'émission lumineuse vers l'extérieur de la diode est donc faible.

L'insertion d'une couche mince de semi-conducteur entre deux miroirs a récemment permis à des chercheurs de l'Université de Gand d'extraire d'une diode 23 pour cent des photons émis. Les réflexions multiples de la lumière piégée entre les deux miroirs ne sont en effet en phase que pour certaines directions de propagation des photons, et l'effet d'interférence y concentre l'ensemble de l'émission spontanée. On obtient un fin pinceau lumineux normal à l'échantillon en choisissant, entre les miroirs, une distance multiple de la demi-longueur d'onde. Des calculs d'optimisation portant sur les matériaux qui constituent les miroirs, effectués par H. Benisty et C. Weisbuch, à l'École polytechnique, montrent que l'on pourrait extraire ainsi jusqu'à 50 pour cent des photons.

En réduisant encore le nombre de modes photoniques (les modes photoniques correspondent aux ondes lumineuses stationnaires qui peuvent s'établir dans le milieu), on ajuste en outre le rythme auquel les photons spontanés sont émis. Dans une microcavité qui confine les photons sur des distances de l'ordre de la longueur d'onde dans les trois dimensions de l'espace, le nombre de modes photoniques est faible, et ils sont d'énergies bien différentes. Pour un émetteur placé dans une telle cavité et qui n'émettrait des photons qu'à des longueurs d'ondes différentes de celles des modes photoniques, l'émission spontanée serait complètement inhibée. En revanche, si l'émetteur peut émettre des photons à une longueur d'onde qui correspond à l'un des modes de la cavité, son émission spontanée dans ce mode est favorisée par le confinement des photons et le renforcement du champ électromagnétique du mode dans la cavité : l'émission spontanée dans ce mode est accélérée.

En 1983, l'équipe de Serge Haroche, à l'École normale supérieure, a réalisé un système fondé sur ce principe qui émettait dans le domaine des micro-ondes : des atomes placés au sein de petites cavités supraconductrices émettaient spontanément des photons 500 fois plus vite que dans le vide. De nombreuses équipes ont ensuite cherché à observer un tel phénomène pour des microcavités optiques semi-conductrices. Les techniques de micro-fabrication ont rapidement permis d'obtenir un confinement tridimensionnel des photons à l'échelle du

micromètre, mais il a été beaucoup plus difficile de trouver un émetteur adéquat : dans un semi-conducteur, l'agitation thermique, en communiquant de l'énergie aux électrons excités, élargit le spectre d'émission spontanée. Au sein d'une microcavité, cette émission est exaltée à l'énergie des modes de la cavité et inhibée aux autres énergies : au total, on ne modifie que de quelques dizaines de pour cent le rythme d'émission des photons spontanés.

**N**otre équipe a proposé d'employer comme émetteurs des «boîtes quantiques». Nous avons mis au point une méthode qui permet l'insertion d'inclusions d'arséniure d'indium de taille contrôlée au sein d'une matrice d'arséniure de gallium. Ces inclusions semi-conductrices se comportent comme un piège à électrons. La mécanique quantique nous apprend que, pour un tel système électronique de taille nanométrique, l'énergie des électrons ne peut prendre que quelques valeurs bien séparées. L'agitation thermique ne suffit pas pour faire passer les électrons d'un niveau d'énergie à un autre : tous les électrons excités ont la même énergie, et l'émission d'une boîte quantique donnée est spectralement très fine. En plaçant de tels émetteurs au cœur d'une microcavité tridimensionnelle de très petit volume, nous avons observé qu'ils émettent spontanément des photons cinq fois plus vite que lorsqu'ils sont à l'extérieur de la cavité.

Ce résultat préliminaire (notre expérience a été réalisée à huit kelvins) ouvre, à terme, de riches perspectives d'application pour les microcavités optiques. En premier lieu, on pourrait augmenter la fréquence maximale d'allumage et d'extinction des diodes électroluminescentes,

qui n'est limitée que par la dynamique de l'émission spontanée. En outre, en accélérant l'émission dans un mode photonique privilégié, le mode résonant de la microcavité, on augmente aussi, parmi les photons émis spontanément, la proportion de ceux qui sont émis dans ce mode. Dans notre expérience, l'émetteur émet des photons dans les modes de fuite de la microcavité (tous les modes qui ne participent pas à l'émission lumineuse dans la direction souhaitée) à la même vitesse qu'il émet dans tout l'espace lorsqu'il est en dehors de la cavité, mais il émet quatre fois plus vite des photons dans le mode résonant de la cavité : 80 pour cent des photons émis spontanément le sont donc dans cet unique mode.

Si le composant émettait 100 pour cent des photons dans ce mode, il deviendrait un laser sans courant de seuil : pour chaque électron injecté électriquement, un photon serait émis dans le mode utile, spontanément ou par stimulation. L'émission de lumière deviendrait alors un phénomène parfaitement déterministe. Nous pourrions communiquer un bit d'information avec un seul photon (dans les composants actuels, on doit envoyer plusieurs dizaines de photons au moins par impulsion lumineuse afin d'éviter toute erreur due à la fluctuation du nombre de photons émis). Si nous nous rapprochons encore d'un tel composant idéal, de nouveaux protocoles de transmission de l'information pourront être efficacement mis en œuvre, en particulier la cryptographie quantique, qui repose sur le codage en polarisation de photons émis un par un dans une fibre optique et qui garantit une parfaite confidentialité de l'échange de données.

Jean-Michel GERARD, *France Télécom*, CNET/CDP  
Laboratoire de Bagneux



Micrographie Anne Pouchard, CNET/CDP

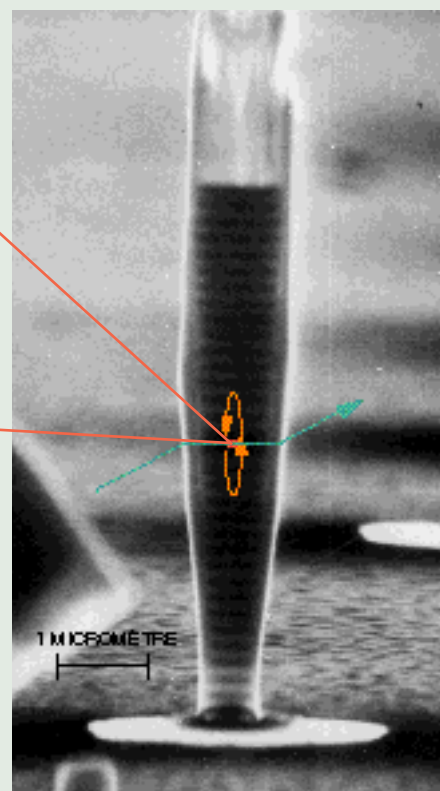


Schéma de J.-M. Gérard, CNET/CDP, Laboratoire de Bagneux

**UN MICROPILIER SEMI-CONDUCTEUR (à droite)** est une microcavité optique formée de deux réflecteurs de Bragg, empilements périodiques de couches alternées d'arséniure de gallium et d'arséniure d'aluminium. Cette structure confine fortement, dans les trois directions de l'espace, quelques modes de photons (flèche orange) pour lesquels ces derniers sont guidés dans l'axe du micropilier par la différence d'indice entre le semi-conducteur et l'air, et sont réfléchis par les miroirs de Bragg. Il existe aussi des modes de fuite (flèche verte), non confinés. Des boîtes quantiques d'arséniure d'indium (sur l'image de gauche, zones claires au milieu des halos sombres) ont été insérées dans la couche centrale (les halos sombres proviennent de la déformation du réseau cristallin de l'arséniure de gallium). Chaque boîte quantique a une raie d'émission très fine spectralement. Cette propriété a permis d'observer une forte exaltation de leur émission spontanée lorsque leur longueur d'onde d'émission correspond à l'énergie de l'un des modes confinés.

atomes dans le cristal et de l'angle avec lequel les rayons X frappent le réseau. Eli Yablenovitch, de l'Université de Los Angeles, a eu l'idée de transposer cette loi à un réseau à trois dimensions. Avec des collègues de l'Université de l'Iowa, il a trouvé une structure dans laquelle certaines longueurs d'onde ne peuvent se propager dans aucune direction : la structure possède une bande photonique interdite. Si l'on crée localement un défaut dans cette structure et que l'on place un émetteur de lumière à une longueur d'onde adéquate de la bande interdite, cette lumière reste confinée au voisinage du défaut et est amplifiée. C'est le principe de base d'un nouveau type de laser.

Avec mes collègues, nous avons ainsi construit un réseau hexagonal de minuscules colonnes d'arséniure de gallium, espacées de telle façon qu'il piège la lumière infrarouge. Cette structure n'est pas encore un laser, mais nous pensons en obtenir un en excitant l'une des colonnes pour lui faire émettre de la lumière, qui serait ensuite réfléchiée de façon répétée (et efficacement confinée) par les autres colonnes du réseau.

Dans le même esprit, mais en remplaçant les colonnes par des trous dans un semi-conducteur, des chercheurs de l'Institut de technologie du Massachusetts ont fabriqué un minuscule pont de silicium de 470 nanomètres de largeur et de 200 nanomètres d'épaisseur percé, dans sa longueur, par une rangée de trous microscopiques. La lumière ne peut pas s'échapper par les côtés de ce pont, à cause de la différence des indices de réfraction du semi-conducteur et de l'air. Des simulations numériques avaient permis de calculer l'espacement périodique entre les trous pour obtenir un «réseau» qui confine la lumière infrarouge. En outre, on avait calculé qu'en écartant un

peu plus les deux trous situés de part et d'autre du centre du pont on créerait une «boîte» d'à peine un vingtième de micromètre cube de volume où un mode optique fondamental pourrait s'établir. Cette «boîte» devrait devenir un jour une cavité laser, les trous adjacents servant de miroirs. Cette structure a été construite sur un socle de verre, et l'on a vérifié que les résultats expérimentaux étaient comparables aux simulations.

D'autres travaux ont exploré des «réseaux photoniques» à trois dimensions qui, en théorie, confinaient la lumière dans toutes les directions, caractéristique idéale pour un laser sans courant de seuil. De telles structures sont toutefois difficiles à fabriquer, car les techniques disponibles ont surtout été mises au point pour la fabrication de composants électroniques couche par couche, en deux dimensions.

Les lasers sans courant de seuil réagiraient beaucoup plus rapidement que les lasers actuels : les électrons émis le sont tous dans le mode laser, et celui-ci s'établit très vite. En d'autres termes, faire bouillir un récipient d'eau ne prendrait que le temps de craquer l'allumette. Certains lasers peuvent déjà être mis en marche et éteints plus de 20 milliards de fois par seconde.

De telles vitesses s'imposent pour les communications par fibres optiques, et d'autres applications apparaîtront à mesure que ces dispositifs deviendront encore plus rapides, plus petits et plus efficaces. Les lasers sans courant de seuil, qui semblent aujourd'hui davantage à notre portée, grâce aux récentes percées dans la fabrication de structures d'échelle nanométrique, sont très prometteurs comme futurs composants pour transmettre et manipuler des informations.

Paul Gourley travaille aux Laboratoires Sandia.

J. JEWELL, J. HARBISON et A. SCHERER, *Les microlasers*, in *Pour La Science*, janvier 1992.

H. YOKOYAMA, *Physics and Device Applications of Optical Microcavities*, in *Science*, vol. 256, pp. 66-70, 3 avril 1992.

*Optics of Nanostructures*, numéro spécial de *Physics Today*, vol. 46, n° 6, juin 1993.

Paul GOURLEY, Kevin LEAR et Richard SCHNEIDER, Jr., *Surface-Emitting Lasers*,

in *IEEE Spectrum*, vol. 31, n° 8, pp. 31-37, août 1994.

Paul L. GOURLEY, *Microstructured Semiconductor Lasers for High-Speed Information Processing*, in *Nature*, vol. 371, pp. 571-577, 13 octobre 1994.

John D. JOANNOPOULOS, Robert D. MEADE et Joshua N. WINN, *Photonic Crystals : Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, 1995.

*Microcavities and Photonic Bandgaps : Physics and Applications*, sous la direction de John Rarity et Claude Weisbuch, Kluwer Academic Publishers, 1996.



# La simulation du mouvement humain

JESSICA HODGINS

*Utilisant les lois de la physique, des ordinateurs font courir, sauter ou plonger des personnages de dessins animés.*

**N**ous percevons instinctivement les moindres détails des mouvements humains ; parfois même, nous reconnaissons un ami à sa seule démarche. Comment nous étonner que les films d'animation qui mettent en scène des personnages humains ne paraissent pas réalistes ? Nous remarquons facilement qu'une action n'est pas naturelle ou qu'elle est peu plausible, même si nous ne savons pas toujours identifier les défauts. En outre, nous percevons bien quand manquent les petits mouvements qui traduisent la personnalité ou l'humeur de l'individu.

La synthèse numérique du mouvement humain n'est pas limitée aux dessins animés ; elle est également utilisée dans la réalisation d'environnements virtuels, de jeux vidéo, mais aussi à des fins scientifiques, en ergonomie, en analyse des gestes sportifs et en rééducation motrice. Dans le film numérique *Toy Story*, produit en 1995 par les studios *Disney*, les personnages animés étaient des jouets que l'on supportait de voir bouger différemment d'un être humain, mais la réalisation de films analogues où les personnages seraient des enfants, par exemple, reste inaccessible. D'autre part, les entraîneurs formeraient mieux les athlètes s'ils disposaient de concurrents virtuels crédibles. Les créateurs de jeux vidéo recherchent des produits plus interactifs et plus attractifs... L'animation

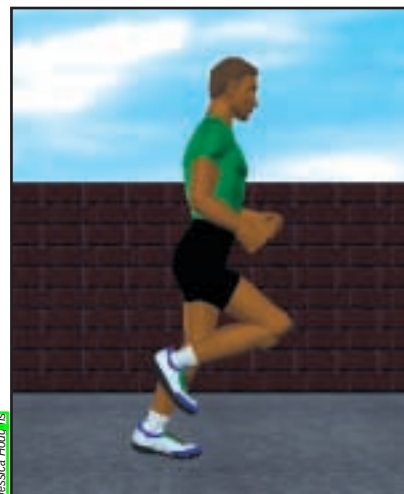
progresses grâce aux perfectionnements de la simulation numérique complète des mouvements humains, fondée sur les lois physiques et sur les caractéristiques biomécaniques des individus.

Les réalisateurs d'animations numériques utilisent aujourd'hui trois techniques de base : l'interpolation entre positions clés, la captation du mouvement réel et la simulation. L'interpolation entre positions clés laisse plus de liberté à l'animateur, mais aussi plus de responsabilités dans la qualité du résultat, que la captation du mouvement réel ou la simulation.

L'interpolation entre positions clés n'est que l'automatisation partielle de la technique du même nom, autrefois entièrement manuelle : l'animateur spécifie certaines positions des objets, et l'ordinateur crée les images intermédiaires par interpolation entre ces positions. Les personnages du film *Toy Story* étaient animés de cette façon : chaque personnage était décrit par plus de 700 points que l'on pouvait bouger indépendamment ; pour faire bouger un sourcil, par exemple, on indiquait la position des divers points du sourcil et on laissait l'ordinateur interpoler la position de chaque point dans les images intermédiaires.

Le dessin des positions clés par l'animateur peut être partiellement automatisé grâce à des techniques d'aide au placement des articulations du corps : si la main d'un personnage

doit être à un endroit donné, l'ordinateur calcule les angles correspondants du coude et de l'épaule. Le travail de l'animateur est ainsi simplifié, mais ce dernier doit tout de même savoir en détail comment se comporte un objet en mouvement et avoir le talent d'exprimer ces informations pour le des-



**1. ON SIMULE LA COURSE** en confiant à l'ordinateur les lois de la physique. Pour créer la séquence reproduite dans la partie inférieure de la figure, un ordinateur a déterminé les couples de force nécessaires pour faire osciller la jambe droite vers l'avant avant le contact au sol, évitant que le coureur ne trébuche. À l'aide de nombreux calculs de ce type, les ordinateurs simulent la mécanique de la course réelle (en haut). Les images des deux séquences, réelle et synthétisée, sont espacées de 0,066 seconde.

JESSICA HODGINS

sin des positions clés. Cette technique est très utilisée, car elle permet le contrôle fin des mouvements.

La captation du mouvement réel est la deuxième grande technique d'animation : des capteurs magnétiques ou optiques enregistrent les mouvements de sujets humains ou animaux en trois dimensions ; puis un traitement des données par un ordinateur anime des personnages. Ainsi, de nombreux athlètes célèbres ont servi de modèles à l'animation de personnages de jeux vidéo sportifs.

La captation du mouvement est de plus en plus utilisée, notamment pour des animations de films publicitaires, parce que de nombreuses actions humaines peuvent être facilement enregistrées, mais cette technique est imparfaite. D'abord, on place, sur la peau ou sur les vêtements, des marqueurs, dont la position est perçue par les capteurs, mais qui glissent lorsque le sujet bouge, ce qui perturbe les mesures. Ensuite, on doit remettre à l'échelle du personnage graphique les informations

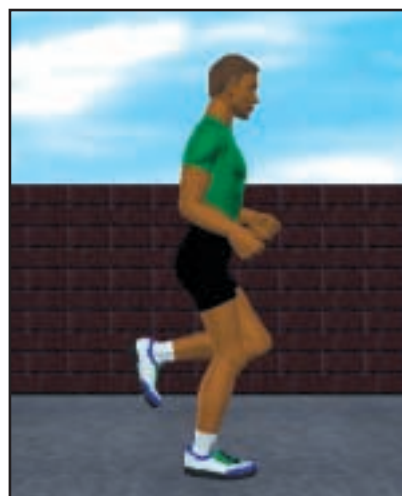
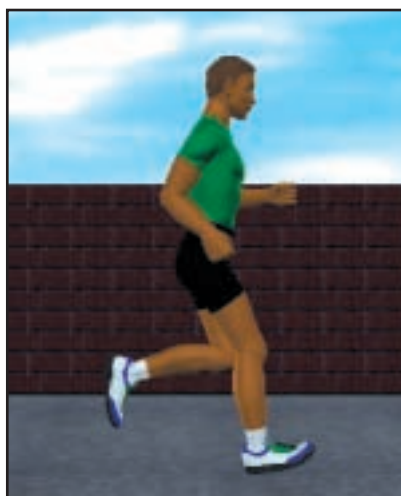
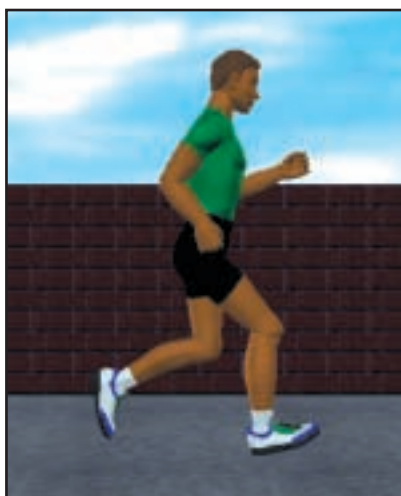
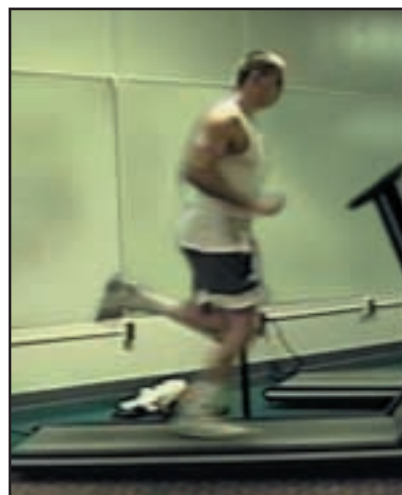
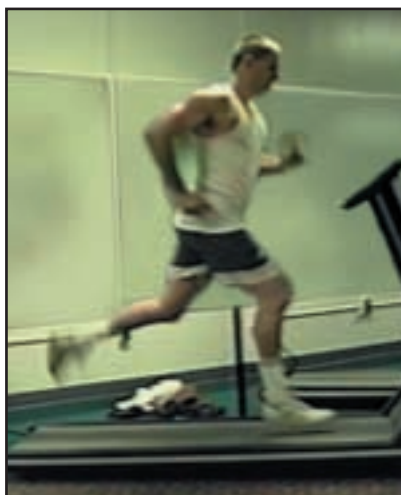
enregistrées sur un sujet réel qui n'a ni la même taille ni les mêmes proportions corporelles : sans ces ajustements, la main d'un personnage virtuel plus petit que l'original semblerait pénétrer dans une table plutôt que se poser dessus. Enfin, certains mouvements sont mal enregistrés avec les techniques actuelles. Avec les systèmes magnétiques, les câbles qui relient le sujet à un ordinateur restreignent sa liberté de mouvement, et la proximité d'objets métalliques ou d'un tapis roulant, qui peut être utilisé pour enregistrer le mouvement d'un sujet en train de courir, perturbe les mesures. Avec les systèmes optiques, on perd des informations lorsqu'une partie du corps en masque une autre.

### Déduire le mouvement de la physique

Contrairement à l'interpolation entre positions clés et à la captation du mouvement, la simulation engendre le mouvement des personnages et des

objets en se fondant uniquement sur les lois de la physique. Les personnages sont généralement représentés par un ensemble de segments corporels rigides. Le corps, par exemple, peut être constitué d'un tronc, de segments supérieurs et inférieurs, et de pieds, reliés par des articulations. Avec mes collègues, nous avons recueilli de nombreuses données biomécaniques, y compris en prenant des mesures sur des cadavres, pour élaborer des modèles précis. L'avant-bras de notre homme adulte virtuel, par exemple, a une masse de 1,1 kilogramme, une longueur de 24 centimètres et une circonférence moyenne de 25 centimètres.

Malgré nos efforts, nos modèles ne ressemblent encore qu'approximativement au corps humain. Ainsi, les segments corporels sont rigides, et l'on ne tient pas compte du mouvement des muscles sur l'os. Par ailleurs, bien que l'épaule soit généralement modélisée comme une articulation unique à trois degrés de liberté, la



clavicule et l'omoplate humaines autorisent des mouvements plus complexes, tel le haussement d'épaules.

D'autre part, un ordinateur calcule plus difficilement le mouvement des organismes que celui des objets inertes. Pour ces derniers, des équations issues de lois physiques suffisent. Ainsi, le mouvement d'un ballon qui dévale une pente ne dépend que des forces auxquelles il est soumis (la gravité, les frottements contre le sol ou dans l'air...) et des conditions initiales. Les êtres vivants, en revanche, sont animés par des sources internes d'énergie. Pour simuler leur comportement, nous avons mis au point un programme générateur de commandes musculaires, nommé système de contrôle : il calcule les couples de forces nécessaires au déplacement de chaque articulation pour permettre au personnage d'accomplir les actions choisies, et les applique à ces articulations. Pour la course, par exemple, le système de contrôle détermine les couples nécessaires pour ramener la jambe vers

l'avant avant le contact avec le sol, afin que le coureur ne trébuche pas.

Nous avons mis au point des systèmes de contrôle pour des activités physiques telles la course, le plongeon, la bicyclette ou le saut de cheval en gymnastique. Bien que les mouvements liés à ces activités soient différents, nos programmes fonctionnent globalement de la même façon, et ils sont construits à partir du même ensemble de composants.

### Le fonctionnement du système de contrôle

Un système de contrôle utilise un «automate d'états», qui détermine ce que chaque articulation doit faire à chaque instant, puis, tel un chef d'orchestre, assure que les articulations exécutent ces fonctions au moment approprié. La course, par exemple, est une activité cyclique où alternent une phase de soutien, lorsqu'une jambe sert d'appui, et une phase d'envol, quand aucun des deux pieds n'est en

contact avec le sol. Pendant la phase de soutien, la cheville, le genou et la hanche, du côté de la jambe en contact avec le sol, doivent assurer le soutien et l'équilibre. Quand cette même jambe est en l'air, la hanche a une fonction différente, celle de faire osciller la jambe vers l'avant pour préparer le contact suivant. L'automate d'états sélectionne, parmi les différents rôles de la hanche, l'action appropriée pour la phase en cours.

Ensuite, à chaque phase du mouvement sont associées des lois de contrôle, équations qui représentent la manière dont chaque segment corporel doit bouger pour accomplir le mouvement prévu, avec lesquelles l'ordinateur calcule les angles nécessaires pour chacune des 30 articulations du corps humain virtuel. Pour déplacer les articulations vers les positions désirées, le système de contrôle calcule ensuite les couples de force adaptés grâce à des équations qui reproduisent la fonction motrice des muscles.

## Trois techniques d'animation

### L'interpolation entre positions clés



SÉRIE COPIES



*Toy Story*, film des studios Disney, a été animé surtout par interpolation : les animateurs spécifiaient la position des objets, et un ordinateur créait les images manquantes par interpolation automatique.



### La captation du mouvement



MICROSOFT / VISION CAPTURE GROUP



C'est la technique la plus utilisée pour les animations publicitaires. Un ordinateur «rediffuse» des données saisies lors du mouvement de sujets réels pour animer un personnage de synthèse.

### La simulation



JAMES C. BEHN ET MICHEL ZOTEN

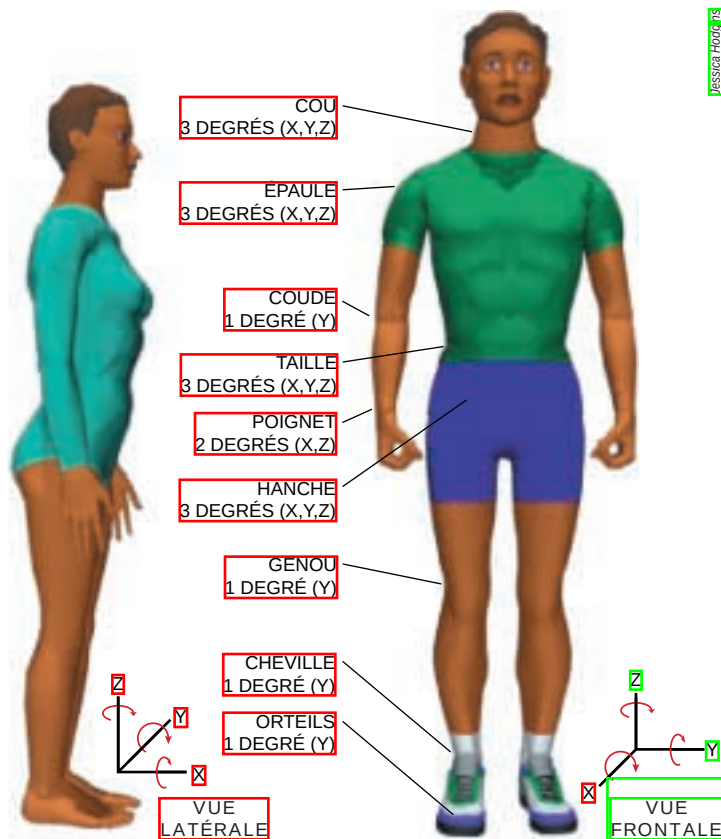
L'ordinateur utilise les lois de la physique pour synthétiser les mouvements de personnes et d'objets virtuels.

Pour simplifier l'écriture des lois de contrôle, nous utilisons souvent des synergies de plusieurs segments corporels. Ainsi les articulations de la cheville et du genou du coureur simulé coopèrent-elles dans la poussée sur le sol pendant la phase de soutien. Lorsque c'est possible, les lois de contrôle utilisent aussi les comportements passifs du corps pour obtenir l'effet désiré : nous supposons que le corps humain est une machine efficace et, par conséquent, qu'il minimise sa consommation d'énergie en se fondant le plus possible sur des comportements passifs. Par exemple, pendant la phase de soutien, le genou du coureur se comporte comme un ressort, qui stocke de l'énergie lorsqu'il est comprimé et la libère lorsqu'il se détend.

Les mouvements sont

mieux décrits lorsque bougent aussi des segments qui ne travaillent pas au cours de phases particulières, pour réduire les perturbations provoquées par le déplacement des autres segments. Dans le cas de la simulation de la course, les lois de contrôle font osciller les bras de l'athlète en opposition de phase par rapport aux jambes, afin de réduire les balancements du corps.

La technique de la simulation a deux avantages par rapport à l'interpolation entre positions clés et à la captation des mouvements. D'abord, les simulations sont plus générales : les mêmes lois décrivent des mouvements légèrement différents ; par exemple, les mêmes techniques de simulation animent une course à quatre mètres par seconde et une course à cinq mètres par seconde. Avec les autres techniques d'animation, le mouvement perd de son naturel si l'on se contente d'accélérer ou de ralentir la séquence. Ensuite les simulations, en temps réel, peuvent être interactives, qualité importante pour les environnements virtuels et les jeux vidéo, où des personnages doivent réagir aux actions de per-



**2. LES MODELES INFORMATIQUES DU CORPS humain sont composés de segments corporels rigides, reliés par des articulations auxquelles on assigne un, deux ou trois degrés de liberté selon les axes de coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$ .**

sonnes réelles. En revanche, les animations par interpolation entre positions clés ou à partir de captation de mouvements reproduisent seulement des mouvements déjà calculés, et stockés dans la mémoire de l'ordinateur.

La simulation reste toutefois d'emploi difficile, et elle n'est exécutable que par des ordinateurs puissants. Afin de faciliter la programmation, nous avons mis au point une banque de sous-programmes qui peuvent être associés de différentes façons pour créer de nouveaux mouvements : l'ordinateur combine quatre systèmes de contrôle fondamentaux (sauter, tourner en l'air, atterrir et s'équilibrer) pour engendrer des figures plus complexes, tels les sauts périlleux ou les plongeurs.

### L'adaptation de la simulation à la morphologie

Nous explorons aussi l'adaptation automatique à d'autres personnages des comportements déjà mis en équations. Les systèmes de contrôle sont adaptés aux propriétés dynamiques particulières d'un modèle donné et, en général, le système mis au point

Jessica Hodges

pour un adulte ne fonctionne pas pour un enfant. Nous étudions des techniques d'optimisation et d'ajustement des systèmes de contrôle qui permettent la modification d'un comportement existant et son adaptation à un autre personnage dont les caractéristiques physiques sont différentes de celles du personnage initialement étudié. Ainsi, nous avons adapté à une femme et à un enfant de quatre ans notre système de contrôle de la course conçu pour un homme, en prenant en compte les différences des masses des segments corporels de ces trois modèles, ainsi que de nombreux autres paramètres.

Ces dernières années, des informaticiens ont cherché des méthodes, fondées sur la simulation, qui engendrent des mouvements sans l'élaboration préalable d'un système de contrôle. La synthèse de mouvements peut, par exemple, être traitée comme un problème d'optimisation de trajectoires : on traite alors les équations du mouvement et certaines caractéristiques importantes de l'action désirée comme des contraintes, et l'on recherche le mouvement qui satisfait ces contraintes en dépensant l'énergie minimale. Ainsi, dans une simulation de saut, les contraintes seraient que le personnage parte du sol, qu'il soit ensuite en l'air et qu'il revienne au sol. Le logiciel d'optimisation déterminerait alors automatiquement que le personnage plie les genoux avant de sauter pour obtenir la hauteur maximale en dépensant le minimum d'énergie.

D'autres équipes confient à l'ordinateur la recherche du système de contrôle parmi toutes les possibilités. Dans le cas le plus général, cette technique doit déterminer comment un personnage pourrait bouger de tout état initial possible à tout état final possible. Comme cette méthode résout un problème plus général que celui de l'identification d'une trajectoire optimale unique d'un point de départ donné

vers un point d'arrivée, elle est particulièrement efficace pour les simulations simples et pour des problèmes qui ont de nombreuses solutions, car la probabilité que l'ordinateur en trouvera une est grande. Les techniques

entièrement automatiques sont naturellement préférables à celles qui nécessitent une conception manuelle, mais les informaticiens n'ont pas encore trouvé de méthodes automatiques capables de simuler les comportements

de systèmes aussi complexes que l'être humain, sans fournir au préalable des connaissances précises sur les mouvements à effectuer.

Bien que la mise au point des systèmes de contrôle soit difficile, leur

## Copie conforme

**C**omment synthétiser les mouvements et les expressions d'un visage, qui traduisent l'humeur, les sentiments et la personnalité ? La Société *Lamb & Company* a animé un «jumeau» numérique d'Alan Alda, acteur qui a tourné en particulier avec Woody Allen.

La Société *Lamb & Company* a construit un modèle numérique de la tête d'A. Alda à partir de mesures prises par balayage laser de l'acteur réel : les ingénieurs ont utilisé une «grille» de



2000/00/00 par Sam Cohen au Museum of Modern Art, New York

12 000 polygones pour représenter la géométrie tridimensionnelle de la tête de l'acteur ; chaque polygone était associé à une carte de texture contenant des informations telles que la coloration et la régularité de la peau.

Les balayages laser ont été faits pour quatre poses : une vue de base, où A. Alda n'affichait aucune émotion, et des vues statiques de l'acteur souriant largement, grimaçant et souriant à demi. L'ordinateur a ensuite créé d'autres expressions par combinaison des quatre poses de base. Les animateurs ont aussi construit des vues statiques de l'acteur virtuel prononçant différents phonèmes (unités de base du langage tel le son «r» dans «rat»). Ce travail a surtout été réalisé à la main, bien que les outils d'assistance par ordinateur aient fourni une aide rudimentaire dans la modification des modèles informatiques. Au total, les animateurs ont créé une banque d'une soixantaine de vues, qu'ils peuvent à nouveau combiner pour produire de nouvelles variations.

Pour apporter mouvement et «vie» au modèle numérique, les animateurs ont travaillé avec des textes prononcés par l'acteur qu'un laboratoire japonais avait synthétisés, en séparant et en réassociant les phonèmes d'un véritable enregistrement de la voix d'A. Alda. La synchronisation des mouvements des lèvres de synthèse avec cette simulation audio a été très laborieuse.

Ce travail a nécessité l'analyse minutieuse de cassettes vidéo montrant l'acteur en action. L'équipe a observé comment il bouge la bouche lorsqu'il produit des sons 'oh' ou 'ooh', par exemple. Les animateurs ont aussi prononcé certains mots devant un miroir pour étudier les mouvements de leur propre visage.

La création de chaque image, dans la séquence synthétisée, aurait pris un temps considérable sans l'aide de l'interpolation entre positions clés, technique où un animateur ne spécifie que certaines positions d'un objet et où un ordinateur crée les images intermédiaires par interpolation. Ainsi, la synthèse d'un personnage prononçant le mot «sel» sera fondée sur des photographies de la personne disant «sss», «eh» et «ell», l'ordinateur créant automatiquement les images intermédiaires. Cette technique a aussi été utilisée pour d'autres mouvements du visage, tels les clignements de paupières. Grâce à l'interpolation, 20 pour cent seulement des images ont été créées à la main.

Enfin, pour que le visage virtuel bouge naturellement, les ingénieurs ont effectué des semaines d'ajustements manuels : il y a



tant d'irrégularités dans les mouvements du visage et dans ceux associés à la prononciation du langage chez les êtres humains, qu'il faut près de dix fois plus de travail pour le réglage fin que pour produire le mouvement de base.

Le résultat est un film de deux minutes, composé d'environ 2 500 images. Il a coûté une fortune... mais le personnage créé n'est pas encore naturel au point qu'on le prenne pour un personnage réel.



**3. LES MODELISATIONS D'UN HOMME, d'une femme et d'un enfant qui courent nécessitent des modifications : la simulation doit tenir compte des différences de masse des segments corporels des trois modèles, et de nombreux autres paramètres. Le saut de cheval est une action plus simple à simuler que la course, parce que le gymnaste est en l'air pendant la plus grande partie de la figure. Pendant cette période son corps obéit simplement à la loi physique de conservation de la quantité de mouvement et du moment cinétique.**

utilisation est relativement facile. Les animateurs utilisent maintenant ces systèmes pour reproduire des mouvements sans comprendre le déroulement de ces mouvements ni les équations sous-jacentes.

Toutefois, si la simulation permet la reproduction d'actions générales, elle n'aide pas à programmer des mouvements détaillés. Par exemple, l'animateur spécifiera le chemin suivi par une bicyclette, mais il ne pourra utiliser la simulation pour stipuler que le cycliste pédale de façon décontractée. Cette limite peut être en partie franchie par une combinaison de techniques : on engendre automatiquement les mouvements globaux par simulation, puis on affine les mouvements, telles les expressions faciales, par interpolation ou par enregistrement du mouvement. Les mouvements simulés sont également rendus plus réalistes par l'addition d'éléments secondaires, passifs, qui réagissent selon les mouvements du personnage principal : un trampoline se déforme lorsqu'un gymnaste rebondit dessus ; le sable qui se tasse sous les pieds d'un coureur, sur une plage, modifie l'allure de la course ; les vêtements, que l'on peut modéliser comme un ensemble de points reliés par des ressorts, bougent avec la personne qui les porte.

Par simulation, on reproduit aussi le comportement des foules. Un petit programme inséré en amont du système de contrôle évite les collisions en calculant la vitesse de chaque individu en fonction de la distance aux autres et des obstacles présents. Cette vitesse est alors utilisée par le système de contrôle de la locomotion de chaque individu.

Nous avons choisi d'étudier des activités sportives telles que la course ou la bicyclette, parce que la dynamique de ces actions contraint le mouvement et limite la recherche de lois de

contrôle. Les simplifications sont particulièrement nettes dans la simulation du saut de cheval : le gymnaste est en l'air la plupart du temps, et son moment cinétique est conservé. La course est une action plus compliquée, parce que l'athlète est le plus souvent en contact avec le sol, et que les couples de forces appliqués aux articulations, calculés par les lois de contrôle, modifient directement de nombreux détails du mouvement. Plus généralement, la simulation est beaucoup plus difficile quand les mouvements humains sont exécutables de différentes façons, selon les personnes : les mouvements où se manifeste le caractère, mimes ou gesticulations, par exemple, échappent à nos descriptions. Lorsque les lois physiques n'imposent pas les grandes lignes d'un mouvement, la simulation risque de ne pas sembler naturelle. On doit alors introduire des règles supplémentaires fondées sur l'observation et sur la mesure des mouvements réels.

Comment évaluer la qualité du mouvement humain simulé ? Tout dépend du but visé. Des environnements virtuels utilisables pour l'entraînement, le travail avec une machine ou le divertissement exigent des mouvements assez variés, expressifs et réalistes. On doit les évaluer avec un test analogue à celui qui avait été proposé par le mathématicien britannique Alan Turing : on se demande si l'on perçoit une différence entre le mouvement simulé et le mouvement réel, quand ils sont tous les deux présentés avec le même système graphique. Les premières expériences indiquent que l'on ne reproduit pas encore correctement le mouvement humain, mais certaines personnes trouvent les mouvements simulés plus réalistes que les mouvements réels lorsque le corps est schématisé par des points placés sur les articulations.



Dans le cas des simulations destinées à l'étude de questions scientifiques ou d'ingénierie, on évalue simplement les simulations en superposant le mouvement réel et l'enregistrement vidéo du mouvement de synthèse. On compare alors des données biomécaniques, tels les forces de réaction au sol, le temps de vol, la vitesse ou la longueur des pas. Les résultats de ces évaluations permettent, à leur tour, de corriger les modèles et les systèmes de contrôle et font progresser les simulations vers des scènes plus réalistes.

Jessica HODGINS est professeur à l'Institut de technologie de Georgie.

Andrew WITKIN et Michael KASS, *Space-time Constraints*, in *Proceedings of SIGGRAPH 88*, ACM, 1988.

J. Thomas NGO et Joe MARKS, *Space-time Constraints Revisited*, in *Proceedings of SIGGRAPH 93*, ACM, 1993.

Jessica K. HODGINS, Wayne L. WOOTEN, David C. BROGAN et James F. O'BRIEN, *Animating Human Athletics*, in *Proceedings of SIGGRAPH 95*, ACM, 1995.

G. MAESTRI, *Digital Character Animation*, New Riders Publishing, 1996.

Jessica K. HODGINS et Nancy S. POLLARD, *Adapting Simulated Behaviors for New Characters*, in *Proceedings of SIGGRAPH 97*, ACM, 1997.



# Les poussières sahariennes

STEFANO GUERZONI • EMANUELA MOLINAROLI

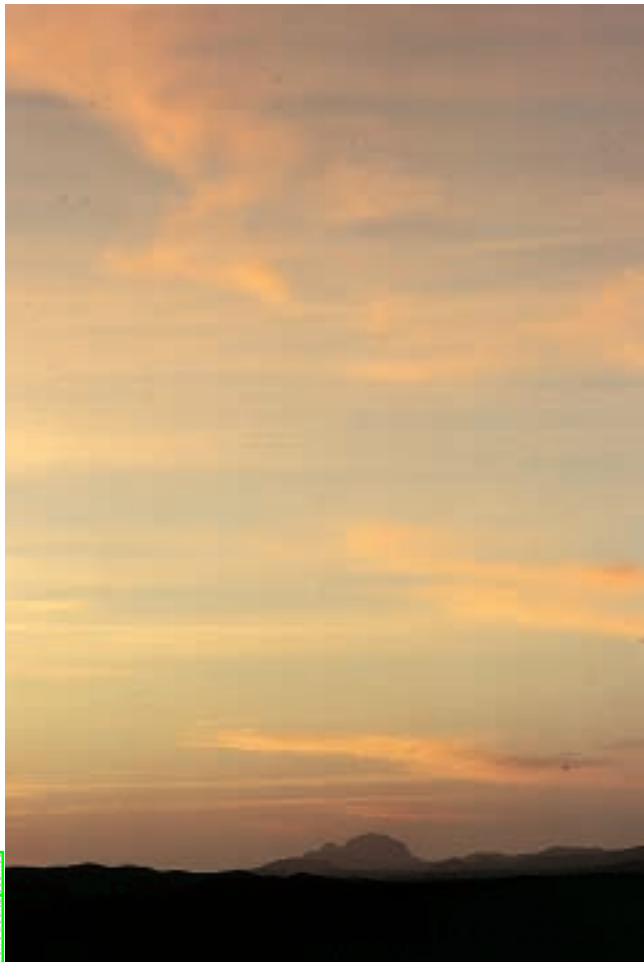
*Des poussières du Sahara traversent la Méditerranée et retombent sur l'Europe, notamment sous la forme de «pluies rouges».*

D'Europe, le désert du Sahara est lointain, et plus lointaine encore l'idée que le sable et la poussière provenant d'Afrique du Nord puissent se faire sentir dans tout le bassin méditerranéen et dans la majeure partie de l'Europe. Certains de ces effets sont pourtant manifestes : des pluies laissent des traces rouges sur les voitures, et les vents de sirocco violents apportent parfois du sable. D'autres conséquences sont

plus discrètes, mais tout aussi importantes : certains carbonates basiques des poussières réduisent l'acidité des pluies, et les poussières apportent des éléments nutritifs (des ions contenant du fer et du phosphore) qui favorisent la croissance des algues dans les eaux marines, habituellement pauvres en ces substances.

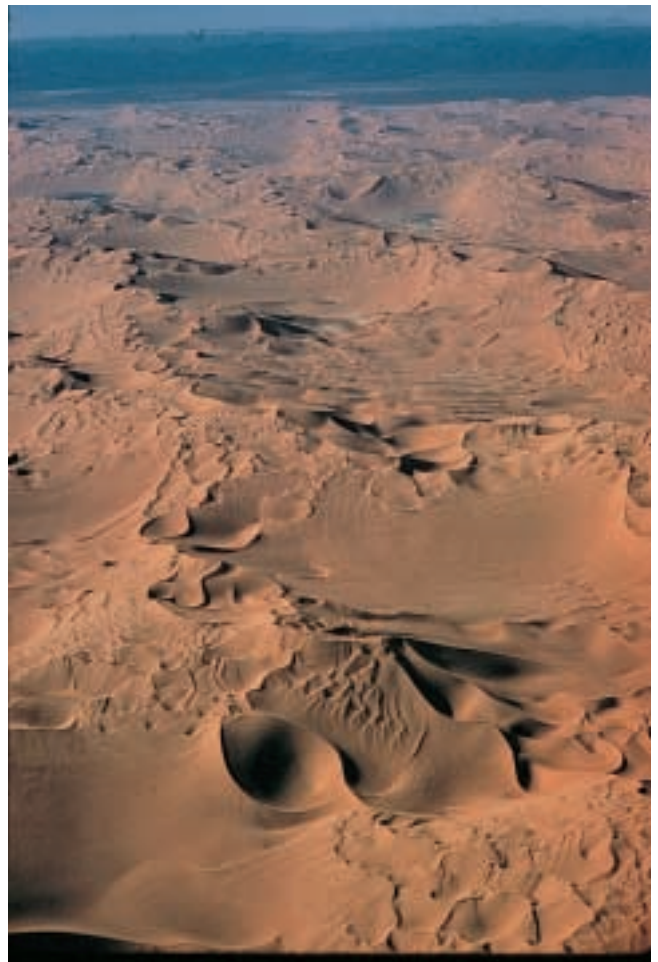
Ce transport des poussières est visible de l'espace : les astronautes à bord de la station *Skylab* ont observé

la trajectoire du sable du Sahara qui, soulevé par une tempête à l'Ouest du Sahara, traversait l'Atlantique et atteignait les Caraïbes. Chaque année, les vents transportent des centaines de milliers de tonnes de sable du Nord du Sahara vers l'Ouest et vers l'Europe. Sur les côtes méridionales de l'Europe, certains couchers de soleil ne sont pas rouges, mais d'un jaune d'or. Cette couleur est due à un voile de particules qui filtre la lumière

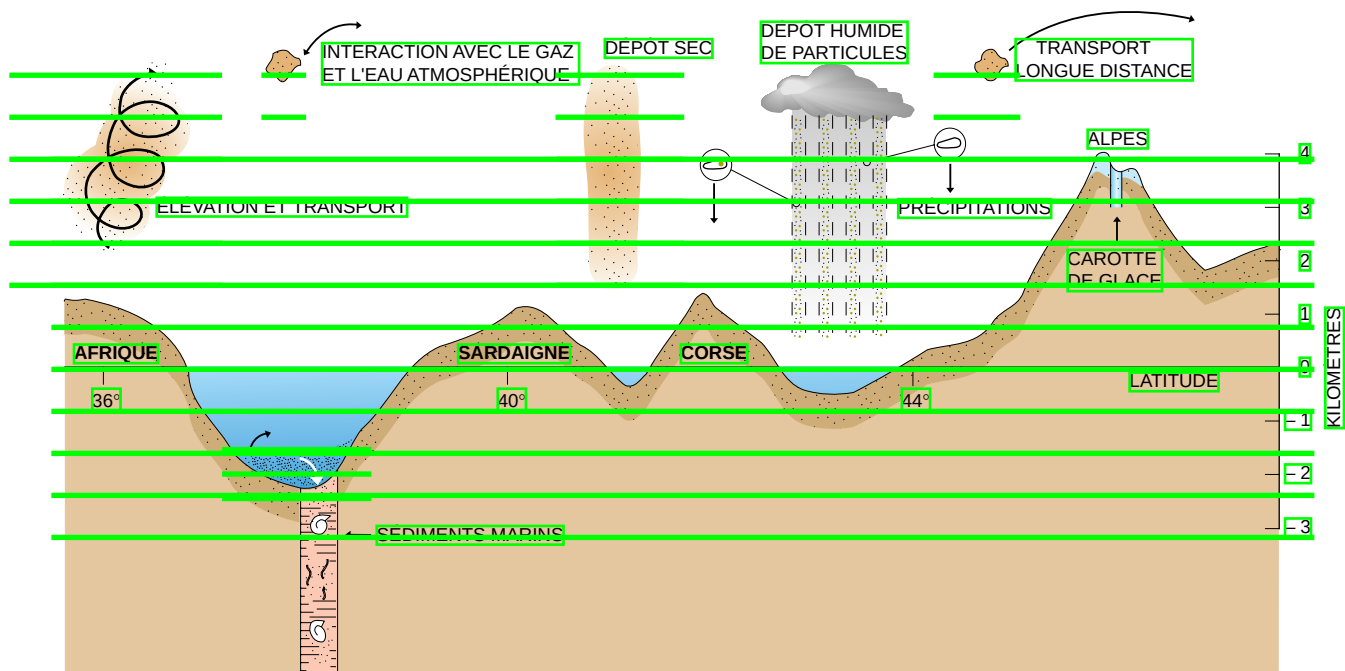


PIRE BOUDET / ASTROZ

1. LA COLORATION DOREE de certains levers et couchers de soleil (à gauche), caractéristique du Sahara, résulte de la présence de poussières en suspension dans l'atmosphère. Ce spectacle



est parfois observable dans le Midi de la France. L'environnement saharien s'érode facilement, à l'image de la région de Tassili (à droite).



**2. DESTINATIONS POSSIBLES** des poussières sahariennes le long d'un profil Sud-Nord, de l'Afrique jusqu'aux Alpes. Les particules provenant du désert africain sont d'abord soulevées et transportées en altitude, où elles interagissent avec le gaz et l'eau. Elles sont ensuite déposées dans la mer et sur la terre, par l'intermédiaire de précipitations sèches ou humides. Dans la mer, cette

poussière reste dans la colonne d'eau ou sédimente sur le fond, avec les particules transportées par les fleuves, les glaciers et celles qui se forment aux dépens de substances dissoutes dans l'eau et par l'intervention d'organismes vivants. Sur la terre, les particules sont piégées dans les glaces, tant alpines que polaires.

solaire. Outre leur aspect esthétique, ces poussières modifient le bilan d'énergie de la Terre et perturbent le climat.

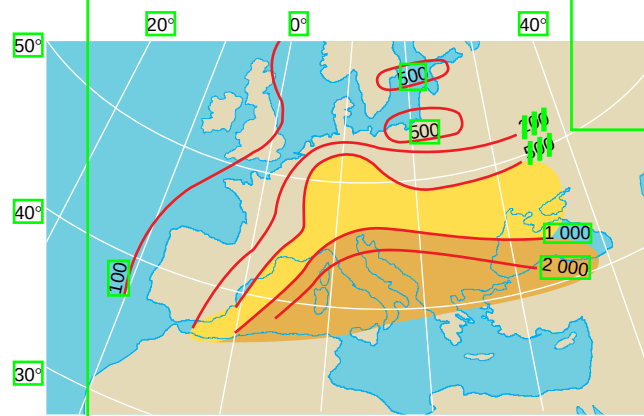
Grâce à un réseau de stations d'échantillonnage (en Sicile, en Sardaigne et en Corse), des géophysiciens ont estimé la quantité de matériaux déposés et ils ont élaboré un modèle du transport de ces particules africaines. Les concentrations moyennes en poussières sahariennes dans l'air diminuent de façon exponentielle lorsque la latitude augmente : d'environ 2 000 microgrammes par mètre cube dans les régions limitrophes au Sahara (35 degrés de latitude Nord), la concentration chute à moins d'un microgramme par mètre cube dans les Alpes et au-delà (entre 45 et 50 degrés de latitude). La quantité annuelle de poussières reçues par la terre et par la mer est ainsi comprise entre moins d'une tonne et plus de 100 tonnes par kilomètre carré.

L'apport n'est pas régulier, mais résulte principalement de quelques épisodes violents : les tempêtes de poussières. Les climato-

logues cherchent à prévoir l'impact climatique de ces poussières. Dans certains cas, l'impact est clair, comme pour l'éruption du Pinatubo, en 1991 : les poussières volcaniques ont été si abondantes (30 millions de tonnes) et projetées si haut (plus de 30 kilomètres) qu'elles sont restées dans l'atmosphère pendant plusieurs mois, diminuant la température moyenne du Globe de 0,5 °C.

Chaque grain de poussière parti d'Afrique interagit de façons variées avec l'air, le gaz et l'eau le long d'un

trajet qui atteint quelques centaines, voire quelques milliers de kilomètres. Ces longs transports ne se limitent pas uniquement au bassin méditerranéen et à l'Europe méridionale : les poussières sahariennes se déposent souvent dans toute la France, en Allemagne et, dans certains cas, à des latitudes supérieures (pays scandinaves et pôle Nord). Un événement important est survenu en mars 1991. Après l'avoir examiné, nous verrons comment l'analyse des poussières sahariennes qui arrivent aux pôles révèle les changements climatiques naturels. Puis nous examinerons les conséquences variées de ces épisodes de transport.



**3. LE CONTINENT AFRICAIN** enrichit l'atmosphère européenne en calcium. Les lignes rouges indiquent des zones de quantités égales de calcium (quantités annuelles moyennes relevées au niveau du sol, en milligramme par mètre carré). Cet enrichissement est lié à la dissolution partielle des carbonates présents dans les poussières désertiques transportées.

### Une grande tempête de sable

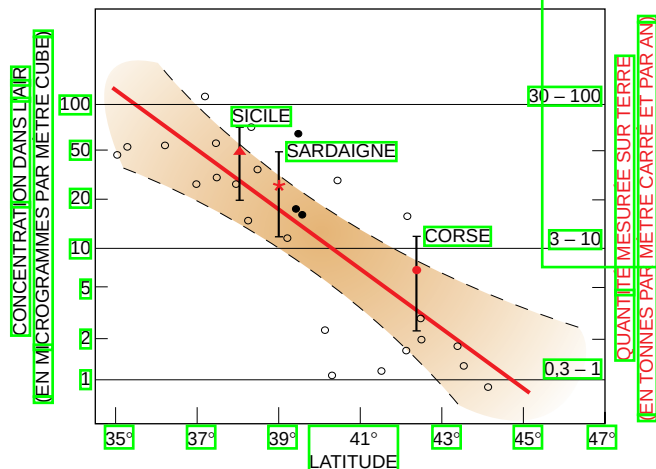
Le 8 mars 1991, vers midi, le ciel au-dessus de la région de Sidi Bouzid, en Tunisie, fut obscurci par des nuages de poussières en provenance du désert. Simultanément, des vents chauds soufflèrent pendant plusieurs jours sur le Sahara ; la température enregistrée par de nombreuses stations météorolo-

giques d'Afrique du Nord augmenta. Les vents très rapides et turbulents étaient dus à une différence de pression entre un anticyclone (hautes pres-

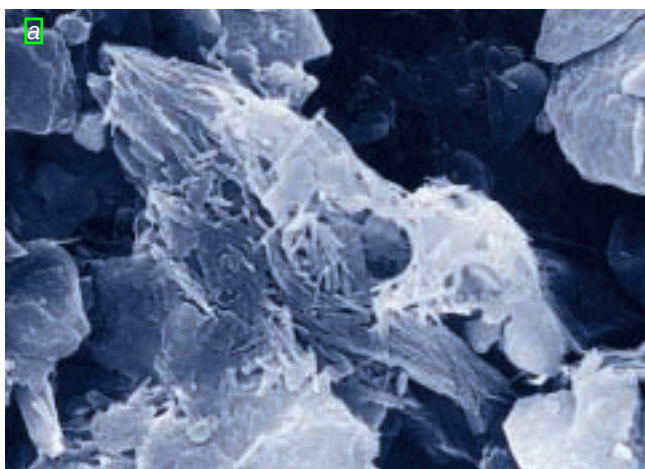
sions) situé au-dessus de l'Afrique orientale et une dépression située au-dessus de l'Atlas (voir la figure 6). Alors que l'anticyclone se déplaçait vers l'Est, la Tunisie fut balayée, le 8 mars, par des vents chauds dont la vitesse atteignait parfois 100 kilomètres par heure. L'après-midi de ce même jour, le trafic aérien fut bloqué à l'aéroport de Palerme en raison de nuages de poussières saha-

riennes qui provenaient du Sud. En Sardaigne, une station préleva des échantillons de poussière afin de les étudier et de les caractériser d'un point de vue physique (dimension des particules et composition minéralogique) et chimique (composition des particules elles-mêmes).

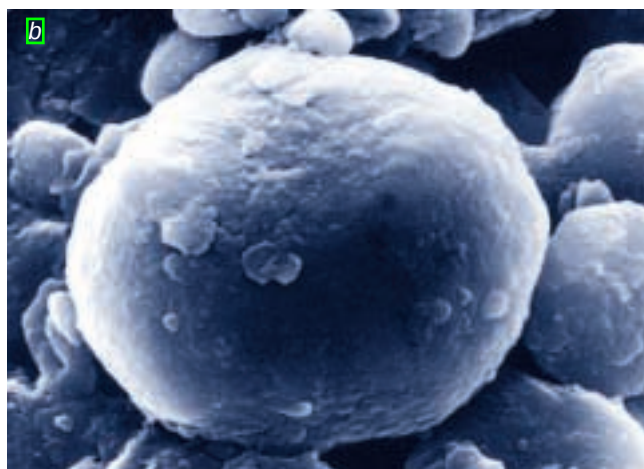
Ces analyses confirmèrent la provenance saharienne des poussières : elles comprenaient certains matériaux typiques des zones désertiques, tels la palygorskite (minéral feuilleté riche en magnésium), le quartz, la calcite



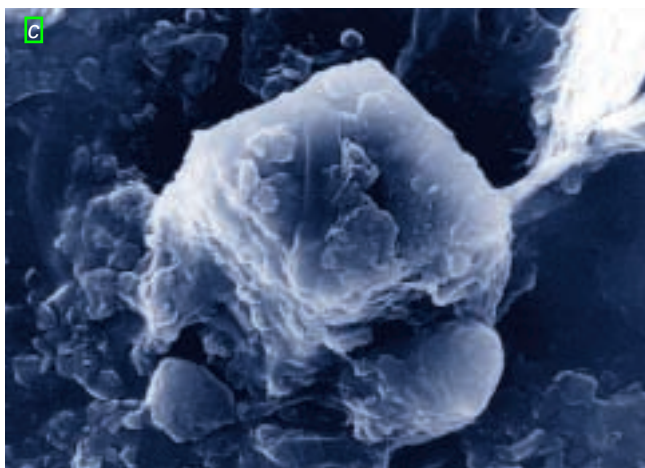
**4. LA CONCENTRATION EN POUSSIÈRES** dans l'air et leur transport vers la terre diminuent de manière exponentielle avec la latitude, du Sud vers le Nord. De 50 à 100 tonnes par kilomètre carré et par an à 10-20 degrés de latitude en Sicile et en Sardaigne, on passe à moins d'une tonne par kilomètre carré par an sur les Alpes. Sur ce graphique, on a reproduit deux types de mesures : les mesures satellitaires (cercles noirs, échelle à gauche) et les mesures au sol (formes rouges, échelle à droite).



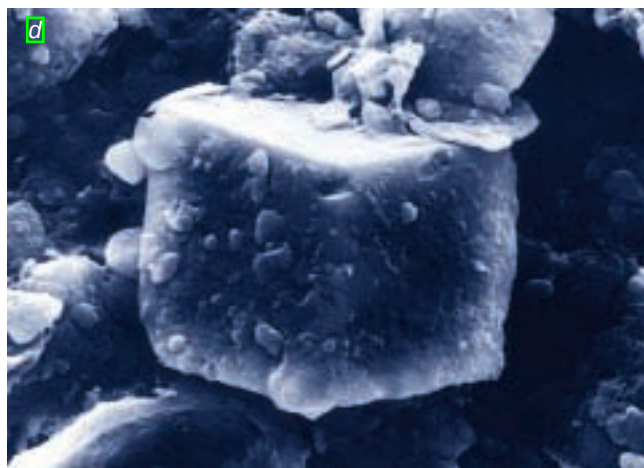
4 MICROMÈTRES



4 MICROMÈTRES



4 MICROMÈTRES



4 MICROMÈTRES

**5. CES MINÉRAUX**, photographiés au microscope électronique, sont typiques des poussières désertiques. Ce sont de la palygorskite (a), un minéral argileux riche en magnésium ; du quartz (b), ou oxyde de silice ; de la calcite (c), ou carbonate de calcium, et de la dolomite (d), ou carbonate de calcium et de magnésium. Pour certains minéraux, tel le quartz, la morphologie

permet de reconnaître le transport éolien et la provenance désertique. La palygorskite est un minéral typique des sols arides et semi-arides dont les principales sources sont les alluvions des fleuves ou des lacs asséchés, ainsi que les lacs salés de l'Afrique Nord-occidentale. Les poussières sont souvent riches en carbonates qui réduisent l'acidité des pluies.

(carbonate de calcium) et la dolomite (carbonate de calcium et de magnésium). En France, cette tempête de poussières provoqua l'apparition de neige colorée dans les Pyrénées et de pluies rouges dans le Sud et dans le centre. Sur 150 000 kilomètres carrés, plus de 150 000 tonnes de poussières se déposèrent. Des dépôts de couleur ocre furent signalés en Angleterre le 7 et le 8 mars, au Nord de l'Allemagne le 8 et le 9 et en Belgique à l'aube du 9. Le 10 mars, presque 50 000 tonnes de poussière du désert avaient coloré la neige dans une vaste région située entre la Suède et la Finlande, proche du cercle polaire arctique. Le matériau déposé était composé de minuscules particules minérales (un à dix micromètres de diamètre) et de pollens d'aulne, de noisetier et d'armoïse, qui avaient voyagé sur plus de 5 000 kilomètres.

### Une pluie de sang

Le premier cas bien décrit de transport de ce type fut ce que l'on nomma la «pluie de sang», entre le 9 et le 12 mars 1901 : à cette occasion, des poussières furent retrouvées jusqu'au Nord de l'Allemagne.

L'intérêt porté à ces phénomènes et à leurs effets n'est pas nouveau. Déjà, Aristote notait : «Les pluies du Sud et les premières pluies d'automne recueillent sur les lieux qu'elles traversent une grande quantité d'exhalaisons sèches, et le vent du Sud mêle beaucoup de terre à la pluie qui tombe.»

Pourquoi et comment les poussières sahariennes sont-elles transportées vers l'Europe? Souvent, le transport survient lorsqu'une dépression sur l'Espagne ou sur la France déplace un air chaud et sec de l'Afrique du Nord vers l'Europe. Dans certains cas, cette couche d'air «africain» voyage au niveau de la mer, à environ 1,5 kilomètre d'altitude. D'autres fois, lorsqu'une dépression forte est présente au-dessus du Sahara, l'air chaud et sec est aspiré à des altitudes importantes, et il voyage au-dessus de l'air plus humide et plus froid de la Méditerranée, à près de six kilomètres d'altitude. La poussière est alors transportée très loin, jusqu'au Nord de l'Europe. De surcroît, si un anticyclone est simultanément présent sur le centre de l'Afrique du Nord, la poussière ne s'étend pas vers l'Est mais est «canalisée» vers le Nord,

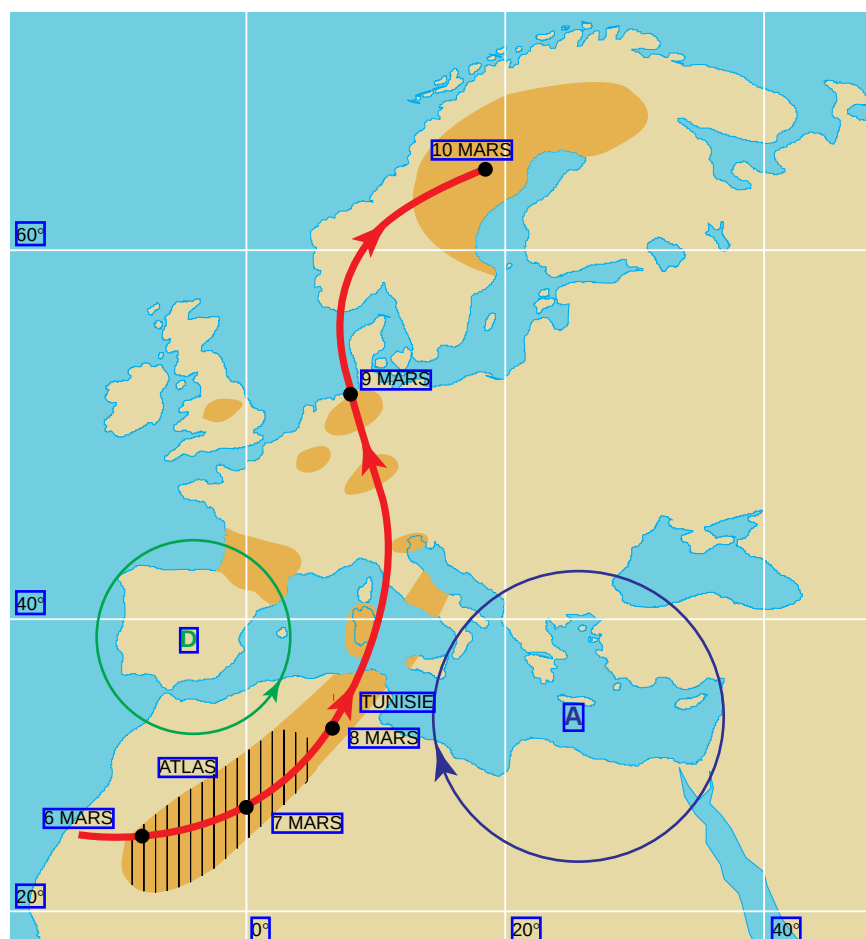
comme ce fut le cas en mars 1991 (voir la figure 6).

Aujourd'hui, ces transports sont étudiés et quantifiés grâce à des satellites et à un réseau de stations d'échantillonnage. François Dulac et ses collègues du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, à Saclay, ont ainsi utilisé le satellite météorologique *Meteosat* pour étudier quantitativement le transport saharien. Cette méthode se fonde sur la mesure de la «perturbation optique» due aux poussières : les capteurs du satellite mesurent la lumière solaire réfléchiée par le système Terre-atmosphère ; très réfléchissantes, les poussières augmentent la quantité de lumière réfléchiée.

Grâce à l'étude statistique des images quotidiennes prises par *Meteosat* entre 1984 et 1994, ils ont estimé la quantité de poussières transportées sur la Méditerranée et ont découvert un cycle saisonnier : durant le printemps et l'été, la quantité transportée est maximale.

Ces mesures par satellite ne correspondent que partiellement à celles rassemblées depuis dix ans par les stations en Corse et en Sardaigne. Pourquoi ces différences? Parce que les satellites ne fournissent pas d'images utiles lorsque le ciel est nuageux, et que, dès lors, ils sous-estiment le transport en période hivernale. En outre, les stations au sol détectent à la fois les dépôts secs et les dépôts humides (par les précipitations), tandis que les satellites ne voient que les dépôts secs. Bien que le climat du bassin méditerranéen soit considéré comme sec, plus de la moitié des poussières désertiques qui touchent le sol tombent avec les pluies.

Les climatologues comparent également les données saisonnières ou annuelles moyennes avec celles d'autres archives naturelles, telles les glaces. Les glaces des calottes polaires et des glaciers emprisonnent les poussières, qui restent alors inaltérées



6. ENTRE LE 6 ET LE 10 MARS 1991, une tempête a emporté des poussières du Sahara vers l'Europe. La zone hachurée indique la zone d'érosion, dans le Sahara, d'où provenait cette poussière. Les zones colorées indiquent les zones où l'on a retrouvé les dépôts les plus importants de poussières. On note une zone étendue dans le Nord de la Suède et de la Finlande. Au Sud des Alpes, la poussière tombée sur la neige semble avoir contribué à la fonte rapide du glacier qui a permis la découverte de l'homme des glaces, le 19 septembre 1991.

durant des siècles. Leur étude renseigne sur la composition et la circulation passée des nuages de poussières. À l'aide de carottes de glace récoltées dans la banquise, on recon-

struit la composition de l'atmosphère au cours des 100 000 à 200 000 dernières années. Les glaciers alpins livrent également des informations comparables à celles fournies par les

glaces polaires, mais seulement pour quelques milliers d'années.

Pour identifier les poussières d'origine saharienne et étudier les climats du passé, les géologues, les glacio-

## Le Sahara et la Méditerranée

Le Sahara est la plus grande étendue désertique de la planète : sa surface, quatre fois supérieure à celle de l'Union européenne, est supérieure à neuf millions de kilomètres carré et recouvre six pour cent des zones hyperarides et arides du Globe.

Au Nord et au Sud, le Sahara est respectivement bordé par des régions au climat méditerranéen et au climat tropical. Ces limites sont définies tant par des caractères climatologiques (précipitations annuelles inférieures à 200 millimètres, températures moyennes de 20 à 35 degrés) que par des caractéristiques biologiques (limite de maturation du fruit du palmier-dattier, le *Phoenix dactilophera*, entre 29 et 32 degrés de latitude environ, et disparition du had, *Cornulaca monacantha*, vers 15 à 18 degrés de latitude).

Pour analyser comment se répartissent les diverses zones arides, on utilise un indice d'aridité qui représente un manque d'humidité dans des conditions climatiques moyennes. Cet indice, noté IA, est défini comme le rapport entre les précipitations annuelles et la quantité d'eau évaporée chaque année. Les déserts sont des zones hyperarides naturelles ( $IA < 0,05$ , en rouge sur la figure) ; ils représentent sept pour cent de la surface des terres émergées du Globe. D'un point de vue climatique, les déserts se caractérisent par une quantité de pluie très réduite et hautement variable (variabilité inter-annuelle allant jusqu'à 100 pour cent) et par de fréquents intervalles de plusieurs années sans précipitations.

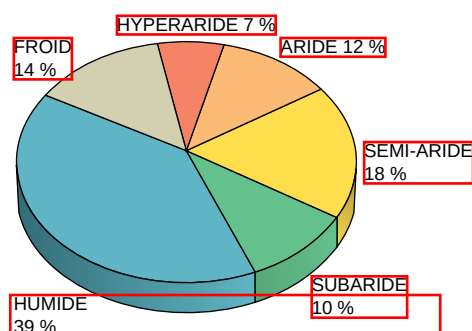
Les déserts chauds comprennent environ un tiers de toutes les terres émergées et sont localisés dans deux zones séparées de part et d'autre de l'équateur : sous le Tropique du Cancer et sous le Tropique du Capricorne. C'est là, entre 15 et 30 degrés de latitude, au Nord comme au Sud de l'équateur, que se trouvent les déserts de tous les continents, à l'exception de l'Europe, où les zones arides sont limitées au Sud de l'Espagne. Outre les déserts chauds, où la température diurne atteint parfois 58 °C, les déserts froids recouvrent environ 16 millions de kilomètres carrés dans les régions de l'Arctique et de l'Antarctique. Dans les déserts polaires, les températures sont rarement supérieures à 10 °C et descendent jusqu'à -70 °C.

Les zones arides ( $0,05 < IA < 0,20$ , en orange sur la carte) représentent 12 pour cent de la totalité des terres émergées. Elles reçoivent 200 à 300 millimètres de pluie par an avec une forte variabilité inter-annuelle (entre 50 et 100 pour cent). Les zones semi-arides ( $0,20 < IA < 0,50$ , en jaune) représentent 18 pour cent de la totalité des terres émergées, avec des précipitations moyennes comprises entre 500 et 800 millimètres de pluie et une variabilité inter-annuelle modérée (25 à 100 pour cent).

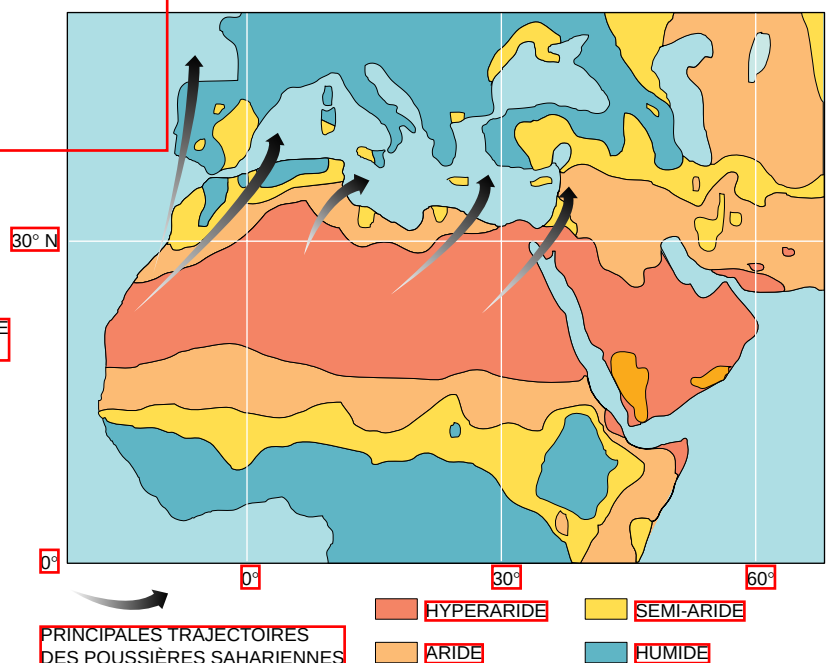
Quelles sont les causes de ces déserts inhospitaliers ? Le sol devient désertique quand les pluies sont rares ou absentes. Même si les prévisions climatiques restent incertaines, on sait que le bassin méditerranéen serait bouleversé par les changements climatiques et, notamment, par les variations du régime des précipitations. Des variations, même minimes, de la disponibilité en eau auraient très probablement des conséquences graves sur la nature et sur les activités humaines.

Aujourd'hui, la Méditerranée reçoit dix pour cent des 200 millions de tonnes de poussières qui proviennent chaque année du Sahara. Ces 25 millions de tonnes ont pour origine principale les régions hyperarides et, en partie, les régions arides et semi-arides ; elles suivent principalement cinq types de trajectoire Sud-Nord indiquée par les flèches dans la figure ci-dessous.

Le Sahara s'étend : les particules les plus petites peuvent être emportées par le vent, tant à partir des roches qui se désagrègent qu'à partir des dépôts alluvionnaires ; transportés sur de longues distances, ils forment des champs de dunes mobiles. Le sable envahit le territoire avoisinant et conquiert le terrain, kilomètre après kilomètre. Dans de nombreuses régions, seule une mince bande cultivable subsiste entre la mer et le désert. Ce territoire devient de plus en plus peuplé, de sorte que l'environnement se dégrade et se désertifie encore.



**LES ZONES CLIMATIQUES** (selon les Nations unies, 1992). Les flèches indiquent les trajectoires prédominantes des poussières des déserts vers la Méditerranée et l'Europe (à droite). Le graphique représente la répartition des terres émergées par zone d'aridité.



logues, les pétrographes et les chimistes doivent effectuer de difficiles analyses. Ils étudient la turbidité de la glace, recherchent des minéraux d'origine désertique par des analyses chimiques de divers éléments (calcium, sodium, etc.) et par des analyses isotopiques : ils cherchent notamment la proportion d'oxygène 18 (dont le noyau est composé de huit protons et de dix neutrons) par rapport à l'oxygène 16 (à huit protons et huit neutrons).

Des géochimistes allemands et italiens ont utilisé les méthodes mises au point dans l'étude des glaces du Groenland pour analyser des carottes de glace prélevées sur le mont Rosa dans les Alpes, à une altitude de 4 500 mètres. Les variations de la concentration en calcium ont révélé les «strates sahariennes» (voir la figure 7). Ils ont notamment observé que la quantité de poussières déposées dans la glace au cours des 300 dernières années n'a pas augmenté. En revanche, une oscillation cyclique a été décelée : les concentrations élevées en calcium coïncident avec une augmentation relative de l'oxygène 18 d'environ 2,3 pour 1 000 (correspondant à un échauffement de trois à cinq degrés). Ainsi, dans les Alpes, la quantité de poussières augmente avec la température.

Cependant, la température des Alpes n'est pas représentative des conditions globales, contrairement aux glaces des pôles. Or, les glaces des pôles montrent que la quantité de poussières contenues dans les glaces augmente lorsque la température diminue : durant les glaciations, les zones arides se sont agrandies et les conditions météorologiques ont changé.

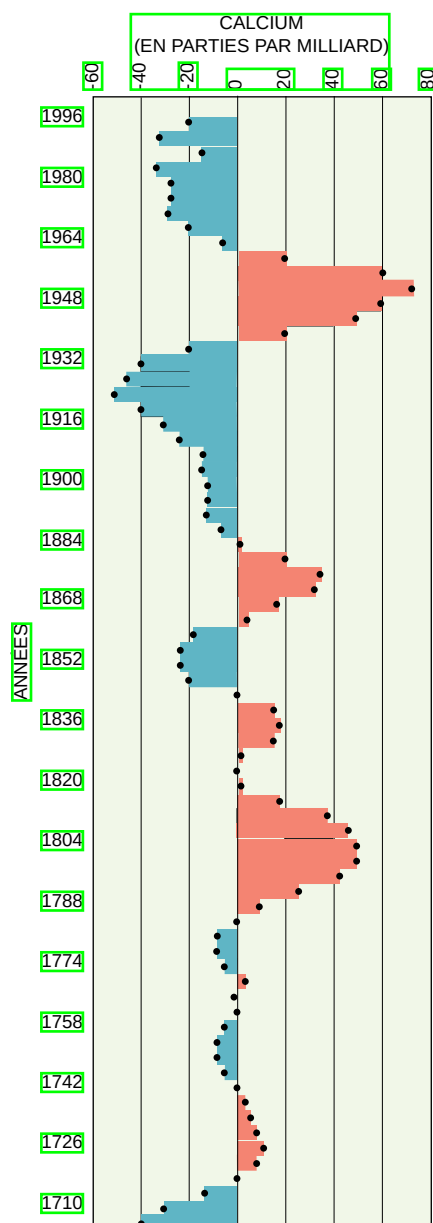
Pour savoir si les variations climatiques laissent partout les mêmes traces, d'autres événements devront être enregistrés et étudiés, en particulier les événements violents. Au cours des 20 dernières années, moins d'une dizaine d'événements violents ont été enregistrés. Les changements climatiques globaux modifieront-ils la fréquence de ces phénomènes ? Si oui, dans quel sens ? Les tempêtes de sable pourraient avoir aussi contribué au rapide dégel des glaciers : une tempête importante, telle celle de mars 1991, qui a diminué l'albédo des glaciers des Alpes orientales (la proportion de lumière solaire réfléchie), a accéléré la fonte estivale des glaciers. Cette fonte a contribué à l'exposition d'Ötzy, l'homme des glaces,

âgé de 5 300 ans, trouvé dans le Parc naturel Gruppo di Tessa, à la frontière italo-autrichienne, à une altitude de 3 200 mètres.

Les climatologues, qui connaissent maintenant les effets des aérosols minéraux, cherchent à en tenir compte dans leurs modèles. De surcroît, une partie de ces poussières pro-

vient de sols «perturbés» par l'érosion, et par la surexploitation ou la déforestation, principalement dans des régions arides et semi-arides. La désertification est définie par l'Organisation des nations unies comme une «dégradation du terrain dans des zones arides, semi-arides et semi-humides, résultant de divers facteurs, y compris les variations climatiques et les activités humaines». Cette définition permet de comprendre que les phénomènes naturels sont associés à des phénomènes anthropiques, à tel point qu'il devient parfois impossible de les distinguer.

Toute dégradation des environnements à l'équilibre précaire, tels que le Sahara et le Sahel, menace tous les climats et toutes les régions. Comme la géologie et la morphologie du Sahara en font «un livre ouvert de l'histoire du monde», l'on peut penser que l'intensité et la fréquence du transport de poussières désertiques vers la Méditerranée est un «baromètre» qui nous indique de manière spectaculaire les changements climatiques en cours.



**7. POUR MESURER les quantités de poussières désertiques déposées sur les Alpes,** Dietmar Wagenbach, de l'Université d'Heidelberg, a mis au point une méthode d'identification des «strates sahariennes», fondée essentiellement sur la concentration en calcium et sur les variations du rapport isotopique entre l'oxygène 16 et l'oxygène 18. Le graphique indique les variations des concentrations en calcium (par rapport à la concentration moyenne) dans une carotte de glace prélevée dans les Alpes : ces mesures montrent le caractère cyclique du transport des poussières depuis 300 ans.

Stefano GUERZONI travaille au Département de géologie marine de Bologne. Emanuela MOLINAROLI travaille au Département de sciences de l'environnement de l'Université de Venise.

Alain BUCHER, *Saharan Dust from Ancient Times until Present*, in *Journal of Arid Environment*, 1993.

Emanuela MOLINAROLI, Stefano GUERZONI et Giancarlo RAMPAZZO, *Contribution of Saharan Dust to the Central Mediterranean Basin*, in *Geological Society of America SP 284*, pp. 303-312, 1993.

D.A. MEESE et al., *The Accumulation Record from the GISP2 Core as an Indicator of Climate Change throughout the Holocene*, in *Science*, vol. 266, pp. 1680-1682, 9 décembre 1994.

François DULAC et al., *Quantitative Remote Sensing of African Dust Transport to the Mediterranean*, in *The Impact of Desert Dust across the Mediterranean*, sous la direction de S. Guerzoni et R. Chester, Kluwer Academic Publishers, pp. 25-49, 1996.

Dietmar WAGENBACH et al., *Northward Transport of Saharan Dust Recorded in Deep Alpine Ice Cores*, in *The Impact of Desert Dust across the Mediterranean*, sous la direction de S. Guerzoni et R. Chester, Kluwer Academic Publishers, pp. 291-300, 1996.



# L'impact climatique des poussières d'Afrique

CYRIL MOULIN • CLAUDE LAMBERT

*Les satellites mesurent les concentrations en poussières dans l'atmosphère terrestre. Contrairement à ce que les climatologues pensaient, ces poussières risquent de perturber le climat à court terme.*

Chaque année, environ un milliard de tonnes de particules minérales est transporté dans l'atmosphère à partir des zones arides et semi-arides du Globe, principalement du Nord de l'Afrique. Au cours du temps, cette quantité a beaucoup varié : durant les derniers maxima glaciaires, il y a quelques dizaines de milliers d'années, il se déposait 30 fois plus de poussières dans les glaces de l'Antarctique qu'il ne s'en dépose aujourd'hui.

Les poussières dans l'atmosphère constituent un bon indicateur des variations climatiques passées : les changements de la circulation atmosphérique et l'extension des régions désertiques au cours des périodes froides ont considérablement accru la quantité de poussières transportées. Aux mêmes époques, la quantité de poussières a augmenté dans les sédiments marins du Pacifique Nord, de l'océan Indien et de l'Atlantique.

Si les modifications du climat influent ainsi sur la quantité de poussières désertiques mises en suspension, l'action des poussières sur le climat est également importante : avec l'ensemble des particules en suspension dans l'atmosphère (suies, embruns, etc.), les poussières interviennent dans le bilan radiatif, le bilan entre le flux d'énergie absorbé par la Terre et le flux réémis, qui commande le climat de la Terre.

Pourtant, jusqu'à une époque récente, les poussières des déserts préoccupaient peu les spécialistes des changements climatiques à court terme (100 ans), car elles étaient considérées comme des aérosols résultant d'un processus naturel d'érosion par le vent. À

ces échelles de temps, on estimait que le climat de la Terre était en équilibre si l'activité humaine ne le perturbait pas. Ainsi, seules les perturbations anthropiques directes, tels que les rejets supplémentaires de gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, chlorofluorocarbures) ou d'aérosols de pollution (sulfates, suies,...), étaient supposées suffisamment intenses pour influencer le climat à l'échelle de 100 ans.

Après avoir examiné pourquoi l'observation globale des poussières nécessite des satellites, nous détaillerons les observations de ces derniers. Les données collectées montrent que, depuis 30 ans, la quantité de poussières africaines transportée a beaucoup augmenté et que leur prise en compte dans les modèles climatiques est indispensable.

## Couverture spatiale

Voici plus de dix ans, Joseph Prospero et ses collègues de l'Université de Miami avaient mis en évidence une augmentation de plus d'un facteur deux, entre 1965 et 1984, des quantités de poussières d'origine africaine déposées à la Barbade, aux Antilles. Cette variation est importante : depuis le début de l'ère préindustrielle (1750), on estime respectivement à 30 pour cent et à 145 pour cent l'augmentation des concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone et en méthane, les deux principaux gaz à effet de serre. C'était la première preuve que, localement, les concentrations en poussières variaient fortement en quelques décennies, de la même façon que les gaz à effet de serre et les aérosols de pollution.

Pourtant, les climatologues négligèrent longtemps cette augmentation. Puis, en 1996, Ina Tegen et ses collègues de l'Université Columbia suggérèrent que la quantité de poussières exportée d'Afrique est déterminée en grande partie par la désertification liée à une utilisation croissante des sols (agriculture, élevage, urbanisation, etc.) par les populations locales. Ainsi la désertification galopante de ces dernières années expliquerait l'augmentation des concentrations enregistrées à la Barbade. Après ces travaux, fondés sur des simulations effectuées à l'aide d'un modèle global de transport, les poussières africaines sont passées rapidement du statut d'indicateur des variations climatiques à long terme à celui d'acteur des changements climatiques rapides liés à l'activité humaine.

Malheureusement, les concentrations en poussières désertiques dans l'atmosphère sont difficiles à mesurer à partir du sol, et les relevés de la Barbade restent le seul enregistrement continu couvrant plus de dix ans. Pour prendre en compte ces poussières dans les modèles climatiques globaux, deux difficultés subsistaient. D'une part, on ne disposait que de mesures locales qu'on ne pouvait pas extrapoler : le climat de la Barbade diffère de celui de l'Atlantique tropical Nord, car de nombreux facteurs locaux, telle la météorologie de la mer des Caraïbes peuvent intervenir sur la tendance

**1. TEMPÊTES DE SABLE au Niger (en haut) et dans le Sahara (en bas). Chaque année, un milliard de tonnes de poussières est transporté dans l'atmosphère.**



Yasuni N. Renardou



Yasuni N. Ascani

observée, au même titre que des phénomènes de grande ampleur, comme la sécheresse au Sahel ou l'intensification des alizés. D'autre part, les incertitudes liées à la modélisation du transport des poussières africaines sont telles, que la validation des modèles nécessite une confrontation minutieuse entre les résultats des simulations numériques et les observations globales.

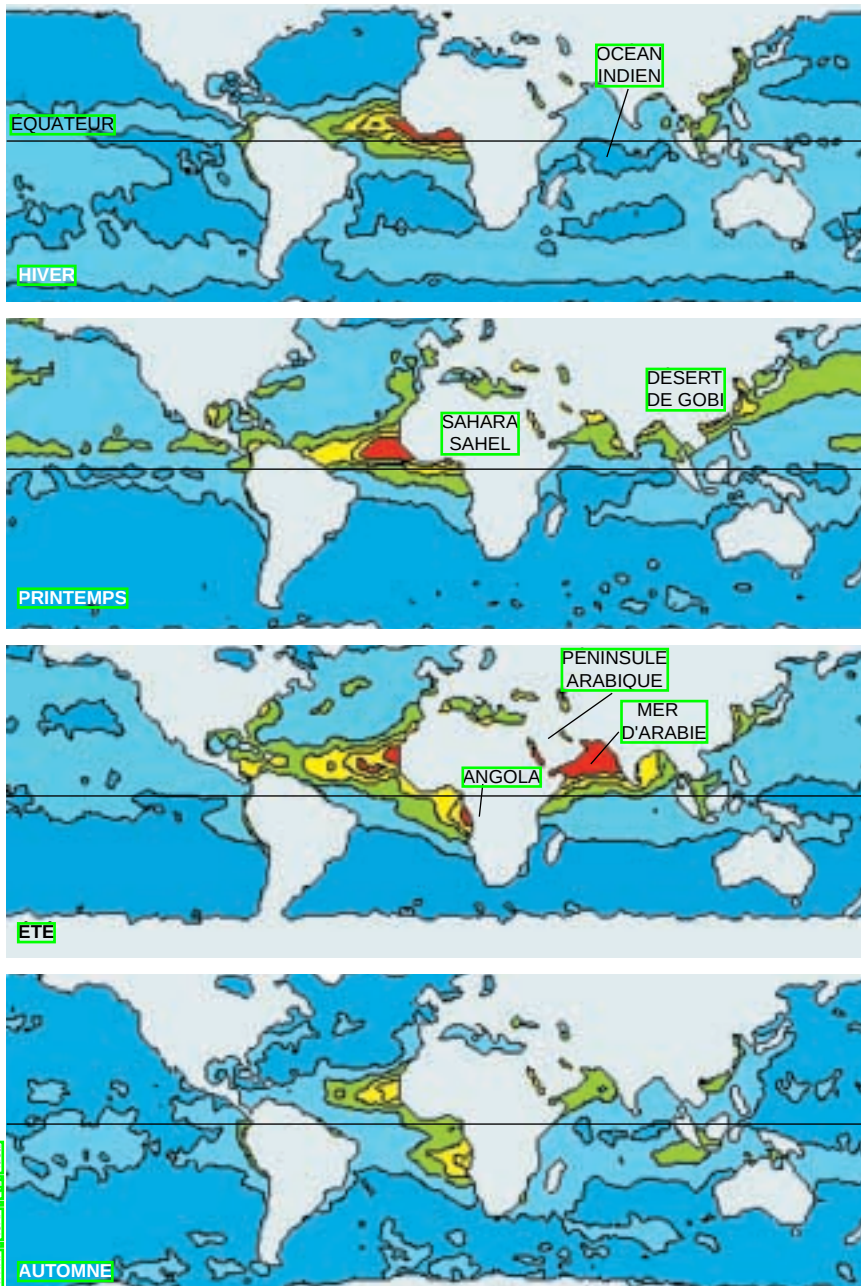
La télédétection spatiale résout ces problèmes : c'est aujourd'hui l'unique moyen d'estimer les concentrations en aérosols sur de grandes surfaces. Pour effectuer ces estimations, les capteurs des satellites mesurent la lumière réfléchie par l'atmosphère au-dessus des surfaces peu réfléchissantes telle celle de la mer : comme cette dernière est sombre, elle absorbe les rayonnements

visibles, à l'exception du bleu ; les poussières, au-dessus de la surface de l'océan, augmentent la quantité de lumière réfléchie. À partir de l'augmentation mesurée, on calcule l'épaisseur optique, qui caractérise la concentration en particules diffusantes dans l'atmosphère. L'épaisseur optique augmente avec la masse de poussières présente dans la colonne d'air située sous le satellite (voir l'encadré page 82). Ainsi, l'épaisseur optique est égale à 0,2, ce qui correspond à une «visibilité» de 30 kilomètres (la visibilité est la limite au-delà de laquelle on ne distingue plus nettement les contours d'un objet), quand la quantité de poussières au-dessus d'un kilomètre carré à la surface du Globe est égale à 300 kilogrammes ; une épaisseur optique de 0,8, soit une visibilité de cinq kilomètres, correspond à une quantité de poussières d'environ une tonne par kilomètre carré.

La première carte mondiale des épaisseurs optiques moyennes en aérosols dans l'atmosphère marine a été obtenue en 1997 à partir des images enregistrées pendant deux ans par le capteur météorologique américain AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, soit «Radiomètre à très haute résolution») (voir la figure 2). On détermine la nature des aérosols détectés par les satellites à l'aide des observations au sol. Ainsi, à l'Ouest de l'Afrique, on sait que les aérosols sont presque exclusivement constitués de poussières sahariennes.

Les principales zones de transport de poussières africaines sont l'océan Atlantique tropical Nord, la mer d'Arabie et, dans une moindre mesure, la Méditerranée. Ces poussières sont originaires du Sahara et du Sahel pour l'océan Atlantique, de la péninsule Arabique et d'Afrique de l'Est pour la mer d'Arabie, du Sahara et du Maghreb pour la Méditerranée.

Sur l'Atlantique, les poussières sont transportées durant toute l'année. La zone de concentrations maximales se décale du Sud vers le Nord entre l'hiver et l'été, car le transport se fait dans les alizés, ces vents qui se décalent entre ces deux saisons de l'équateur à 15-20° de latitude Nord. En hiver, l'épaisseur optique est importante entre l'équateur et 5° de latitude Nord, et les poussières sont transportées vers les côtes de l'Amérique du Sud. L'intensité du transport est maximale pendant le printemps et l'été : plusieurs millions de tonnes de poussières sont exportées les jours



**2. LA PREMIERE CARTE MONDIALE** de la quantité d'aérosols dans l'atmosphère au-dessus de la mer a été obtenue en 1997, à partir d'images du satellite américain AVHRR. Cette quantité est comprise entre 0 (en bleu foncé) et 700 kilogrammes par kilomètre carré (en rouge). Les mesures ne permettent pas de distinguer les différents types d'aérosols, mais on peut attribuer certaines quantités élevées à des sources d'aérosols particulières. Les grandes taches rouge dans l'Atlantique et dans la mer d'Arabie correspondent aux poussières des déserts. Les aérosols carbonés provenant de la combustion de la végétation sortent d'Afrique par l'Angola, surtout en été. Sur le Pacifique Nord, les poussières du désert de Gobi s'ajoutent aux sulfates de pollution du Sud-Est asiatique.

de tempêtes de sable. Pendant l'été, les poussières africaines atteignent les Antilles et l'Amérique centrale.

Sur l'océan Indien, les poussières ne sont notablement transportées que pendant l'été, mais le débit à cette période est supérieur à celui qui est mesuré au-dessus de l'océan Atlantique. Ce cycle saisonnier est imposé par celui de la mousson qui s'installe en été et engendre des vents violents de Sud-Ouest qui balaient l'Afrique de l'Est et la péninsule Arabique. Comme sur l'océan Atlantique, le transport des poussières est limité au Sud par les fortes pluies de la zone intertropicale, qui entraînent les particules vers le sol.

En Méditerranée, le transport des poussières est inférieur et, surtout, plus variable (voir *Le transport des poussières sahariennes*, par S. Guerzoni et E. Molinaroli, page 72). Sur cette zone, le transport est provoqué par les dépressions qui traversent occasionnellement le bassin, engendrant des vents violents en direction du Nord et du Nord-Est. L'extension vers l'Europe des panaches de poussières est limitée en raison de la plus grande fréquence des pluies à ces latitudes, qui «lessivent» l'atmosphère.

### Couverture temporelle

Les cartes globales dressées par les satellites américains ne permettent cependant pas d'observer le transport de poussières sur une période suffisamment longue pour mettre en évidence une intensification du transport de poussières africaines. Les images du satellite météorologique européen *Meteosat* (voir la figure 3) étendent ce suivi spatial de plus d'une dizaine d'années.

Nous avons utilisé ces images *Meteosat* pour suivre les concentrations en poussières au-dessus du Nord-Est de l'Atlantique et de la Méditerranée entre juin 1983 et décembre 1994. Plus de 4 000 images ont ainsi été analysées, ce qui constitue la plus grande base de données disponibles pour l'étude des aérosols. Durant cette période, les variations annuelles de l'épaisseur optique dues aux poussières ont atteint 50 pour cent en Atlantique et 300 pour cent en Méditerranée. Dans ces deux régions, les années de transport important (1984, 1989, 1992 et 1993) et les années de transport réduit (entre 1985 et 1987) sont les mêmes, malgré les différences dans les modes de transport et dans les régions sources. Cette correspondance indique que l'in-

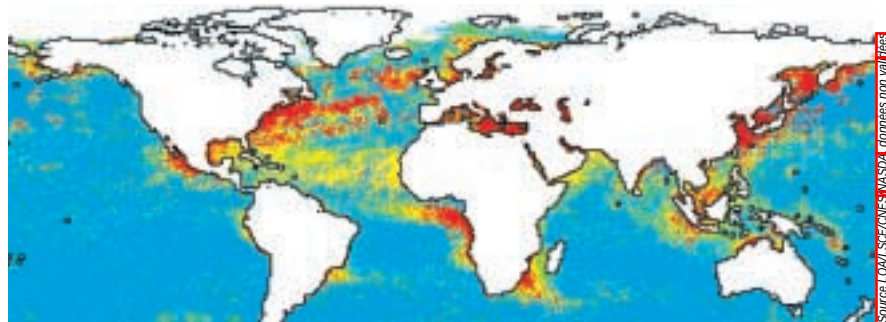
tensité du transport des poussières africaines vers le Nord et vers l'Ouest est commandée par un phénomène de grande échelle.

En combinant ces observations à des données météorologiques, nous avons montré qu'un des phénomènes atmosphériques majeurs de l'hémisphère Nord, l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA), commande le transport des poussières africaines. Ce phéno-

mène est caractérisé par une modification de l'intensité de la dépression d'Islande et de l'anticyclone des Açores. Les années où cette Oscillation Nord-Atlantique est très marquée (forte dépression sur l'Islande et anticyclone des Açores très étendu), les alizés se renforcent sur l'Afrique et l'Atlantique et les précipitations se décalent vers le Nord de l'Europe, ce qui provoque des sécheresses en Afrique du Nord



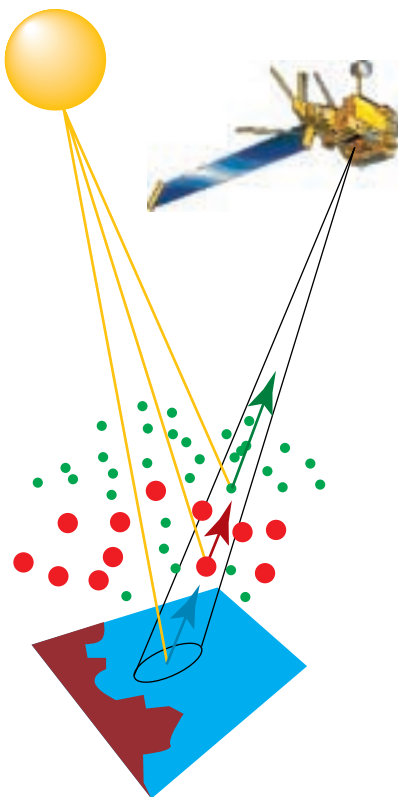
3. SUR CETTE IMAGE prise par le satellite *Meteosat* le 7 mars 1997, un panache de poussières sahariennes se dirige vers l'Amérique du Sud (en rouge, au-dessus de l'Atlantique). Les nuages apparaissent en blanc. Au-dessus des continents, plus le sol est aride, plus l'image est jaune.



4. CARTE MONDIALE des différents aérosols dans l'atmosphère, au-dessus de la mer, obtenue avec le capteur spatial français POLDER, en juin 1997. Les poussières désertiques apparaissent en jaune ; les aérosols émis par l'action de l'homme (sulfates de pollution et suies) sont représentés en rouge, tandis que les aérosols marins, qui occupent une vaste partie de l'atmosphère marine sont colorés en bleu. Les zones vertes correspondent à des zones de mélange entre deux types d'aérosols.

## L'observation spatiale des poussières désertiques

Les satellites détectent les aérosols parce que ceux-ci réfléchissent une partie de la lumière solaire. En l'absence de nuages, la quantité de lumière que reçoit le capteur spa-



tial, à des longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,9 micromètre, provient principalement de la diffusion du rayonnement solaire incident par les molécules de gaz, les poussières et la surface (voir le schéma). Au-dessus de l'océan, dont la surface absorbe la plus grande partie du rayonnement solaire incident, les aérosols diffusent bien le rayonnement solaire, ce qui les rend nettement observables sur les images.

La quantité de lumière réfléchie par le sol ainsi que par les molécules de gaz est modélisée. En soustrayant ces deux contributions à la lumière totale reçue par le capteur, on obtient la quantité de lumière diffusée par les poussières. Moyennant quelques hypothèses sur la taille et sur la forme de ces aérosols, on déduit une concentration atmosphérique intégrée sur la verticale : c'est l'épaisseur optique. Cette méthode n'est pas applicable au-dessus de la Terre, car la contribution du sol à la lumière mesurée par le capteur spatial est si grande qu'elle masque celle des aérosols.

Le capteur nommé POLDER (*POLARization and Directionality of the Earth's Reflectances*), soit « anisotropie et polarisation des réflectances terrestres », mis au point en France, contourne cette difficulté et per-

met l'observation des aérosols au-dessus des continents. Le premier exemplaire de cette série de capteurs spatiaux a été lancé en août 1996, à bord du satellite ADEOS.

Grâce à ces capteurs, on estime précisément les concentrations d'aérosols, non seulement au-dessus des océans, mais aussi, et pour la première fois, au-dessus des continents. Ces estimations sont fondées sur la mesure de la polarisation de la lumière diffusée par le système Terre-atmosphère. La polarisation est une caractéristique facilement mesurable de la lumière. Sur les continents, la polarisation du rayonnement solaire engendrée par la diffusion sur les aérosols ressort clairement par rapport à la diffusion due au sol, qui polarise moins le rayonnement.

De surcroît, les capteurs de type POLDER pouvant observer à plusieurs longueurs d'onde et dans plusieurs directions, ils permettent aussi de différencier les types d'aérosols présents dans l'atmosphère : les différents aérosols ne réfléchissent pas la lumière avec la même intensité aux différentes longueurs d'onde (voir la figure 4). Le suivi global de la concentration des poussières sera bientôt quotidienne.

Pour chaque élément de surface observé par le satellite, les molécules de gaz (en vert), les aérosols (en rouge) et la surface de la mer ou du sol réfléchissent une partie de la lumière solaire incidente vers le capteur. Ce dernier reçoit l'ensemble de ces contributions sous la forme d'une énergie que l'on attribue à l'élément de surface considéré.

et au Sud de l'Europe. Des quantités de poussières supérieures sont alors injectées dans l'atmosphère, car les sols s'érodent plus facilement ; le temps de résidence et la distance de transport de ces particules dans l'atmosphère augmentent, puisque les vents sont plus intenses et le lessivage diminué.

En revanche, lorsque la dépression d'Islande et l'anticyclone des Açores sont faibles (Oscillation Nord-Atlantique faible), les vents chutent sur l'Atlantique et l'Afrique, et les pluies sont plus fréquentes aux latitudes correspondant à la Méditerranée et au Nord de l'Afrique, de sorte que les quantités de poussières transportées diminuent.

Les mesures de poussières au sol, notamment celles qui ont été enregistrées à la Barbade, sont en bon accord avec les résultats de *Meteosat* : les concentrations en poussières à la surface sont corrélées avec celles qui ont été obtenues avec *Meteosat* à l'échelle de l'Atlantique tropical Nord depuis 1983, et aussi avec les variations de l'Oscillation

Nord-Atlantique depuis 1965. Ainsi, les mesures de concentrations effectuées à la Barbade depuis 1965 sont représentatives de l'intensité des émissions de poussières à partir de l'Afrique.

Depuis un siècle, la surface des déserts et la circulation atmosphérique ont peu varié. Toutefois, les données globales indiquent que, depuis 30 ans, les quantités de poussières africaines transportées dans l'atmosphère ont beaucoup augmenté. Ainsi, de petits changements climatiques modifient beaucoup la quantité de poussières transportées. Par rétro-

action, ces poussières perturbent le bilan radiatif et, donc, le climat global. Saurait-on évaluer l'impact à court terme de cette intensification du transport de poussières sur le climat?

Ces mêmes résultats atténuent les travaux qui concluaient à un lien direct entre désertification et quantité de poussières produites : bien qu'un lien reste possible, l'augmentation régulière des concentrations de poussières africaines sur l'Atlantique est principalement due à des phénomènes météorologiques de grande ampleur.

Cyril MOULIN et Claude LAMBERT travaillent au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) du CEA, à Saclay.

J.M. PROSPERO et R.T. NEES, *Impact of the North African Drought and El Niño on Mineral Dust in the Barbados Trade Wind*, in *Nature*, vol. 320, pp. 735-738, 1986.

J.R. PETIT, L. MOUNIER, J. JOUZEL, Y.S. KOROTKEVICH, V.I. KOTLYAKOV, C. LORUS, *Palaeoclimatological and Chro-*

*nological Implications of the Vostok Core Dust Record*, in *Nature*, vol. 343, pp. 56-58, 1990.

I. TEGEN, A.A. LACIS et I. FUNG, *The Influence on Climate Forcing of Mineral Aerosols from Disturbed Soils*, in *Nature*, vol. 380, pp. 419-422, 1996.

C. MOULIN, C.E. LAMBERT, F. DULAC et U. DAYAN, *Control of Atmospheric Export of Dust from North Africa by the North Atlantic Oscillation*, in *Nature*, vol. 387, pp. 691-694, 1997.



# Trafic de caïmans

PETER BRAZAITIS • MYRNA WATANABE • GEORGE AMATO

*Le commerce frauduleux des peaux de caïman illustre combien une «exploitation raisonnable» des espèces menacées est difficile.*

**U**n petit sac à main, brillant, est exposé dans la vitrine d'un magasin de luxe sur l'avenue des Champs-Élysées. D'après son prix, 22 000 francs, il est en peau de crocodile véritable, et non en veau gravé. Toutefois, seuls quelques experts verraient que, si le devant du sac est en alligator de bonne qualité, les côtés ont été réalisés en caïman, moins onéreux ; il n'est d'ailleurs pas exclu que la peau de caïman provienne de peaux de contrebande.

D'après les experts du WWF (le World Wildlife Fund, le Fonds mondial pour la sauvegarde de la nature) qui traquent les trafiquants des produits tirés des animaux sauvages, 1,5 à 2 millions de peaux de crocodiles, d'alligators et de caïmans sont vendues chaque année, mais, en 1993, un million seulement de ces peaux étaient accompagnées de documents officiels qui précisaient leur pays d'origine. Ainsi, près de la moitié des peaux destinées à la fabrication des articles en cuir de luxe proviennent d'animaux sauvages et font l'objet d'un trafic qui viole les lois internationales. La majorité de ces peaux de contrebande sont des peaux de caïman.

Les accessoires en crocodile ont toujours été synonymes de luxe et d'opulence. Quoique toujours en vogue, la peau de crocodile est périodiquement remise à la mode par les stylistes, ce qui provoque un accroissement de la demande tous les quatre ans environ.

Jusqu'en 1993, on n'avait aucune donnée sur le commerce international, légal ou illégal, des peaux de caïmans (on ne dispose d'ailleurs aujourd'hui que des données de 1993). Cette année-là, tandis que les pays «utilisateurs» déclaraient 648 847 peaux importées, les services officiels ne dénombrèrent que 556 132 peaux exportées légalement : à l'évidence, certains documents «officiels» d'importation étaient des faux. Aujourd'hui, on estime que le trafic mondial des peaux des seuls caïmans est de l'ordre d'un million par an : près d'une peau sur trois serait issue de la contrebande !

Le trafic des caïmans est répandu, car il est très lucratif : tandis que la peau du ventre d'un alligator coûte plusieurs milliers de francs, une peau de caïman s'achète moins de 300 francs aux fermiers d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud, ou aux braconniers... alors qu'elle est revendue au prix des peaux de crocodile.

## Confusion d'espèces

La ressemblance des peaux de crocodile et des peaux de caïman aggrave la confusion entre les espèces de reptiliens. Les crocodiliens sont des archosaures, le groupe des reptiles qui domina la Terre il y a 200 millions d'années. La plupart des 23 espèces de crocodiliens sont menacées, parce que leur habitat est détruit et qu'ils sont massivement chassés.

Les crocodiliens se répartissent en trois familles : les Crocodilidés, les Gavialidés et les Alligatoridés. Parmi ces derniers figurent l'alligator d'Amérique, le petit alligator de Chine et le caïman. Les caïmans peuplent les rivières, les fleuves, les lacs, les étangs et les marais des zones tropicales d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud, ainsi que de certaines îles des Caraïbes.

La famille des caïmans comporte trois genres. Dans le premier ne figure

1. LE CAIMAN JACARÉ est la cible favorite des braconniers. Pendant la saison sèche, ces derniers déciment les animaux qui se rassemblent autour de quelques mares peu profondes.



qu'une seule espèce, celle du gigantesque caïman noir, *Melanosuchus niger*, menacé d'extinction. Le second genre, *Paleosuchus*, compte deux espèces, dont les écailles ossifiées et très épaisses empêchent leur utilisation en tannerie. Le troisième genre, *Caïman*, regroupe plusieurs espèces, généralement petites (entre un et trois mètres).

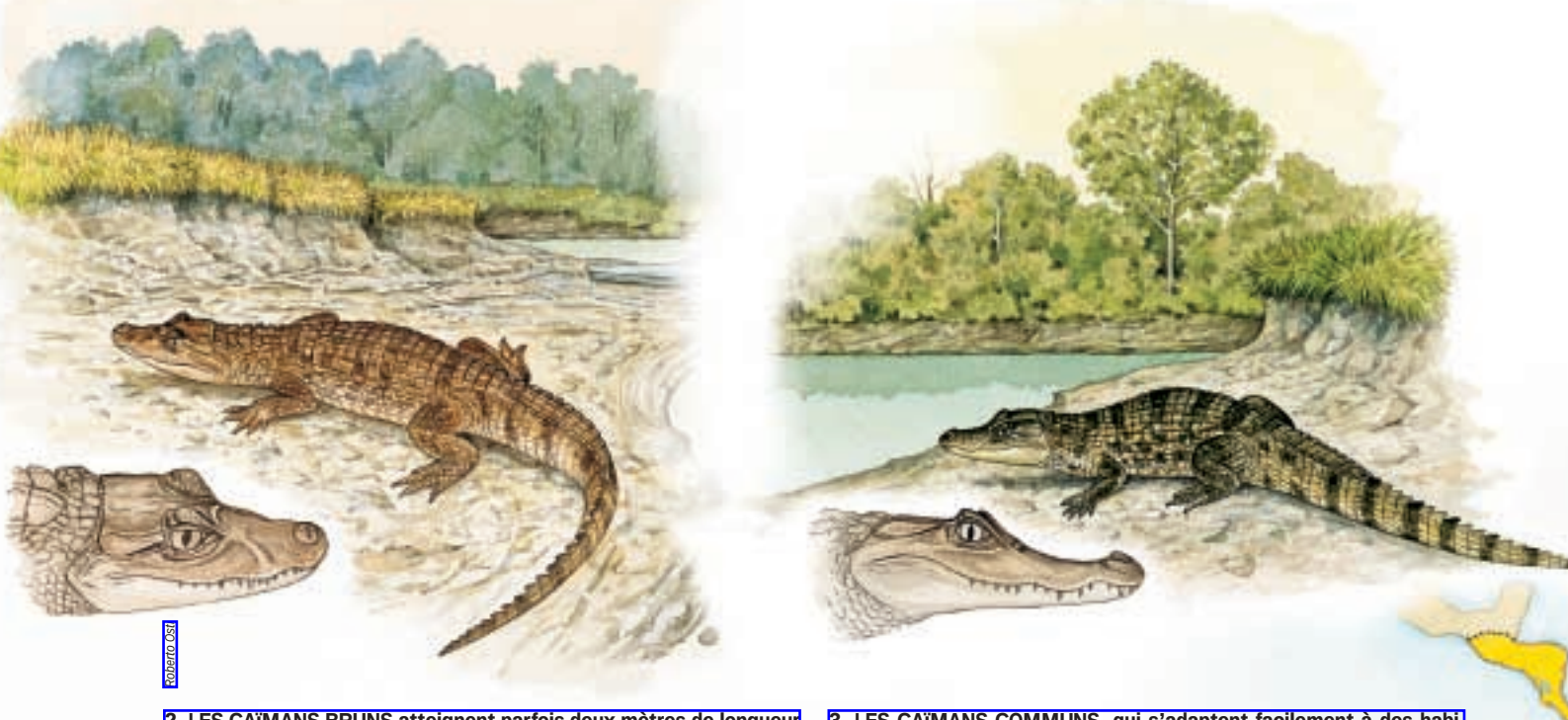
La classification des caïmans a été longtemps controversée. On croyait qu'il n'en existait que deux espèces, mais on ne disposait d'aucune étude fiable de la répartition de ces animaux en Amérique du Sud, ni d'aucune description des motifs de leurs écailles, de leur morphologie ou des caractéristiques de leur ADN. Nous avons alors décidé de faire une analyse statistique des données concernant la diversité de

leur forme, de leurs écailles, de leur couleur et de l'ADN prélevé sur des tissus et du sang de caïmans. Nous avons démontré qu'il existe quatre espèces, et nous avons identifié leurs caractéristiques respectives ; ainsi, les services de répression des fraudes éviteront les confusions, souvent dues à une forte diversité des animaux dans chaque espèce.

Le caïman commun, ou caïman à lunettes *Caiman crocodilus*, vit surtout dans les bassins de drainage de l'Amazonie et de l'Orénoque. Le territoire du caïman brun, *Caiman fuscus*, s'étend

du Mexique au Pérou ; les Andes le séparent du caïman commun. De hauts plateaux et le bouclier brésilien séparent ces deux espèces du caïman Jacaré, *Caiman yacare*. La quatrième espèce, le caïman à museau large, ou *Caiman latirostris*, sillonne les rivières le long des hauts plateaux de l'Est, des régions côtières et des zones tropicales du Nord de l'Amérique du Sud.

Il y a une centaine d'années, ceux qui exploraient le Brésil voyaient, sur les berges de l'Amazonie, un tapis de caïmans serrés les uns contre les autres. Longs de sept mètres, les caï-



Roberto Ozer

**2. LES CAÏMANS BRUNS** atteignent parfois deux mètres de longueur et occupent différents habitats. Jusqu'à présent, ils n'étaient pas très recherchés, car leur cuir est de qualité médiocre. Toutefois, comme les espèces les plus prisées se raréfient, la demande de peaux de caïmans bruns s'accroît. Les populations sauvages de Colombie, d'où proviennent la plupart des peaux, sont en régression.

**3. LES CAÏMANS COMMUNS**, qui s'adaptent facilement à des habitats et à des régimes variés, sont pourtant menacés. Au Brésil, une étude récente a montré que le caïman commun a disparu de certaines régions où il abondait naguère. Ces animaux sont parfois longs de 2,5 mètres. La plupart des peaux légales de caïmans communs viennent du Venezuela, et la majorité des peaux de contrebande du Brésil.

mans noirs pullulaient, happant les imprudents qui s'aventuraient trop près. Aujourd'hui, les caïmans abondent encore dans quelques zones isolées, mais, ailleurs, ils ont été exterminés.

### Des parents attentionnés

La reproduction a lieu pendant la saison humide. Les mâles chantent et délimitent leur territoire, où une ou plusieurs femelles construisent des nids, de deux mètres de largeur et de 50 centimètres de hauteur. Ces nids sont au-dessus du niveau de l'eau, mais à proximité du fleuve. Ils sont constitués d'herbes, de brindilles et de boue, et généralement installés dans d'épais fourrés.

La ponte, de 20 à 30 œufs, a lieu en pleine période des pluies ; les femelles veillent sur les œufs, tandis que les mâles patrouillent aux alentours. En se décomposant, les matières organiques du nid dégagent de la chaleur et incubent les œufs à des températures de 28 à 32 °C ; l'éclosion a lieu après huit à dix semaines. Quand l'éclosion approche et que les petits caïmans, encore dans l'œuf, crient, la femelle déblaye son nid pour libérer les petits et, parfois, elle les transporte avec précaution dans sa gueule jusqu'à une mare voisine.

Les jeunes caïmans restent avec leurs parents presque toute la première année : ils se déplacent souvent juchés sur le dos de leur père ou de leur mère.

Les jeunes et les jeunes adultes se nourrissent d'invertébrés terrestres et, à mesure qu'ils grandissent, de coquillages (comme les jeunes des autres espèces de crocodiliens).

Malgré la vigilance de leurs parents, les jeunes sont souvent la proie d'autres espèces : des tortues, des poissons prédateurs, tels les piranhas, des oiseaux aquatiques et des serpents qui chassent les très jeunes caïmans. D'après les études des alligators américains sauvages, plus de la moitié des jeunes seraient tués par des prédateurs.

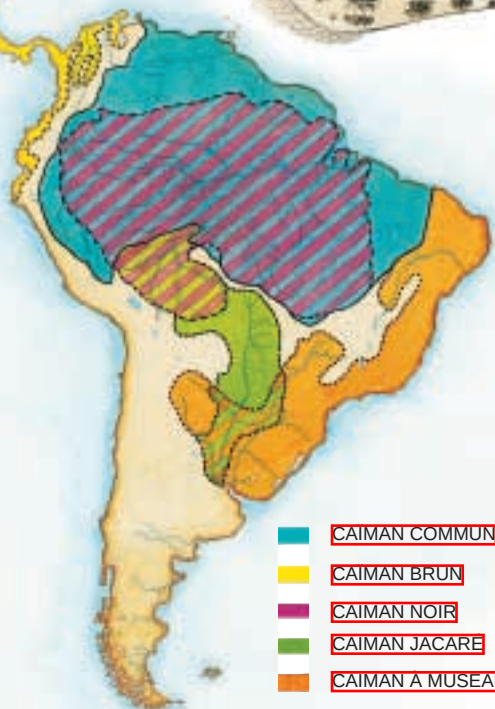
Les caïmans adultes mangent des poissons (que l'homme ne mange pas), tels les poissons-chats cuirassés et certaines anguilles, ainsi que des espèces dangereuses, tels les piranhas. En outre, les caïmans adaptent leur régime aux ressources disponibles, ce qui est un atout dans un environnement où les ressources en eau et en nourriture varient beaucoup au cours de l'année : pendant la saison des pluies, les caïmans gagnent les marais et les forêts ; pendant la saison sèche, ils creusent les quelques mares qui restent et s'y rassemblent. Ce faisant, ils se fabriquent un habitat, mais ils offrent aussi un refuge aux poissons, aux amphibiens, aux invertébrés aquatiques et à diverses plantes aquatiques. Ces mares sont souvent les seules sources de nourriture aquatique, et les oiseaux migrateurs y trouvent des poissons et de petits invertébrés.

Quand les caïmans ne sont pas dévorés par les boas ou tués par des maladies, ils vivent plus de 60 ans. Toutefois, la prédation humaine est sans conteste la menace la plus lourde : les animaux de taille moyenne sont tués pour être consommés, les animaux les plus grands le sont pour leur peau.

D'après un rapport de l'Union internationale pour la préservation de la nature, l'IUCN, les populations sauvages de caïmans déclinent dans la moitié des 16 pays où ils vivent. Les caïmans Jacaré, les caïmans à museau large, et les caïmans noirs disparaissent de tous les pays où ils vivent, parce que l'homme détruit leurs zones d'habitat et que les braconniers les traquent depuis près de 50 ans.

De nombreux animaux sauvages, y compris des caïmans, sont vendus vivants comme animaux de compagnie, ou sont tués pour leur viande, leur peau et d'autres sous-produits. Le commerce international de ces animaux est soumis à la Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (la CITES) et à diverses lois promulguées par les pays concernés. Les animaux sont classés en trois groupes : ceux de l'annexe I, dont le commerce international est interdit ; ceux de l'annexe II, dont le commerce n'est autorisé qu'avec les documents officiels ; ceux de l'annexe III, commercialisables sans limites. Le caï-

4. LES CAÏMANS NOIRS, qui atteignent six mètres, attaquent parfois les imprudents qui s'en approchent. En revanche, comme ils n'ont pas peur de l'homme, des chasseurs les approchent et les tuent facilement. Ils ont besoin d'un habitat très spécifique : des rivières dégagées ou des bras morts bordés par une végétation dense. Ils commencent à se reproduire à l'âge de 12 ans, ce qui est assez vieux : ils se reproduisent trop lentement pour qu'une population décimée se renouvelle.



- CAIMAN COMMUN
- CAIMAN BRUN
- CAIMAN NOIR
- CAIMAN JACARÉ
- CAIMAN A MUSEAU LARGE

man à museau large, le caïman *Rio Apaporis* (une sous-espèce du caïman commun) et le caïman noir font partie des espèces de l'annexe I, et les autres caïmans de l'annexe II.

En pratique, le légal et l'illégal se mêlent. Beaucoup de peaux, accompagnées d'attestations officielles, proviennent de pays où les animaux dont la peau provient ne vivent pas ! Ainsi des peaux sont exportées de Colombie et déclarées comme étant celles de caïmans communs, alors qu'elles proviennent de caïmans Jacaré, qui ne vivent pas en Colombie. De surcroît, des documents illégaux font eux-mêmes l'objet de trafics : certains formulaires officiels d'exportation sont volés et revendus aux contrebandiers.

5. LES CAÏMANS A MUSEAU LARGE ont presque disparu à cause de la destruction de leur habitat, de la pollution, et parce que leurs peaux donnent un cuir souple recherché. Ces animaux atteignent 2,3 mètres. On connaît mal leurs comportements naturels, car ils sont difficiles à localiser. Bien que leur commerce soit interdit, ils sont élevés dans des fermes, en Argentine.

6. LES CAÏMANS JACARÉ atteignent 2,5 mètres de longueur. Ils constituent la source essentielle des peaux de crocodiliens destinées à l'industrie du cuir. Le commerce en est interdit aux États-Unis, mais leur importation risque d'être bientôt autorisée : les populations sauvages sont en déclin.

Quand les services de protection de la nature saisissent des peaux de caïman ou d'autres produits introduits en fraude, ils font souvent appel à des spécialistes des caïmans afin qu'ils identifient les provenances des échantillons (il y en a parfois des milliers). Ce n'est pas une tâche aisée, car les caïmans Jacaré et les nombreuses sous-espèces du caïman commun ont des peaux qui se ressemblent beaucoup. Quand les peaux sont tannées et teintes, les motifs colorés caractéristiques de chacune des espèces disparaissent. De surcroît, les assemblages de morceaux de plusieurs peaux gommement les caractéristiques qui auraient permis l'identification des peaux entières.

En 1969, l'un d'entre nous (Peter Brazaitis) et ses collègues commencèrent à recenser des indices pour différencier les espèces ; en 1984, le problème était partiellement résolu. Ainsi, les

écailles du ventre des caïmans contiennent des plaques osseuses épaisses, les ostéodermes, dont sont dépourvus les autres crocodiliens. Les flancs et les côtés de la queue sont moins ossifiés et donnent un cuir souple.

Au milieu des années 1980, plusieurs groupes de protection de la nature et quelques gouvernements ont entrepris un ambitieux programme visant à identifier et à dénombrer les populations de caïmans au Brésil, en Bolivie et au Paraguay. L'équipe chargée du travail localisait les caïmans et récoltait du sang et des fragments de muscle, de peau et de divers tissus ; on comparait ainsi les animaux sauvages, certains animaux destinés à la consommation locale ou encore des animaux en train de mourir à cause de la pollution ou de blessures infligées par des chasseurs (les animaux sauvages étaient capturés et relâchés après les tests ; les animaux

trop gravement atteints étaient tués). Ces échantillons de tissus servent aujourd'hui à classer les caïmans et à identifier les peaux non tannées ; bientôt, on utilisera l'ADN pour identifier le cuir tanné des espèces menacées.

Nous avons constaté qu'en cinq ans seulement certaines populations de caïmans repérées au début de l'étude avaient entièrement disparu. Dans plusieurs groupes, les adultes étaient rares et l'on comptait surtout des animaux très jeunes. Nous avons observé ces populations tant pendant la saison pluvieuse, quand les caïmans sont dispersés dans toutes les voies d'eau, que pendant la saison sèche, lorsqu'ils se rassemblent autour des rares mares. Les caïmans adultes seront-ils en nombre suffisant pour perpétuer l'espèce ? Les jeunes, sans la protection de leurs parents, survivront-ils ? Ces questions restent ouvertes, mais tout l'équilibre écologique de la région est menacé : les trous d'eau que les caïmans creusent en période sèche sont souvent l'unique source de nourriture pour les oiseaux migrateurs et pour les mammifères. La diminution du nombre des caïmans entraînera la raréfaction d'autres espèces.

Enfin, l'étude a révélé un autre aspect écologique : la pollution par les métaux lourds. Des biologistes brésiliens avaient observé qu'en Amazonie presque toutes les espèces de poissons mangés par les caïmans et par les hommes contenaient des concentrations élevées en mercure (cet élément est utilisé pour l'extraction de l'or avec lequel il forme des amalgames) ; nos tests ont confirmé la contamination des habitats de caïmans par le mercure, mais ils ont montré de surcroît que certains tissus de caïmans étaient contaminés par le plomb. On ignore les effets du mercure et du plomb sur les caïmans, mais ces métaux sont vraisemblablement aussi nocifs pour les caïmans que pour l'homme.

## Une ferme de crocodiles en France

L'Europe aussi a sa ferme d'élevage de crocodiles. Ou plutôt la France, puisque cette ferme est située à Pierrelatte, dans la Drôme, où une serre de 6 700 mètres carrés abrite, depuis près de quatre ans, plus de 600 variétés de plantes tropicales et environ 400 crocodiliens de huit espèces différentes. Parmi eux, de nombreux représentants de l'espèce *Crocodylus*, qui vivent en Afrique et à Madagascar, et qui sont particulièrement menacés (notamment *Crocodylus niloticus*, les crocodiles du Nil). Contrairement aux fermes américaines, celle de Pierrelatte n'est pas une ferme de production ni de peau ni de viande (la consommation de la chair de crocodiliens a été interdite dans les années 1970, après l'importation de viande contaminée par des salmonelles).

La ferme a un objectif pédagogique et un objectif scientifique, puisque les biologistes peuvent étudier ces grands reptiles dans un milieu quasi naturel. Enfin, troisième objectif, cette ferme a un rôle de protection des espèces menacées : nous élevons des crocodiles que nous pensons relâcher dans leur milieu naturel (par exemple *Crocodylus niloticus*) et nous participerons à des programmes de gestion des populations

sauvages de crocodiles en Afrique de l'Ouest. Enfin, nous sommes particulièrement concernés par la protection des crocodiliens français, les caïmans de Guyane.

Quatre espèces de caïmans y vivent : le caïman commun (*Caïman Crocodylus*), deux espèces de caïmans nains (*Paleosuchus palpebrosus* et *Paleosuchus trigonatus*) et le caïman noir (*Melanosuchus niger*). Elles ont presque disparu de la bande côtière où, il y a une quinzaine d'années, elles abondaient. La multiplication des habitations, les routes qui s'enfoncent de plus en plus profondément dans la jungle, la chasse visant à approvisionner les restaurants ou la chasse « sportive » ont mis à mal les populations sauvages. La situation du caïman noir est particulièrement critique : il est localisé dans les marais de Kaw, mais sa grande taille en fait une cible facile. Les textes ne suffisent pas à le protéger. Un programme d'élevage et de reproduction, auquel participeraient les habitants du village de Kaw, semble indispensable à la réintroduction de ce caïman dans les marais d'où il a quasiment disparu.

Luc FOUGEIROL,  
La Ferme aux crocodiles, Pierrelatte

## Une exploitation incontrôlée

Aujourd'hui, de nombreux biologistes luttent pour obtenir « une exploitation viable » des crocodiliens, c'est-à-dire une exploitation de l'espèce qui, parce qu'on la préserve, sauvegarde simultanément l'économie locale. Ce principe s'applique à certaines essences d'arbres, aux éléphants (recherchés pour leur ivoire),

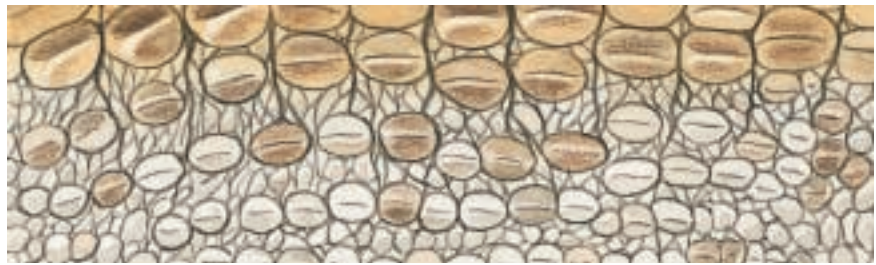
aux baleines (pour leur chair), à toutes les espèces menacées d'extinction. Pour les crocodiliens, il faut limiter leur utilisation comme objets de luxe et la consommation de leur chair.

Aujourd'hui, en Amérique du Sud, les investisseurs et les propriétaires terriens cherchent à promouvoir la construction de fermes d'élevage de caïmans, afin de produire des peaux qui seront exportées légalement. Pour créer une ferme, on doit capturer des animaux adultes sauvages vivants, puis les habituer à vivre et à se reproduire en captivité. Bien gérée, une ferme devrait ensuite fonctionner en circuit fermé, sans la capture d'autres animaux : les crocodiles nés dans la ferme devraient assurer à la fois la multiplication des animaux et la production de peaux et de viande. Les éleveurs peuvent aussi ramasser les œufs éparpillés dans la nature et les placer en incubateurs jusqu'à l'éclosion, ou bien capturer des couvées ; les jeunes sont alors élevés dans des ranchs jusqu'à ce qu'ils donnent des peaux de un mètre de longueur environ. Dans ce cas, les fermiers semblent avoir intérêt à préserver les zones d'habitation du caïman, où ils ramassent les œufs ou les jeunes.

Malheureusement, la réalité est toute autre. Le Brésil compte déjà 75 élevages officiels, mais, si quelques fermes et ranchs ont des bassins et des bâtiments bien aménagés pour les caïmans, d'autres ne sont que de vastes étendues clôturées par leur propriétaire : les caïmans qui y vivent sont souvent destinés au trafic, car ces «fermes» ou ces «ranchs» mal surveillés deviennent des sites de «blanchiment» d'animaux sauvages de contrebande.

Ainsi, nous avons eu la preuve indirecte que certains animaux de ferme sont en réalité des animaux sauvages : l'un d'entre nous a récemment examiné une cargaison de peaux de caïmans dont les documents officiels attestaient qu'ils venaient de fermes colombiennes. Les peaux, longues parfois de 1,6 mètre, provenaient manifestement d'animaux beaucoup plus grands et avaient une anomalie étonnante : l'extrémité de la queue d'un animal sur quatre avait repoussé après avoir été arrachée. Si, dans la nature, près de la moitié des jeunes caïmans perdent le bout de leur queue à cause de prédateurs, cela arrive rarement dans une ferme, qui cherche à produire des peaux parfaites. De plus, les animaux d'élevage sont

CAIMAN BRUN



CAIMAN COMMUN



CAIMAN NOIR



CAIMAN A MUSEAU LARGE



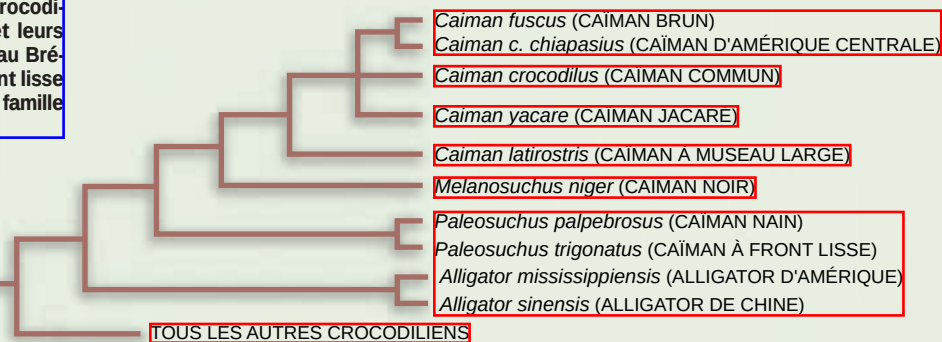
CAIMAN JACARÉ



7. LES MOTIFS DES ÉCAILLES couvrant les flancs des caïmans sont spécifiques des espèces. Les caïmans bruns ont des rangées uniformes d'écaillles ovales qui alternent avec des rangées de petites écaillles en forme de graines. Les caïmans communs ont des flancs étroits avec de grosses écaillles fermement implantées et disposées en rangées, séparées par de la peau douce et plissée, et par de minuscules écaillles. Les caïmans noirs ont de larges flancs portant de nombreuses rangées d'écaillles légèrement allongées et assez mal implantées ; le cuir le plus doux de ces animaux est celui du ventre, lisse et blanc. Les caïmans à museau large ont quelques rangées de grandes écaillles osseuses, qui alternent avec de petites écaillles osseuses. Les caïmans Jacaré ont de larges flancs couverts d'écaillles lisses et rondes, disposées en rangées serrées séparées par de la peau plissée. Pour tous les motifs de peaux représentés ici, la tête de l'animal est dirigée vers la gauche.

8. L'ARBRE PHYLOGENIQUE des crocodiliens a été établi par les auteurs et leurs collègues après une étude menée au Brésil. Le caïman nain et le caïman à front lisse font partie d'un genre séparé, dans la famille des caïmans.

S. V. M. 1998



généralement commercialisés avant d'avoir atteint 1,5 mètre.

Le commerce des crocodiliens d'élevage devrait être une source de revenus qui seraient en partie réutilisés pour la préservation de la nature, mais les pays qui, jusqu'à présent, se préoccupaient peu de la biodiversité changeront-ils leurs habitudes du jour au lendemain? Les investisseurs doivent nourrir, soigner et élever une couvée pendant trois ans environ, jusqu'à ce que les animaux aient une taille suffisante pour le marché; ils sont alors bénéficiaires en les vendant 300 francs. Toutefois, les écologistes doutent que les revenus de la vente des peaux servent à la préservation de l'habitat et des populations sauvages.

Lorsqu'une espèce interdite à la vente est commercialisée, le marché se développe. En l'absence de législation claire et de contrôles internationaux efficaces, on cherche surtout à endiguer la fraude. Le caïman noir, particulièrement menacé et élevé dans des fermes en Équateur, sera vraisemblablement bientôt admis dans le circuit commercial international, et l'on sera alors incapable de maîtriser le trafic des peaux de caïmans noirs de contrebande provenant d'animaux sauvages bon marché. Ces animaux se reproduisent lentement, ils sont faciles à tuer et ne vivent que dans des habitats très spécifiques; une fois qu'ils en ont été retirés, ils y retournent rarement. Lorsque ce commerce commença, les populations sauvages de cette espèce devront être étroitement protégées, mais aucun programme de surveillance n'a encore commencé.

Quand un pays autorise l'élevage d'animaux sauvages, tous les fonds disponibles sont consacrés à l'activité de fermage, mais l'habitat n'est pas toujours préservé. Seuls sont protégés les animaux qui ont une valeur

commerciale, mais on oublie les autres composantes de l'écosystème dont ils font partie. En Chine, par exemple, l'élevage de l'alligator de Chine a commencé en 1979, mais si cet élevage est aujourd'hui florissant, l'alligator sauvage disparaît progressivement (il reste moins de 1 000 animaux sauvages). De surcroît, la population sauvage ne pourra être régénérée par la population d'élevage, car l'habitat naturel a été totalement détruit.

En théorie, une espèce particulièrement menacée pourrait être élevée dans des fermes et, ensuite, remise en liberté. Cela s'est produit en Inde, où les populations de crocodiles marins, de crocodiles des marais et de gavials ont été ainsi reconstituées. Toutefois, en Inde, les lois qui protègent les animaux sauvages et les réserves naturelles interdisent le commerce des crocodiliens sont souvent mieux respectées que dans d'autres pays.

### Question de science

La recherche sur la biologie des crocodiles est encouragée par les propriétaires d'élevages et, surtout, par les industriels du cuir. La recherche fondamentale dépend presque exclusivement des subventions de l'industrie, et l'on s'interroge : les chercheurs auront-ils suffisamment d'indépendance pour que les espèces menacées soient préservées efficacement?

Selon les industriels, l'exploitation accrue d'une espèce favorisera leur protection. Ainsi, un quota annuel d'exportation de 600 000 peaux de caïmans a été accordé à la Colombie, qui en produit aujourd'hui environ 450 000 (surtout *Caiman fuscus*) : la Colombie pourra augmenter ses exportations de caïmans grâce à la production des élevages.

Depuis le milieu des années 1980, les industriels du cuir de crocodiliens

ont multiplié leurs efforts pour que le caïman Jacaré soit supprimé de la liste des espèces menacées (il y a été placé en 1973, et son commerce a été interdit aux États-Unis). Leurs premières tentatives ont échoué, mais ils poursuivent leurs efforts en utilisant des arguments plus ou moins fallacieux, alors même que nous avons démontré que les populations sauvages de Jacaré (et des autres espèces de caïmans) continuent à diminuer.

Tandis que les professionnels veulent que toutes les espèces de crocodiliens soient commercialisables, on ne sait toujours pas reconnaître la peau d'un animal élevé en toute légalité et la peau d'une bête sauvage «protégée» qui a été assommée pendant qu'elle dormait au soleil près d'une mare. Les caïmans sauvages d'Amérique du Sud et d'Amérique centrale risquent de devenir bientôt des reliques présentées dans les musées sous forme de porte-monnaie.

Peter BRAIZATIS est un herpétologue de la Société pour la conservation de la nature, à New York, depuis 43 ans. Myrna WATANABE, sa femme, étudie le comportement des animaux. George AMATO dirige le département de génétique de la Société pour la conservation de la nature.

Peter BRAZAITIS, *Reptile Leather Trade: The Forensic Science Examiner's Role in Litigation and Wildlife Law Enforcement*, in *Journal of Forensic Science*, vol. 31, pp. 621-629, 1986.

*Crocodiles and Alligators*, sous la direction de Charles A. Ross, Facts on File, 1989.

George H. REBÊLO, Carlos YAMASHITA, Elizabeth A. ODIERNA et Myrna E. WATANABE, *Threats to Brazilian Crocodilian Populations*, in *Oryx*, vol. 30, n° 4, pp. 275-284, 1996.



# La condensation de Bose-Einstein

ERIC CORNELL • CARL WIEMAN

*La concrétisation d'un vieux rêve de physiciens rapprochera le monde quantique de notre vie quotidienne.*

**E**n juin 1995, nous avons réussi à créer une minuscule gouttelette aux propriétés remarquables. En refroidissant 2 000 atomes de rubidium à une température inférieure à 100 milliardièmes de degré au-dessus du zéro absolu (100 milliardièmes de kelvin), nous avons fait perdre aux atomes leur individualité : ayant toutes leurs propriétés identiques, mouvement compris, ils se sont alors comportés comme un unique «superatome». Ce condensat de Bose-Einstein, où les atomes se meuvent à l'unisson, ressemble à un faisceau laser, où les photons forment un paquet homogène.

Notre condensat, dont la durée de vie n'excéda pas dix secondes, était la confirmation expérimentale d'une prévision théorique faite il y a 70 ans par Albert Einstein et par Satyendranath Bose. À température ordinaire, les atomes d'un gaz dans un récipient bougent constamment ; certains ont une énergie élevée et une grande vitesse, tandis que d'autres ont une énergie faible. En poursuivant le travail de Bose, Einstein a montré que, dans un échantillon d'atomes suffisamment refroidis, une grande partie d'entre eux s'accumule dans l'état d'énergie minimale. Ils sont alors tous décrits par la même fonction d'onde atomique, c'est-à-dire qu'ils ont tous les mêmes propriétés physiques (position, vitesse, etc.).

L'obtention du premier condensat de Bose-Einstein passionna les physiciens. Si les esprits furent d'abord marqués par l'achèvement d'une longue quête et par la confirmation expérimentale de la prévision d'Einstein, la condensation de Bose-Einstein fascine aujourd'hui parce qu'elle est une fenêtre macroscopique sur le monde

étrange de la mécanique quantique. Cette théorie stipule que les particules élémentaires, tels les électrons, se comportent, selon les cas, comme des particules ou comme des ondes ; elle décrit des comportements qui échappent à l'intuition.

Les effets quantiques sont rarement observables dans les systèmes macroscopiques, parce que les aspects ondulatoires sont masqués par les contributions mutuellement incohérentes des innombrables particules qui constituent la matière. En revanche, dans un condensat de Bose-Einstein, les contributions ondulatoires de tous les atomes sont exactement en phase. Les ondes quantiques s'étendent alors dans tout l'échantillon et deviennent visibles à l'œil nu. Le microscopique est ainsi rendu macroscopique.

## Nouvel éclairage sur de vieux paradoxes

L'obtention de condensats de Bose-Einstein éclaire d'un jour nouveau de vieux paradoxes de la mécanique quantique. Par exemple, lorsque deux atomes sont dans un même état quantique, comme c'est le cas dans un condensat, aucune mesure ne permet de les discerner. Les deux atomes occupent le même volume de l'espace, se déplacent à la même vitesse, diffusent la lumière de la même façon, etc.

Notre expérience quotidienne, qui nous met en contact seulement avec la matière à température ordinaire, ne nous permet pas de comprendre cette situation quantique paradoxale : aux températures et aux échelles de longueur de notre vie quotidienne, on peut décrire l'état d'un système par

**1. CE PIÈGE ATOMIQUE** refroidit et piège les atomes par deux mécanismes mis en œuvre successivement. D'abord, six faisceaux laser (en rouge) refroidissent les atomes, qui sont initialement à température ambiante, en les regroupant au centre de la cellule de verre où l'on a fait le vide. Ensuite, on éteint les faisceaux laser et l'on met sous tension les bobines magnétiques (de couleur cuivre). Le courant circulant dans les bobines crée un champ magnétique qui augmente le confinement de la plupart des atomes, les autres atomes (les plus énergiques) s'échappant du piège. Puis, à mesure des chocs dans le piège, l'énergie des atomes piégés se redistribue. Comme l'énergie moyenne a diminué, les atomes se sont refroidis. Ce mécanisme conduit progressivement à l'accumulation d'un grand nombre d'atomes dans l'état d'énergie minimale autorisée par les lois de la mécanique quantique. Ces atomes forment alors une seule entité : le condensat de Bose-Einstein.

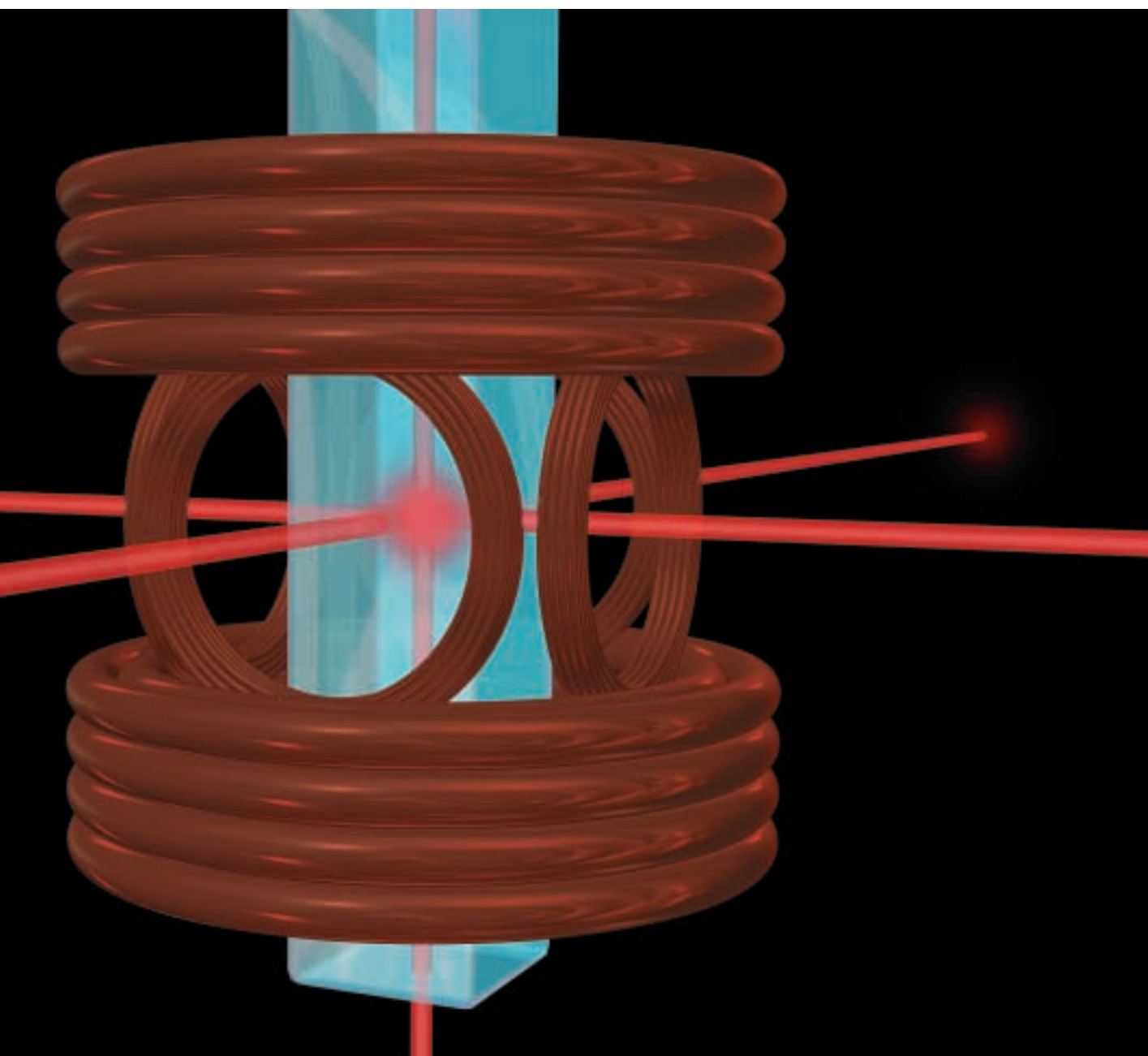
la position et la vitesse de chacun de ses éléments. Par exemple, le tirage du loto n'est possible que parce que l'on peut discerner les balles numérotées qui rebondissent dans un tambour en rotation et sortent les unes après les autres dans une rigole.

Toutefois, aux très basses températures ou aux petites échelles de longueur, la mécanique classique ne décrit plus correctement le phénomène. Les atomes ne se comportent pas comme des boules de loto. On ne peut pas connaître la position exacte de chaque atome, qu'il vaut mieux se représenter comme une tache aux contours flous. Cette tache – que l'on nomme un

paquet d'ondes – est la région de l'espace où la probabilité de trouver l'atome est maximale. Lorsque l'on refroidit des atomes, la taille de leur paquet d'ondes augmente. Tant que les paquets d'ondes restent séparés, on peut, du moins en principe, distinguer les positions des atomes, mais, lorsque la température est suffisamment basse, les paquets d'ondes des atomes se recouvrent ; les atomes se «condensent» dans l'état d'énergie minimale, et les différents paquets d'ondes fusionnent en un seul paquet macroscopique. Les atomes subissent ainsi une crise d'identité quantique : ils deviennent mutuellement indiscernables.

Quelle différence entre l'engouement actuel pour ces condensats et le scepticisme qui avait suivi la prédiction d'Einstein en 1925! C'est probablement parce qu'on ne savait pas atteindre les très basses températures nécessaires que la condensation prédite avait semblé une curiosité douteuse ou, au mieux, sans intérêt physique : les régions les plus froides de l'espace intergalactique n'étaient-elles pas des millions de fois trop chaudes pour y observer la condensation de Bose-Einstein?

Toutefois, dans les décennies qui ont suivi la prévision théorique, la condensation de Bose-Einstein est



devenue d'actualité, parce que des physiciens ont compris qu'elle expliquait la superfluidité de l'hélium liquide, qui se produit à des températures bien supérieures à celles de la condensation dans les gaz : au-dessous de 2,2 kelvins, la viscosité de l'hélium liquide s'annule.

C'est seulement à la fin des années 1970 que les progrès en physique du froid rendirent envisageable le test expérimental de l'idée originelle d'Einstein. Cependant, les physiciens étaient confrontés à une difficulté fondamentale : pour obtenir un condensat gazeux, ils devaient refroidir le gaz à une température bien inférieure à sa température de solidification. Ils espéraient qu'une telle sursaturation d'un gaz serait possible avec de l'hydrogène, car les atomes de cet élément s'appariaient peu quand on les refroidit.

Bien que diverses équipes, à Boston, Amsterdam ou Paris, n'aient pas encore obtenu la condensation de Bose-Einstein avec l'hydrogène, les physiciens ont compris les difficultés et ont inventé des procédés astucieux pour les contourner. En 1989, éclairés par ces études et encouragés par nos propres travaux sur le refroidissement et le piégeage d'atomes d'éléments alcalins (la famille du lithium : sodium, césium, rubidium, etc.) par laser, nous avons soupçonné que les atomes de ces éléments seraient de bien meilleurs candidats que l'hydrogène : ils s'associent

aussi peu que les atomes d'hydrogène, et ils devaient se condenser bien plus rapidement. En effet, ces atomes plus gros se heurtent plus fréquemment que des atomes légers, ce qui leur permet d'échanger de l'énergie, et donc de se refroidir, plus vite. Ainsi, la condensation pouvait avoir lieu avant que des paires ne se forment et que le gaz ne se solidifie.

L'obtention de températures très basses semblait alors relativement simple et peu onéreuse : il suffisait de combiner les techniques de refroidissement et de piégeage par laser mises au point sur les alcalins, et les techniques de piégeage magnétique et de refroidissement par évaporation mises au point sur l'hydrogène.

Finalement, nous arrivâmes au but en utilisant des atomes de rubidium et, quelques mois plus tard, Wolfgang Ketterle et ses collègues de l'Institut de technologie du Massachusetts obtinrent un condensat d'atomes de sodium ; depuis, le groupe de W. Ketterle a réussi à condenser dix millions d'atomes. Au moment où nous écrivons ces lignes, huit équipes au moins ont obtenu un condensat, cinq avec du rubidium, deux avec du sodium et une avec du lithium. Notamment, à l'École normale supérieure de Paris, l'équipe de Jean Dalibard vient d'obtenir un condensat de rubidium après avoir essayé, sans succès, de condenser du césium. Si le césium ne se condense

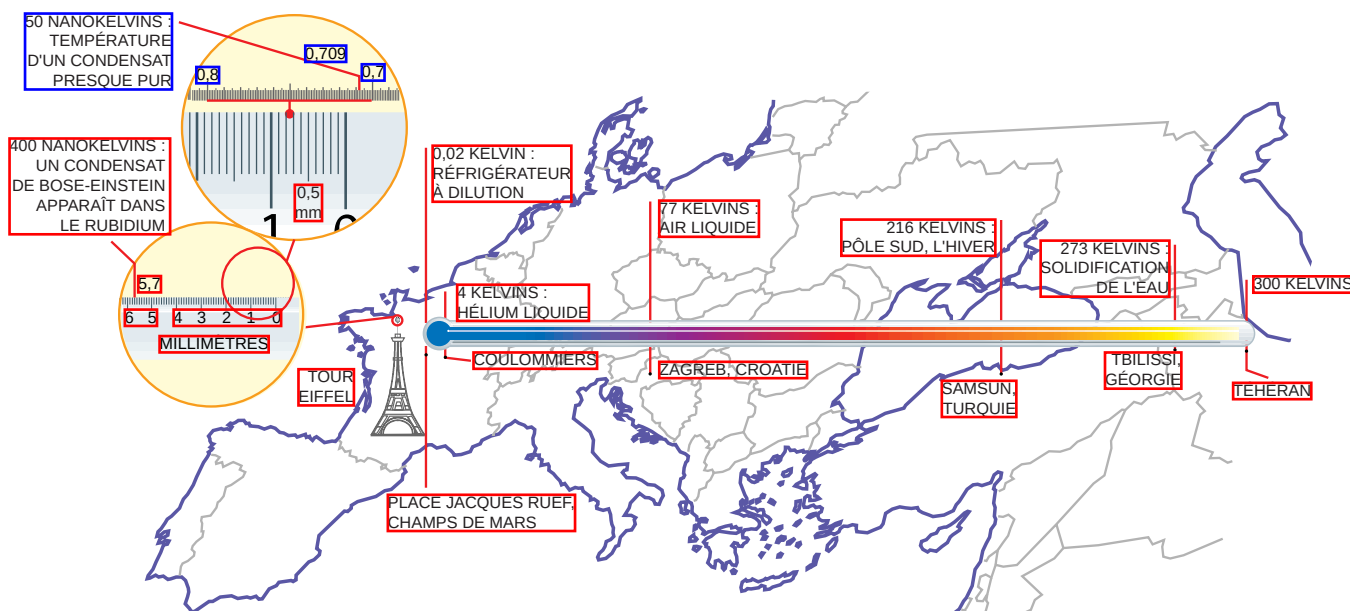
pas, c'est en raison de collisions particulières qui chauffent le gaz plus vite qu'il ne le refroidit.

Toutes ces équipes utilisent le même principe expérimental : on extrait de la chaleur de l'échantillon tout en l'isolant de l'extérieur. Ces deux conditions sont satisfaites dans chacune des deux étapes utilisées : lors du refroidissement par laser, la force exercée par le rayonnement laser sur les atomes les refroidit et les isole ; puis nous piégeons les atomes par des champs magnétiques, et les refroidissons par évaporation.

## Refroidissement et piégeage par laser

Le cœur de notre montage expérimental est une petite boîte de verre entourée de bobines de fil électrique (voir la figure 1). Cette cellule, où nous faisons un vide poussé, est comme une bouteille Thermos très efficace. Nous y introduisons une minuscule quantité de rubidium gazeux, que nous éclairons par six faisceaux laser, qui se croisent au centre de la cellule. Comme nous n'avons pas besoin d'une forte intensité lumineuse, nous utilisons des diodes laser similaires à celles des lecteurs de disques compacts.

Nous réglons la fréquence du laser de sorte que les atomes absorbent son rayonnement et réémettent des photons. Lors de chaque absorption d'un photon (il peut y en avoir des mil-



2. CE THERMOMETRE GEANT montre les températures extrêmement basses que l'on doit atteindre pour observer la condensation. Imaginons qu'il mesure 4 200 kilomètres de long. Si nous plaçons la graduation du zéro absolu (zéro kelvin, soit  $-273,15^{\circ}\text{C}$ )

au sommet de la Tour Eiffel et la graduation des 300 kelvins ( $27^{\circ}\text{C}$ ) à Téhéran. La graduation de la température de la solidification de l'eau est à Tbilissi, en Géorgie. Celle d'un condensat presque pur est alors à seulement 0,709 millimètre du point zéro.

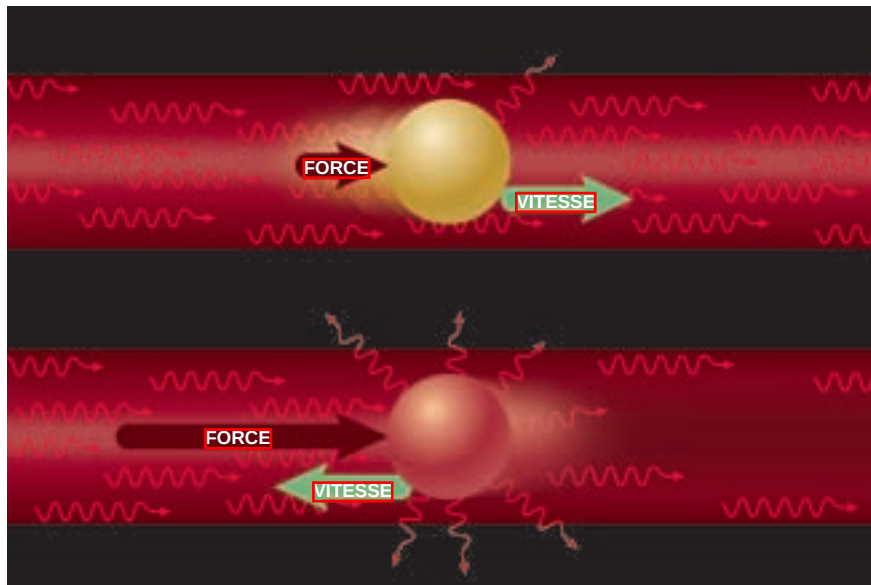
lions chaque seconde), l'atome recule légèrement dans la direction opposée à la direction d'incidence des photons. Ce recul résulte de la pression de radiation. On refroidit le gaz en forçant les atomes à absorber majoritairement des photons de direction opposée à leur vitesse. Ainsi la vitesse d'agitation est réduite, et les atomes sont refroidis. On obtient ce refroidissement en réglant la fréquence laser par rapport à la fréquence de résonance des atomes (voir la figure 3).

Dans notre dispositif expérimental, la lumière laser ne refroidit pas uniquement les atomes, elle les piège aussi en les maintenant à l'écart des parois de la cellule, qui sont à température ambiante. Ce mécanisme de piégeage, qui s'oppose à la diffusion des atomes en dehors du centre de la cellule, repose lui aussi sur la pression de radiation. À l'aide d'un faible champ magnétique, nous décalons légèrement la fréquence de résonance des atomes, afin qu'ils absorbent préférentiellement les photons qui se propagent vers le centre de la cellule, où se croisent les six faisceaux laser. Au total, la pression de radiation pousse tous les atomes vers ce point et les y maintient.

Ainsi notre piège laser se charge en une minute de dix millions d'atomes qui proviennent de la vapeur de rubidium de la cellule, qui est à la température ambiante. Ces atomes piégés sont à une température d'environ 40 milliardièmes de degrés au-dessus du zéro absolu. Cette température, qui serait considérée comme extraordinairement basse dans la plupart des situations, est encore 100 fois supérieure à la température de condensation cherchée, mais la limite du refroidissement par laser est alors atteinte : le mouvement brownien imposé aux atomes par les innombrables impacts de photons empêche l'obtention d'un gaz plus froid ou plus dense.

## Refroidissement par évaporation

Pour dépasser cette limite, nous éteignons les lasers et passons à la seconde étape du refroidissement : nous utilisons les techniques de piégeage magnétique et de refroidissement par évaporation mises au point par ceux qui étudiaient la condensation de l'hydrogène. Le fonctionnement du piège magnétique est fondé sur les propriétés magnétiques des atomes : chaque



**3. LE REFROIDISSEMENT D'ATOMES** par laser utilise la pression de radiation créée par les impacts répétés des photons sur les atomes. En raison de l'effet Doppler (analogue au changement de son d'une ambulance quand elle s'éloigne après s'être approchée), un atome de vitesse opposée à la direction de propagation d'un faisceau laser absorbe des photons de fréquence supérieure à celle des photons absorbés par un atome qui se déplace dans le sens du faisceau. Pour refroidir des atomes, on ajuste la fréquence du laser de façon que les atomes qui se déplacent dans le sens opposé au faisceau diffusent beaucoup plus de photons que les atomes qui se déplacent dans le sens du faisceau. Cela diminue la vitesse des atomes, et donc les refroidit.

atome se comporte comme un minuscule aimant et subit donc une force en présence d'un champ magnétique hétérogène (voir la figure 4). En ajustant convenablement la forme du champ magnétique et en le rendant suffisamment intense, nous maintenons les atomes dans le champ magnétique comme des balles dans un récipient profond. Dans ce piège, seuls les atomes d'énergie élevée s'échappent : ils emportent une énergie supérieure à l'énergie moyenne, de sorte que les atomes restants refroidissent.

Ce refroidissement par évaporation est celui que l'on obtient quand on souffle sur de la soupe chaude. Les molécules d'eau les plus énergiques qui s'échappent de l'assiette vers l'air sont éliminées par le souffle, de sorte que l'énergie moyenne du liquide restant diminue ; les molécules du liquide se redistribuent l'énergie par d'innombrables collisions, puis celles qui ont le plus d'énergie s'échappent et sont éliminées, et ainsi de suite. Cependant, notre gaz d'atomes piégés est bien moins dense qu'une assiette de soupe. La principale difficulté expérimentale, à laquelle nous fûmes confrontés pendant cinq ans, fut l'obtention d'un nombre suffisant de collisions entre les atomes pour que l'énergie soit redistribuée avant que les

atomes ne soient éjectés du piège par collision avec les atomes chauds du gaz résiduel de la cellule.

Nous avons résolu ce problème par de nombreuses améliorations successives du dispositif initial. Par exemple, nous avons compris que nous devions nettoyer chaque élément très soigneusement avant de relier la cellule à son banc de pompage, la moindre trace de doigt sur une surface interne émettant suffisamment de vapeur pour compromettre la bonne qualité du vide. Par ailleurs, nous avons réduit la quantité de vapeur de rubidium présente dans la cellule à une valeur qui suffisait tout juste à charger le piège.

Ces progrès, quoique utiles, ne suffisaient pas (et de loin) à nous conduire à la densité nécessaire pour déclencher le refroidissement par évaporation, car notre piège magnétique était insuffisamment efficace. Nos champs magnétiques étaient certes intenses, mais les aimantations des atomes sont si faibles, que nous ne parvenions pas à confiner suffisamment les atomes, même aux faibles vitesses obtenues par refroidissement laser.

En 1994, nous avons compris que nous devions absolument utiliser un piège magnétique plus profond et plus raide. Ce piège fut l'élément décisif du succès, mais nous savons au-



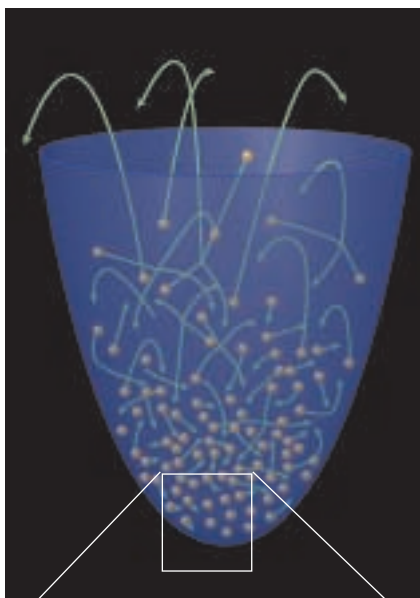
aujourd'hui que la configuration particulière que nous avons donnée à notre piège est loin d'être la seule possible. Il existe presque autant de pièges magnétiques différents que de groupes étudiant la condensation de Bose-Einstein.

### Instantané d'un superatome

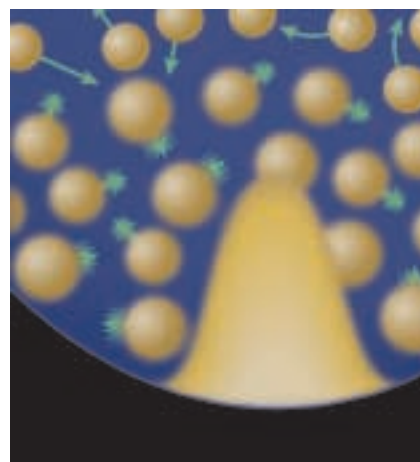
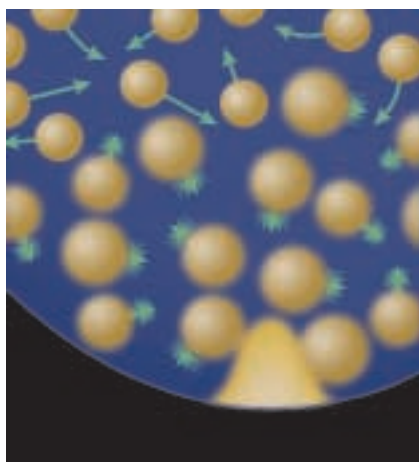
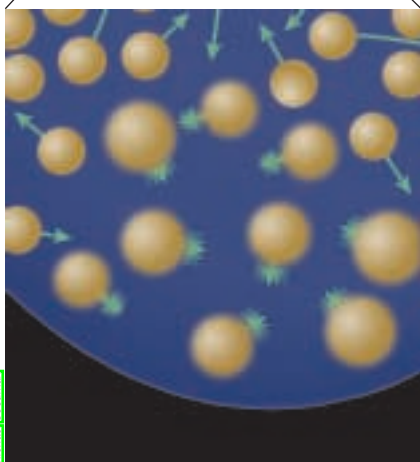
Comment vérifier que nous avons effectivement fabriqué un condensat de Bose-Einstein? Pour observer le nuage d'atomes refroidis, nous prenons une «image en absorption» à l'aide d'une impulsion laser. Comme les atomes se regroupent au fond du piège magnétique lorsqu'ils se refroidissent, le nuage froid est trop petit pour être visible. Pour augmenter sa taille, nous arrêtons les champs magnétiques de confinement et laissons les atomes se disperser dans toutes les directions. Au bout d'un dixième de seconde, nous éclairons le nuage d'atomes en expansion avec une impulsion laser : les atomes diffusent cette lumière en dehors du faisceau laser, produisant ainsi une ombre que nous observons sur une caméra vidéo. La forme de cette ombre nous indique les vitesses des atomes dans le nuage initialement piégé et, donc, la température de l'échantillon.

Pour visualiser le condensat, on représente les atomes par une surface dont l'élévation est d'autant plus importante que la densité des atomes est grande et que leur vitesse est faible. Dans cette représentation, le condensat est un pic en forme de nageoire dorsale (voir la figure 5). Les atomes condensés sont ceux dont la vitesse est la plus faible, si bien qu'ils restent groupés au centre du nuage au cours de la phase d'expansion. À elle seule, cette image du condensat démontre l'insuffisance de la mécanique classique : le condensat se forme dans l'état d'énergie minimale ; or, selon la mécanique classique, les atomes d'énergie minimale doivent se trouver immobiles au centre du piège, de sorte qu'ils devraient apparaître sous forme d'un pic infiniment haut et étroit sur notre image. Le pic obtenu n'est pas le pic ainsi prévu, en raison de la relation d'indétermination de Heisenberg (nommée aussi, à tort, principe d'incertitude : ce n'est pas un principe, et il n'est pas question d'incertitude).

Cette relation stipule que la connaissance d'un système physique ne peut être absolue : mieux on connaît la position d'un atome, par exemple, moins bien l'on connaît sa vitesse, et vice versa. Voilà pourquoi le pic formé par le condensat n'est pas infiniment étroit. S'il l'était, nous saurions que les atomes



**4. ON OBTIENT UN REFROIDISSEMENT PAR EVAPORATION** en utilisant un piège magnétique (représenté ici comme un récipient profond, en bleu). Les atomes d'énergies supérieures, ceux dont les trajectoires vertes sont les plus longues, peuvent s'échapper du piège (en haut, à gauche). Les atomes encore présents dans le piège se redistribuent l'énergie restante lors de leurs collisions (à gauche). Progressivement, ce mécanisme conduit à un gaz si froid et si dense que les propriétés quantiques des atomes apparaissent. Les paquets d'ondes atomiques, associés à la partie de l'espace où la probabilité de présence de chaque atome est maximale, commencent à se recouvrir. Quand une collision entre deux atomes conduit à un atome aussi immobile que le permet la relation d'indétermination d'Heisenberg, de nombreux atomes s'accumulent dans l'état d'énergie minimale (plus il y a d'atomes condensés, plus l'accumulation est rapide) ; ces atomes ainsi regroupés en un seul paquet d'ondes forment le condensat de Bose-Einstein (en bas, au centre et à droite).



se trouvent exactement au centre du piège avec une énergie exactement nulle ; nous ne pouvons avoir ces deux informations simultanément.

Selon la théorie d'Einstein, les atomes du condensat ont l'énergie minimale, alors que la relation d'Heisenberg leur interdit d'être exactement au centre du piège. La mécanique quantique résout cette contradiction apparente en postulant que l'énergie d'un atome dans une enceinte quelconque, y compris dans notre piège, ne prend qu'un ensemble discret de valeurs possibles et que la valeur minimale n'est pas nulle. Cette énergie minimale est nommée énergie de point zéro : c'est celle des atomes à température nulle. Les atomes ayant cette énergie se déplacent lentement au voisinage du centre du piège, et non pas exactement au centre. Habituellement, les effets de la relation d'indétermination et de la mécanique quantique ne sont visibles que pour les objets de la taille d'un atome ou encore plus petits. La condensation de Bose-Einstein est l'une des rares manifestations macroscopiques de la relation d'indétermination.

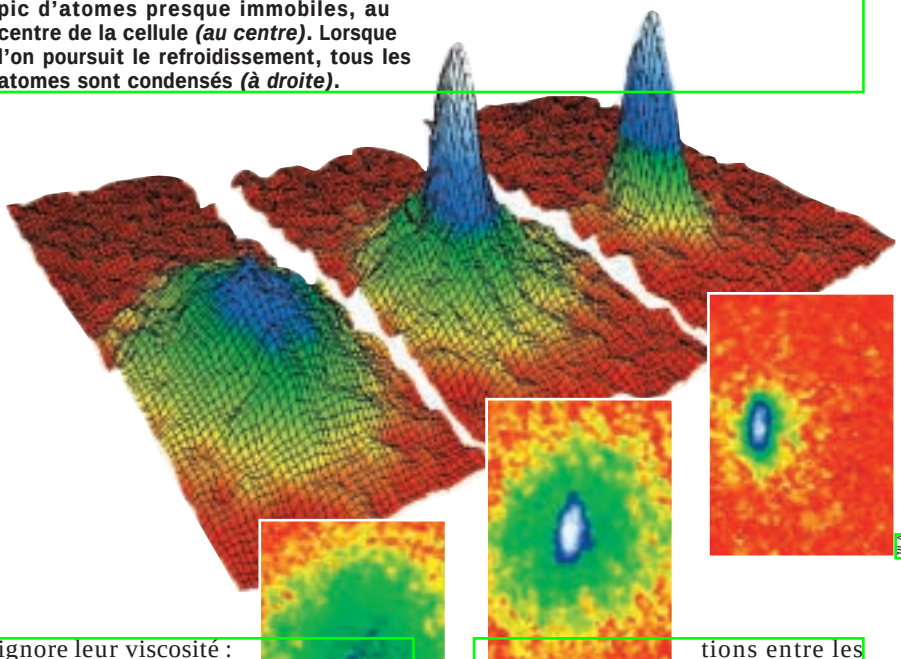
### L'ultime précision

L'observation de la condensation de Bose-Einstein est encore trop récente pour que l'on envisage des applications, mais spéculons à l'aide d'une analogie physique : les atomes d'un condensat ressemblent aux photons d'un faisceau laser.

Tous les photons d'un faisceau laser se propagent exactement dans la même direction, et ils ont exactement la même fréquence et la même phase. Ils forment ainsi un faisceau facile à commander et à utiliser dans les lecteurs de disques compacts, dans les imprimantes laser, etc. De même, le condensat de Bose-Einstein est un groupe parfaitement homogène d'atomes que l'on peut réfléchir, focaliser, diffracter, moduler en fréquence et en amplitude. Ce type de manipulation conduira à une meilleure définition du temps (aujourd'hui, les horloges les plus précises utilisent déjà des atomes refroidis par laser). On pourrait aussi imaginer un faisceau d'atomes focalisé en une tache d'un micromètre de diamètre gravant un transistor directement sur un circuit intégré.

Les condensats de Bose-Einstein demeurent mal connus. Ils se comportent comme des fluides, mais on

**5. L'ABSORPTION DE LA LUMIÈRE D'UN LASER par un condensat de Bose-Einstein en cours de formation a été enregistrée et traitée par ordinateur, de sorte qu'apparaissent la vitesse des atomes. Les deux rangées d'images correspondent aux mêmes données vues sous des angles différents. En haut, l'élévation de la surface est d'autant plus importante que la densité des atomes est grande et que leur vitesse est faible. Avant la formation du condensat (à gauche), le nuage est à une température d'environ 200 milliardièmes de kelvin, et les vitesses sont assez homogènes. Lorsque l'on refroidit jusqu'à 100 milliardièmes de kelvin, le condensat apparaît sous la forme d'un pic d'atomes presque immobiles, au centre de la cellule (au centre). Lorsque l'on poursuit le refroidissement, tous les atomes sont condensés (à droite).**



ignore leur viscosité : si elle est quasi nulle, comme certaines théories le supposent, les condensats seraient des sortes de «super-gaz» où des remous produits par excitation ne s'amortiraient jamais.

Plusieurs groupes ont commencé à caractériser les condensats. Le groupe de W. Ketterle a déjà montré que le recouvrement spatial de deux condensats forme un réseau de franges provenant d'interférences constructives et destructives : dans le nuage d'atomes, ces franges sont des zones de densité alternativement forte et faible. En appliquant à un condensat piégé par de la lumière un faible champ magnétique, ils ont en outre modifié les interac-

tions entre les atomes du condensat. Plusieurs autres équipes adaptent leur dispositif expérimental pour participer à cette étude.

Peut-on condenser autre chose que des atomes, des molécules par exemple ? La difficulté réside dans l'impossibilité de refroidir des molécules par laser. Toutefois, certains ont imaginé un mécanisme, nommé «refroidissement sympathique», qui permettrait la formation d'un tel condensat : on mélange des molécules à des atomes «condensables», comme le rubidium. En refroidissant ces derniers, et pour peu que les collisions entre les molécules et les atomes soient suffisamment fréquentes, on refroidit l'ensemble, et on aboutirait à un condensat moléculaire.

Eric CORNELL et Carl WIEMAN travaillent à l'Institut pour l'astrophysique de laboratoire (JILA), à Boulder (Colorado).

William D. PHILLIPS et Claude COHEN-TANNOUDJI, *New Mechanisms for Laser Cooling*, in *Physics Today*, vol. 43, pp. 33-40, octobre 1990.

*Bose-Einstein Condensation*, sous la direction de A. Griffin, D.W. Snoke et S. Stringari, Cambridge University Press, 1995.

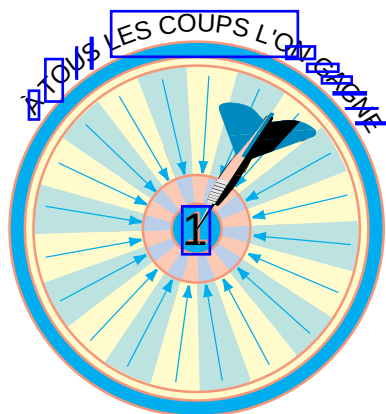
M.H. ANDERSON, J.R. ENSHER, M.R. MATTHEWS, C.E. WIEMAN et

E.A. CORNELL, *Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor*, in *Science*, vol. 269, pp. 198-201, 14 juillet 1995.

M.R. ANDREWS, C.G. TOWNSEND, H.-J. MIESNER, D.S. DURFEE, D.M. KURN et W. KETTERLE, *Observation of Interference between Two Bose Condensates*, in *Science*, vol. 275, pp. 637-641, 31 janvier 1997.

De nombreux liens complémentaires sont disponibles sur notre site Web : <http://www.pourlascience.com>





# La conjecture de Syracuse

JEAN-PAUL DELAHAYE

*Le plus simple des problèmes mathématiques non résolus illustre la démarche des chercheurs.*

**L**es sciences résolvent les questions élémentaires, puis passent à d'autres plus compliquées, progressant petit à petit. Le pédagogue défend aussi cette idée d'apprentissage graduel : «L'ontogenèse de l'apprentissage suit la phylogenèse des découvertes», pense-t-il : l'élève traite les cas simples et anciens, puis lentement passe aux cas difficiles.

Hélas, le monde mathématique ne se plie pas à cette vision d'une armée de chercheurs laborieux avançant selon un plan fixé sur un front de difficultés : il est des passages étroits où l'on ne peut maintenir l'allure. Pire, la plaine est semée de murailles invisibles dont on ne découvre l'existence qu'en s'y cognant.

La conjecture de Syracuse est une de ces murailles sur laquelle la communauté mathématique a buté (avec amusement d'abord, avec agacement ensuite) et, pour l'instant, aucun alpiniste n'a su la gravir. Le problème est de formulation si simple qu'il semble étonnant que personne n'ait pu le résoudre : quand vous aurez

lu cet article, vous serez au même point que les plus grands mathématiciens, ce qui n'est pas une piètre satisfaction.

Détaillons la règle du jeu. Prenez un entier,  $n$  ; s'il est pair, vous le divisez par 2, s'il est impair, vous le multipliez par 3 et vous ajoutez 1. Vous recommencez cette opération avec le résultat obtenu. Prenons un exemple : partant de 10, vous passez à 5, puis à 16 ( $3 \times 5 + 1$ ), puis à 8, puis à 4, puis à 2, puis à 1, qui vous ramène à 4, 2, 1, cycle dans lequel vous restez alors tout le temps. Au bout du compte, on retombe sur 1. Deux entiers peuvent donner le même résultat (par exemple, 32 et 5 donnent 16, leurs cheminement se rejoignant), ce qui suggère de représenter les divers parcours sous la forme de graphes ou de tableaux.

Essayez d'autres valeurs au hasard, en vous aidant d'un ordinateur si vous voulez. Vous tomberez toujours sur 1. Cette affirmation péremptoire est injustifiée : personne n'a montré qu'on arrive toujours à 1 (d'où le nom de «conjecture de Syracuse» pour cette affirmation).

On a essayé tous les nombres jusqu'à  $3,2 \cdot 10^{16}$ , et tous aboutissent à 1.

## TROUBLES DANS LES ESPRITS

Cette conjecture dont l'origine, vers 1950, reste confuse porte une grande variété d'autres noms provenant de mathématiciens l'ayant étudiée ou fait connaître : problème de Collatz, problème de Kakutani, problème de l'algorithme de Hasse, problème d'Ulam. Le nom de conjecture de Syracuse est lié à l'Université de Syracuse, aux États-Unis, où le problème fut étudié. Le nom le plus souvent retenu aujourd'hui est plus simplement celui de «problème  $3x + 1$ ».

S. Kakutani fit circuler le problème et raconte : «Pendant un mois, tout le monde à l'Université de Yale travailla dessus, sans résultat. Un phénomène semblable se produisit à l'Université de Chicago. Cette énigme, pensaient certains, avait été avancée par le KGB pour ralentir la recherche mathématique aux États-Unis.»

## 1. RÈGLES ET EXEMPLES DU JEU DE SYRACUSE

### LA RÈGLE DU JEU :

SI  $n$  EST PAIR : DIVISEZ PAR 2  
SI  $n$  EST IMPAIR : MULTIPLIEZ PAR 3 ET AJOUTEZ 1  
RECOMMENCEZ JUSQU'À OBTENIR 1

### EXEMPLE : 10

10 DIVISÉ PAR 2 DONNE 5  
5 MULTIPLIÉ PAR 3 ET PLUS 1 DONNE 16  
16 DIVISÉ PAR 2 DONNE 8  
8 DIVISÉ PAR 2 DONNE 4  
4 DIVISÉ PAR 2 DONNE 2  
2 DIVISÉ PAR 2 DONNE 1.

Pour suivre un vol à droite, on part d'un nombre, on se déplace vers la gauche en restant sur la même ligne autant qu'on peut. Quand on arrive en bout de ligne, on passe à la case au-dessus de la case où l'on est. Si l'entier  $n$  est placé dans la  $i$ -ème colonne, le nombre d'étapes paires du vol  $n$  est  $i$ . Le tableau infini contient-il tous les entiers? C'est la conjecture de Syracuse.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5  | 6  | 7  | 8   | 9   | 10  | 11   | 12   | 13   | 14   | 15    |
|---|---|---|---|----|----|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|
| 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 | 1024 | 2048 | 4096 | 8192 | 16384 |
|   |   |   |   |    |    | 21 | 42  | 84  | 168 | 236  | 572  | 1344 | 2599 | 5398  |
|   |   |   |   | 5  | 10 | 20 | 40  | 80  | 160 | 320  | 640  | 1280 | 2560 | 5120  |
|   |   |   |   |    |    |    |     | 53  | 106 | 212  | 424  | 848  | 1696 |       |
|   |   |   |   |    |    |    |     |     | 35  | 70   | 140  | 280  | 560  |       |
|   |   |   |   |    |    |    |     |     |     | 23   | 46   | 92   | 184  |       |
|   |   |   |   |    |    |    |     |     |     |      | 15   | 30   | 60   |       |
|   |   |   |   |    |    |    | 13  | 26  | 52  | 104  | 208  | 416  | 832  | 1664  |
|   |   |   |   |    |    |    |     | 17  | 34  | 68   | 136  | 272  | 544  |       |
|   |   |   |   |    |    |    |     |     | 11  | 22   | 44   | 88   | 176  |       |
|   |   |   |   |    |    |    |     |     |     |      |      | 29   | 58   |       |
|   |   |   |   |    |    |    |     |     |     |      |      |      | 19   |       |
|   |   |   |   |    |    |    |     |     |     | 7    | 14   | 28   | 56   |       |
|   |   |   |   |    |    |    |     |     |     |      |      | 9    | 18   |       |
|   |   |   |   |    | 3  | 6  | 12  | 24  | 48  | 96   | 192  | 394  | 788  | 1576  |

## 2. LES 30 PREMIERS VOLS

| VOL                      | 1 | 2 | 3  | 4 | 5  | 6  | 7  | 8 | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15  | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23  | 24 | 25 | 26 | 27   | 28 | 29 | 30  |
|--------------------------|---|---|----|---|----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|------|----|----|-----|
| DURÉE                    | 0 | 1 | 7  | 2 | 5  | 8  | 16 | 3 | 19 | 6  | 14 | 9  | 9  | 17 | 17  | 4  | 12 | 20 | 20 | 7  | 7  | 15 | 15  | 10 | 23 | 10 | 111  | 18 | 18 | 18  |
| DURÉE DE VOL EN ALTITUDE | 0 | 0 | 5  | 0 | 2  | 0  | 10 | 0 | 2  | 0  | 7  | 0  | 2  | 0  | 10  | 0  | 2  | 0  | 5  | 0  | 2  | 0  | 7   | 0  | 2  | 0  | 95   | 0  | 2  | 0   |
| ALTITUDE MAXIMALE        | 1 | 2 | 16 | 4 | 16 | 16 | 52 | 8 | 52 | 16 | 52 | 16 | 40 | 52 | 160 | 16 | 52 | 52 | 88 | 20 | 64 | 52 | 160 | 24 | 88 | 40 | 9232 | 52 | 88 | 160 |

La conjecture de Syracuse a donné lieu à des publications rattachées au domaine de la théorie des nombres. Ces travaux ont pris une tournure très sérieuse, conduisant à certains résultats que nous allons examiner. Cependant, on ne sait toujours pas répondre à la question : « Arrive-t-on toujours sur 1 ? »

Que peut-il se produire d'autre ? Partant d'un entier quelconque, *a priori* trois cas sont possibles :

– on aboutit à 1 (c'est-à-dire sur le cycle  $4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ ) ;

– on aboutit à un autre cycle que  $4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$  ;

– on tombe sur une suite infinie de nombres entiers ne revenant jamais là où elle est passée, et prenant donc des valeurs de plus en plus grandes. N'importe quel amateur peut tenter sa chance, mais il doit savoir que des gens intelligents (parfois géniaux) ont essayé et s'y sont cassé les dents : si vous croyez, après quelques heures de recherche, avoir trouvé un raisonnement qui démontre la conjecture, rédigez-le soigneusement. Toutefois, méfiez-vous : nombre de fausses preuves ont déjà circulé, dont une en 1997 sur Internet. Cette année, une preuve a été déposée chez un notaire par un mathématicien amateur inquiet qu'on ne lui vole son idée.

Il y a une vingtaine d'années, le grand mathématicien Paul Erdős, qu'on interrogeait sur ce problème et sur l'impuissance des mathématiques à le traiter malgré sa déconcertante simplicité, répondit que « les mathématiques ne sont pas encore prêtes pour aborder de telles questions ». Est-ce toujours le cas aujourd'hui ?

## DURÉE DE VOL, ALTITUDE, VOL EN ALTITUDE, ETC.

À défaut de prouver le résultat et pour tenter de trouver un contre-exemple (après tout, peut-être que tout entier n'arrive pas sur 1 !), de nombreux calculs ont conduit à des records soigneusement tenus à jour et auxquels il est plus facile de s'attaquer qu'à la conjecture elle-même. L'étude des particularités du processus est motivée par l'espoir que la démonstration d'une propriété équivalente permettra de

démontrer la conjecture... Avant d'indiquer des records, fixons un vocabulaire imagé qui nous facilitera la description des comportements des suites.

Nous dirons, dans ce qui suit, que la suite obtenue à partir d'un entier est son *vol*. Ce vol atteint une *altitude maximale*, qui est l'entier le plus grand par lequel on passe. Ce vol a une *durée* égale au nombre d'étapes avant d'*atterrir* à 1. Nous examinerons aussi la *durée de vol en altitude*, la durée du vol dont les points de la suite sont supérieurs à la valeur du point de départ. Le vol numéro 11 est ainsi :  $11 \rightarrow 34 \rightarrow 17 \rightarrow 52 \rightarrow 26 \rightarrow 13 \rightarrow 40 \rightarrow 20 \rightarrow 10 \rightarrow 5 \rightarrow 16 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ . Son altitude maximale est 52, sa durée de vol 14, et sa durée de vol en altitude 7 (voir la figure 3).

Remarquons qu'il existe des vols de durée aussi longue qu'on veut : le vol  $2^n$  est  $2^n \rightarrow 2^{n-1} \rightarrow 2^{n-2} \rightarrow 2^{n-3} \rightarrow \dots \rightarrow 2 \rightarrow 1$ , qui a pour durée  $n$ . Les mathématiciens ont aussi démontré que, si tout nombre a une durée de vol en altitude finie, alors la conjecture de Syracuse est vraie (voir la figure 4).

Le record de vérification de la conjecture, nous l'avons mentionné, est  $3,2 \cdot 10^{16}$ , ce qui signifie que tous les vols dont le numéro est inférieur à  $3,2 \cdot 10^{16}$  atterrissent en 1. Ce résultat est dû à Tomás Oliveira e Silva, de l'Université d'Aveiro, au Portugal, qui a développé des trésors d'ingéniosité pour mener les calculs.

On appelle *vol de durée record* un vol dont tous les vols de numéro plus petits sont plus courts. Le vol 7, dont la durée est 16, est un vol de durée record, car les vols 1, 2, 3, 4, 5 et 6 ont des durées inférieures. Aujourd'hui, le plus grand vol de durée record publié (par Eric Roosendaal) est le 109<sup>e</sup> : il s'agit du vol 100759293214567, dont la durée est 1 820.

On considère de même les *vols de durée en altitude record* (tout vol de numéro plus petit reste en altitude moins longtemps). On en a trouvé 28, dont le plus grand publié (par E. Roosendaal) est le vol 70665924117439, qui reste en altitude 1 177 étapes.

Les *vols d'altitude record* sont ceux qui atteignent un maximum d'altitude

qu'aucun vol de numéro inférieur n'atteint. On en connaît 69, dont le dernier publié (par E. Roosendaal) est le vol 406738920960667, qui atteint l'altitude : 2560139341004245682288523934.

On démontre que le nombre  $P(N)$  d'étapes paires du vol  $N$  et le nombre  $I(N)$  d'étapes impaires vérifient toujours :  $I(N)/P(N) < \log 2 / \log 3$ . On remarque que, pour certains nombres  $N$ , le rapport  $I(N)/P(N)$  s'approche de  $\log 2 / \log 3 = 0,63092975\dots$  On conjecture qu'on s'en approche de plus en plus. Cela suggère de repérer les *records d'approche* : nombre  $N$  tel que le rapport  $I(N)/P(N)$  est plus grand que le rapport  $I(n)/P(n)$  pour toutes les valeurs de  $n$  inférieures à  $N$ .

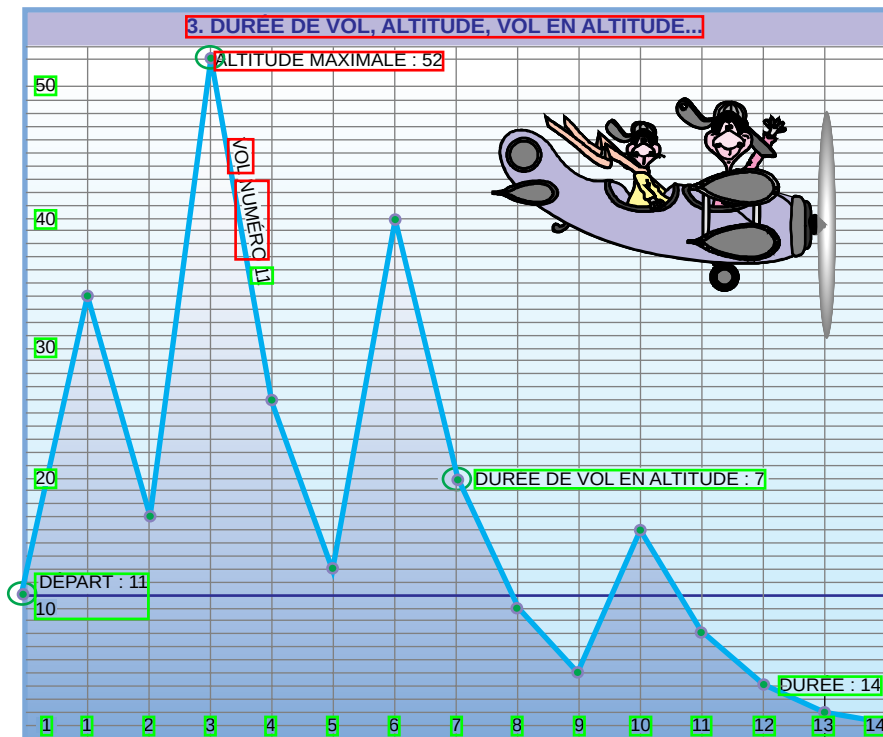
Ces records d'approche sont rares : seuls 15 sont connus aujourd'hui, dont le dernier est  $N = 100759293214567$ , qui donne  $I(N)/P(N) = 0,604938$ .

On sait que, pour tout entier  $p$ , il existe au moins un vol de durée  $p$  : le vol  $2^p$ . En général, il en existe d'autres, et trouver celui qui a le plus petit numéro n'est pas facile. Un défi a été lancé pour l'an 2000 : trouver le plus petit entier  $n$  dont la durée de vol est 2000. Actuellement, c'est 377060271667498687, mais rien n'assure qu'il n'y a pas mieux.

En programmation, l'intelligence est utile, et les résultats obtenus avec les plus puissantes machines peuvent être battus par un ordinateur personnel astucieusement programmé. Voici quelques idées conduisant à gagner du temps dans la recherche d'un contre-exemple et utiles pour battre les records mentionnés.

Pour établir que tout vol inférieur à  $n$  atterrit en 1, il n'est pas nécessaire de mener le calcul jusqu'à 1 : on peut arrêter chaque vol dès qu'il passe en dessous de son point de départ  $x$  (car si, avant  $x$ , on a testé tous les vols de numéros inférieurs, on est alors certain que le vol  $x$ , une fois arrivé sous  $x$ , se poursuivra jusqu'à 1). On arrête aussi le calcul dès qu'on trouve un nombre déjà atteint par un vol précédent (pour le savoir, on doit mémoriser les nombres par lesquels on est déjà passé, ce qui doit se faire intelligemment pour que le procédé soit économique).

Plus intéressantes encore sont les remarques mathématiques du type :



tout vol dont le numéro est de la forme  $n = 4k + 1$  finit par passer en dessous de  $n$ . On calcule les étapes à partir de  $n$  (qui est impair) : on obtient  $12k + 4$  (pair),  $6k + 2$  (pair),  $3k + 1$  (pair ou impair, mais plus petit que  $n$ ).

Ainsi, dans une suite de tests systématiques, il est inutile de traiter les nombres de la forme  $4k + 1$  (car ils passent toujours sous  $n$ ), ce qui fait gagner 25 pour cent du temps de calcul. Comme il est aussi inutile de traiter ceux de la forme  $4k$  ou  $4k + 2$  (qui passent dès la première étape au-dessous de leur point de départ), il ne reste plus qu'à essayer ceux de la forme  $4k + 3$ , soit une économie de calcul de 75 pour cent par rapport à la méthode naïve.

Ce type d'accélération des calculs mérite d'être perfectionné. Voici un premier pas dans cette direction : tout vol dont le numéro est de la forme  $n = 16k + 3$  finit par passer en dessous de  $n$ . En effet, les étapes à partir de  $16k + 3$  (impair) sont  $48k + 10$  (pair),  $24k + 5$  (impair),  $72k + 16$  (pair),  $36k + 8$  (pair),  $18k + 4$  (pair),  $9k + 2$  (pair ou impair, mais plus petit que  $n$ ).

En poursuivant sur le même principe, on montre que, si l'on écrit les nombres sous la forme  $256k + i$  avec  $i$  variant de 0 à 255, seuls ceux correspondant à un  $i$  parmi : 27, 31, 47, 55, 63, 71, 91, 103, 111, 127, 155, 159, 167, 191, 207, 223, 231, 235, 239, 251, 255 doivent être traités, ce qui cette fois donne un gain de plus de 92 pour cent.

Le programme de E. Roosendaal, à qui l'on doit certains records, est fondé sur une étude des entiers mis sous la

forme  $65536k + i$  ( $65536 = 2^{16}$ ), dont seuls 1 729 cas (soit 2,6 pour cent) restent à étudier. Cette économie est associée, dans son programme, à d'autres idées arithmétiques, ainsi qu'à une méthode de traitement simultané de plusieurs vols à la fois. Le programme de T. Oliveira e Silva améliore encore ces idées, ce qui lui permet d'être le détenteur actuel du record de vérification de la conjecture.

### DES RÉSULTATS EN PROGRÈS

Les résultats les plus avancés obtenus du côté des tentatives de démonstrations mathématiques utilisent aussi l'idée du *vol en altitude*. En effet, un peu de réflexion montre que la conjecture de Syracuse est équivalente à la *durée de tout vol en altitude est finie* : tout vol finit par passer sous son point de départ.

Fondant leurs raisonnements sur une étude arithmétique fine de l'arbre associé à la conjecture, R. Terra et C. Everett ont montré indépendamment que «presque tout vol finit par passer sous son point de départ». Le «presque» signifie ici que :

- il existe un nombre  $n$  tel que, parmi les vols de numéro inférieurs à  $n$ , au plus dix pour cent ne passent pas sous leur point de départ ;

- il existe un nombre  $n'$  (plus grand que  $n$ ) tel que, parmi les vols de numéros inférieurs à  $n'$ , au plus un pour cent ne passent pas sous leur point de départ ;

- il existe un nombre  $n''$  (plus grand que  $n'$ ) tel que parmi les vols de numéros

inférieurs à  $n''$ , au plus 0,1 pour cent ne passent pas sous leur point de départ ; etc.

On a l'impression qu'on n'est pas loin de la conjecture, mais réfléchissez : ce résultat signifie seulement que les vols qui restent toujours en altitude sont de plus en plus rares quand on tend vers l'infini. Il se peut quand même qu'il en existe, et donc on ne peut pas déduire la conjecture du *presque* de R. Terra et C. Everett.

Pire, leur résultat n'implique même pas qu'une infinité de vols atterrissent en 1, car il n'interdit pas l'existence d'un cycle autre  $4 - 2 - 1$ . Le résultat est un progrès seulement si c'est véritablement un premier pas vers le même résultat sans le «presque».

Plus récemment, des démonstrations concernant cette fois les vols qui atterrissent en 1 (et non plus les vols qui ne restent qu'un temps fini au-dessus de leur point de départ) ont été obtenues. On a prouvé qu'il existait une constante  $c$  telle que, si  $n$  est assez grand, alors le nombre de  $x$  inférieurs à  $n$  qui atterrissent en 1 est supérieur à  $n^c$ .

Le résultat a d'abord été montré pour la constante  $c = 0,05$  par R. Crandall en 1978, puis avec  $c = 0,3$  par J. Sander et  $c = 0,43$  par I. Krasikov en 1989, puis avec  $c = 0,48$  par G. Wirsching en 1993, et enfin avec  $c = 0,81$  par D. Applegate et J. Lagarias en 1995. On approche du but (qui sera atteint si l'on obtient le résultat avec  $c = 1$ ), mais rien n'assure que les méthodes utilisées permettront d'avancer plus.

La démonstration du résultat de 1995 est assez particulière, car elle utilise la résolution de grands systèmes d'équations qui ont été traitées par programmes. La démonstration ne peut être vérifiée à la main, et l'article dans lequel le résultat est présenté donne, non pas la démonstration du théorème avec  $c = 0,81$ , mais l'explication de la façon dont les systèmes d'équations sont écrits, les résultats des programmes et la manière de les interpréter : un mathématicien qui veut vérifier le résultat doit suivre les explications et les raisonnements, écrire un programme (compliqué!), le faire fonctionner et s'assurer qu'il a obtenu ce qu'il faut.

Une autre série de résultats remarquables concerne cette fois les cycles (éventuels) autres que celui à trois éléments,  $4 - 2 - 1$ . R. Crandall et N. Yoneda ont établi en 1978 que, s'il en existait, ils étaient nécessairement de taille (nombre de leurs éléments) supérieure à 275 000. Cette borne a été poussée à 17 087 915 en 1993, puis tout récemment à 102 225 496. Les preuves de ces affirmations utilisent les informations provenant des records de vérification de la conjecture, faisant là encore de ces résul-

tats mathématiques des propriétés invérifiables par un mathématicien sans ordinateur. S'il y a des cycles autres que notre cycle  $4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ , ils seront vraiment très longs !

### UN ARGUMENT HEURISTIQUE

Les expérimentations numériques jusqu'à  $3,2 \cdot 10^{16}$  constituent un premier «presque» ; les résultats mathématiques déjà cités constituent un second «presque». En voici un troisième.

Certains raisonnements dits *heuristiques* («qui aident à la découverte»), fondés sur des considérations approximatives ou probabilistes, éclairent une question mathématique. Le raisonnement suivant concernant la conjecture de Syracuse est une tentative de ce type :

«Chaque nombre est soit pair, soit impair ; il y a autant de nombres pairs que de nombres impairs, et donc une fois sur deux, lors d'un vol, on appliquera la formule  $n \rightarrow 3n + 1$  et, une fois sur deux, on appliquera la formule  $n \rightarrow n/2$ . À chaque fois qu'on fera deux étapes, l'altitude sera donc, en gros, multipliée par  $3/2$  (ce qui revient à ajouter 50 pour cent), et... le vol montera à des altitudes infinies.» Le raisonnement heuristique naïf conduit à l'inverse de ce qu'énonce la conjecture de Syracuse !

Ce raisonnement est vraiment trop naïf, car il ne tient pas compte du fait que, lorsque l'on a appliqué la formule  $n \rightarrow 3n + 1$  à partir d'un nombre impair, on est certain de trouver un nombre pair (trois fois un nombre impair est impair, en ajoutant un, on a donc un nombre pair).

Il faut améliorer le raisonnement. Voici la version qu'en propose J. Lagarias : après avoir appliqué la formule  $n \rightarrow 3n + 1 = m$  (pair) et juste après la formule  $m \rightarrow m/2$ , on tombe cette fois sur un nombre qu'on peut considérer comme quelconque. Il a donc 1 chance sur 2 d'être impair, 1 chance sur 4 d'être le double d'un nombre impair, 1 chance sur 8 d'être le quadruple d'un nombre impair, etc. Le vol qui mène d'un nombre impair au suivant aura donc pour effet «en moyenne» :

- de multiplier  $n$  par  $3/2$ , une fois sur 2 (trajet de longueur 2) ;
- de le multiplier par  $3/4$ , une fois sur 4 (trajet de longueur 3) ;
- de le multiplier par  $3/8$ , une fois sur 8 (trajet de longueur 4) ;
- etc.

Cela conduit à la conclusion qu'en moyenne, entre deux entiers impairs appartenant à un même vol, on multiplie l'altitude par la constante :

$$c = (3/2)^{1/2} (3/4)^{1/4} (3/8)^{1/8} (3/16)^{1/16} \dots = 3/4.$$

### 4. RÉSULTATS THÉORIQUES

(a) Si tout nombre supérieur à 4 a une durée de vol en altitude finie, alors la conjecture de Syracuse est vraie. Supposons que l'hypothèse est vraie.

Montrons par récurrence que tout  $n$  atterrit en 1. C'est vrai pour 5. Soit un entier  $n > 5$ . Supposons que tout entier  $i < n$  atterrit en 1. Par hypothèse,  $n$  a une durée de vol en altitude finie. Donc, partant de  $n$ , on descend sous  $n$ , et l'on arrive donc à un  $i$  dont, par hypothèse, on sait qu'il atterrit en 1, donc  $n$  atterrit en 1.

(b) Plus généralement, la conjecture de Syracuse est équivalente à l'un des énoncés suivants :

- (1) la durée de tout vol est finie ;
- (2) la durée de tout vol en altitude est finie ;
- (3) tout vol a un nombre fini d'étapes paires ;
- (4) tout vol a un nombre fini d'étapes paires en altitude ;
- (5) tout vol a un nombre fini d'étapes impaires ;
- (6) tout vol a un nombre fini d'étapes impaires en altitude.

Il est clair que l'affirmation (1) implique les autres affirmations.

Nous avons déjà vu que (2) implique (1). Partant d'un nombre pair, on aboutit nécessairement, au bout d'un nombre fini d'étapes, à un nombre impair et partant d'un nombre impair, on aboutit en une étape à un nombre pair. Cela montre que (3) équivaut à (5) et à (1). De même (4) équivaut à (6) et à (2).

En moyenne, on passe donc d'un nombre impair à un nombre impair plus petit de 25 pour cent, et donc on finit par atterrir sur un cycle (le raisonnement heuristique n'exclut pas qu'il puisse y avoir d'autres cycles que  $4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ ).

L'intérêt de ce raisonnement un peu compliqué est qu'en considérant maintenant un processus aléatoire construit sur le modèle supposé dans le raisonnement heuristique, on peut calculer le temps moyen pour que, partant de  $n$ , on passe en dessous de  $n$  (*durée moyenne de vol en altitude en ne comptant que les étapes impaires*). Le résultat de ce calcul est 3,49265... Or en évaluant, cette fois expérimentalement, la valeur moyenne de cette durée de vol en altitude (on essaie tous les entiers entre trois et deux milliards, et l'on fait la moyenne), on trouve 3,4926... Cette coïncidence numérique remarquable indique que le modèle probabiliste du raisonnement heuristique est certainement correct.

S'il est correct, il n'y a pas de vol infini en altitude, et donc la conjecture est vraie (du moins concernant l'inexistence de vol tendant vers l'infini).

Malheureusement, pour avoir une démonstration complète, il faudrait justifier par une preuve (et pas par une expérimentation) que le modèle probabiliste utilisé est correct. Le raisonnement heuristique renforce la conviction qu'il n'existe pas de vols infinis, mais ce n'est pas une démonstration.

On est ici dans une situation analogue à celle concernant les décimales du nombre  $\pi$  : dans les deux cas, on a une suite numérique parfaitement déterminée par des règles arithmétiques fixées ; dans

les deux cas, on constate que la suite se conforme miraculeusement bien à un modèle probabiliste clairement identifié (pour  $\pi$ , c'est le modèle du tirage équitable des chiffres) ; dans les deux cas, une vérification numérique poussée a été menée, mais, dans les deux cas, sans prouver ce qui est constaté par les calculs numériques.

Remarquons que les modèles probabilistes prédisent que l'altitude la plus haute du vol  $n$  est au plus  $Kn^2$  (pour une certaine constante  $K$ ), ce qui, pour  $K = 8$ , est aussi expérimentalement vérifié.

Nous avons maintenant trois «presque» pour la conjecture de Syracuse. Des «presque» ne suffisent pas à démontrer un résultat, et donc, même si notre conviction s'est renforcée, la conjecture de Syracuse n'est pas devenue un théorème.

### L'INDÉCIDABILITÉ N'EST PAS LOIN

Jeffrey Lagarias m'a indiqué que «la conjecture est encore désespérément hors de portée, mais je la crois vraie. Si elle devait être fausse, cela serait à cause d'un long cycle plutôt qu'à cause d'un vol infini. Même cela semble extrêmement improbable. Mon intuition dit "impossible", mais je ne sais pas en trouver une bonne traduction verbale».

Ne pas réussir à démontrer un résultat conduit à se poser la question : serait-ce un indécidable ? C'est-à-dire : ne se pourrait-il pas que les méthodes traditionnelles des mathématiques (codifiées, par exemple, dans la très puissante théorie des ensembles) ne soient pas en mesure de démontrer la

## 5. LES VOLS RECORDS

| VOL   | DUREE | ALTITUDE<br>MAXIMALE |
|-------|-------|----------------------|
| 3     | 7     | 16                   |
| 6     | 8     | 16                   |
| 7     | 16    | 52                   |
| 9     | 19    | 52                   |
| 18    | 20    | 52                   |
| 25    | 23    | 88                   |
| 27    | 111   | 9232                 |
| 54    | 112   | 9232                 |
| 73    | 115   | 9232                 |
| 97    | 118   | 9232                 |
| 129   | 121   | 9232                 |
| 171   | 124   | 9232                 |
| 231   | 127   | 9232                 |
| 313   | 130   | 9232                 |
| 327   | 143   | 9232                 |
| 649   | 144   | 9232                 |
| 703   | 170   | 250504               |
| 871   | 178   | 190996               |
| 1161  | 181   | 190996               |
| 2223  | 182   | 250504               |
| 2463  | 208   | 250504               |
| 2919  | 216   | 250504               |
| 3711  | 237   | 481624               |
| 6171  | 261   | 975400               |
| 10971 | 267   | 975400               |
| 13255 | 275   | 497176               |
| 17647 | 278   | 11003416             |

conjecture de Syracuse qui pourtant serait vraie ?

Notons que la conjecture pourrait être fausse et que cela soit indécidable par les méthodes mathématiques traditionnelles : cela signifierait qu'un jour nous allons tomber sur un entier que nous n'arriverons pas à faire atterrir sur 1, mais dont nous ne saurons pas montrer non plus qu'il n'atterrira jamais sur 1.

Exceptionnellement, nous avons quelques raisons de considérer cette question de l'indécidabilité avec sérieux, car un résultat de logique mathématique établit que nous ne sommes pas loin de l'indécidabilité.

Ce résultat est dû à J. Conway. Celui-ci a considéré les généralisations de la conjecture de Syracuse obtenues en prenant non plus deux formules qu'on applique selon que  $n$  est pair ou impair, mais en considérant  $p$  formules qu'on applique selon le reste de la division de  $n$  par  $p$ . Conway montre comment définir précisément une conjecture, du type « tout  $n$  atterrit à 1 », de telle façon qu'elle soit indécidable dans la théorie des ensembles.

En fait, dans n'importe quelle théorie mathématique, la méthode de Conway permet de construire un problème ressemblant à la conjecture de Syracuse et qui y soit indécidable (attention : cela ne

signifie pas qu'on puisse définir un problème de type Syracuse qui soit indécidable dans toutes les théories à la fois ; une telle chose n'existe pas, car « être indécidable » est toujours relatif à une théorie fixée).

Le résultat de Conway n'établit pas que la conjecture est indécidable ni même qu'elle est difficile (car certaines variantes de la conjecture sont faciles !), mais seulement que des problèmes assez semblables le sont, ce qui est quand même troublant.

En 1993, le résultat de Conway a été utilisé par Philippe Devienne, Patrick Lebègue et Jean-Christophe Routier, du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille, pour démontrer la puissance d'un formalisme de programmation à base de règles logiques. Comme d'habitude, les recherches en apparence les plus futiles se trouvent avoir des conséquences pratiques, insoupçonnables *a priori*.

## LES VARIANTES SONT AUSSI DIFFICILES

Les mathématiciens sont toujours soucieux de généralité, car elle permet d'extraire pleinement la puissance d'un raisonnement particulier et d'en tirer des conséquences inattendues. Ils se sont donc interrogés sur ce qu'on obtenait pour des problèmes ressemblant à la conjecture de Syracuse.

Ils se sont demandé d'abord ce qui se passait pour le problème  $3x + 1$  lorsqu'on autorisait les altitudes négatives. La conjecture qu'ils ont proposée est que tous les vols se terminent sur l'un des trois cycles suivants :

$-1 \rightarrow -2$ .  
 $-5 \rightarrow -14 \rightarrow -7 \rightarrow -20 \rightarrow -10$ .  
 $-17 \rightarrow -50 \rightarrow -25 \rightarrow -74 \rightarrow -37 \rightarrow -110 \rightarrow -55 \rightarrow -164 \rightarrow -82 \rightarrow -41 \rightarrow -122 \rightarrow -61 \rightarrow -182 \rightarrow -91 \rightarrow -272 \rightarrow -136 \rightarrow -68 \rightarrow -34$ .

Pour la fonction  $5x + 1$  (à utiliser à la place de  $3x + 1$  quand  $x$  est impair), tous les vols n'arrivent pas à 1, car, en plus du cycle  $6 \rightarrow 3 \rightarrow 16 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ , on trouve les cycles :

$13 \rightarrow 66 \rightarrow 33 \rightarrow 166 \rightarrow 83 \rightarrow 416 \rightarrow 208 \rightarrow 104 \rightarrow 52 \rightarrow 26$ .  
 $17 \rightarrow 86 \rightarrow 43 \rightarrow 216 \rightarrow 108 \rightarrow 54 \rightarrow 27 \rightarrow 136 \rightarrow 68 \rightarrow 34$ .

Le vol 7 pour  $5x + 1$  semble infini quoi qu'on ne sache pas le démontrer.

L'adaptation de l'argument heuristique de Lagarias suggère d'ailleurs que, pour  $qx + 1$  à la place de  $3x + 1$ , si  $q$  est  $> 3$ , alors il existe des vols infinis.

Pour le problème  $181x + 1$ , on trouve un cycle qui ne contient pas 1. De même, pour  $q = 1\,093$ , on démontre que certains vols n'atterrissent pas à 1.

Tout cela a conduit à une nouvelle conjecture formulée par Richard Crandall (une sorte de conjecture anti-Syracuse) qui affirme : pour  $q \times + 1$  (à la place de  $3x + 1$ ), avec  $q$  impair et supérieur à 3, il y a toujours au moins un vol qui n'atterrit pas en 1. Bien sûr, cette conjecture reste à démontrer !

Les considérations ci-dessus sur les cycles montrent que la conjecture de Crandall est vraie pour  $q$  égal à 5, 181 et 1093. En 1995, Z. Franco et C. Pomerance ont montré que les entiers  $q$  pour lesquels la conjecture de Crandall était vraie devenaient de plus en plus fréquents quand  $q$  tend vers l'infini, autrement dit que la conjecture était « presque vraie » (comme il est « presque vrai » que tout vol pour  $3x + 1$  passe sous son point de départ).

D'autres généralisations ont été formulées, et des résultats ont établi des connexions entre ces questions, l'arithmétique des nombres premiers, certaines équations diophantiennes (équations à coefficients entiers dont on cherche des solutions en nombres entiers), les chaînes de Markov (des itérations probabilistes) et la théorie ergodique (études de l'utilisation répétée des fonctions de mélange).

Avec toutes ces variantes donc, même si la conjecture de Syracuse était résolue prochainement, les mathématiciens et les expérimentateurs numériques ont de quoi s'amuser pendant des siècles.

Jean-Paul DELAHAYE est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS.

e-mail : delahaye@lilfl.fr

J. H. CONWAY, *Unpredictable Iterations. Proc. 1972 Number Theory Conference, University of Colorado, Boulder, 1972.*

V. KLEE et S. WAGON, *Old and New Unsolved Problems in Plane Geometry and Number Theory. Ch. 19 : The  $3x + 1$  Problem*, Math. Assoc. of America, Dolciani Math. Exposition, 11, 1993.

J. LAGARIAS, *The  $3x + 1$  Problem and its Generalizations*, in *Amer. Math. Monthly*, 92, pp. 3-23, 1985.

J. LAGARIAS, *The  $3x + 1$  Problem Annotated Bibliography*. Novembre 1997. Communication personnelle.

K.R. MATTHEWS, *The Generalized  $3x + 1$  Mapping*, 1997, à paraître.

T. Oliveira e SILVA, *Maximum Excursion and Stopping Time Record Holders for the  $3x+1$  Problem : Computational Results*. À paraître dans *Mathematics of Computation*.

E. ROOSENDAL, *On the  $3x + 1$  Problem (1-1998)* : <http://personal.computrain.nl/eric/wondrous/>



# Bouteilles et rubans

IAN STEWART

*Soufflage de verre et topologie.*

**A**lan Bennett est un souffleur de verre qui exerce son art à Bedford, en Angleterre. Il y quelques années, il fut intrigué par les étranges surfaces qu'étudient les topologistes : ruban de Möbius, bouteilles de Klein, etc. Cherchant à les reproduire, il rencontra un curieux problème mathématique qu'il résolut par le soufflage, alors que des mathématiciens avaient jusque-là échoué. Sa série d'objets remarquables, de la recherche mathématique figée dans le verre, sera bientôt exposée dans les musées scientifiques.

Les topologistes étudient les propriétés qui sont inchangées quand une forme est étirée, tordue ou arbitrairement déformée. On impose seulement aux déformations d'être « continues » : les objets peuvent être coupés s'ils sont recollés, de sorte que des points initialement voisins le soient encore après le recollement. La connexion est une propriété topologique : les objets sont-ils d'une ou de plusieurs pièces ? Il y a d'autres interrogations topologiques. Les objets sont-ils noués ? Sont-ils liés les uns aux autres ? Sont-ils troués ?

Les formes topologiques les plus usuelles semblent n'être que des amusements enfantins, mais ils sont pleins de mystères mathématiques profonds. Ainsi, le ruban de Möbius, que l'on obtient en recollant les extrémités d'une bande de papier, après l'avoir tordue d'un demi tour, est la plus simple des surfaces à une seule face : si deux peintres munis respectivement de peinture bleue et de peinture rouge peignaient ce qu'ils pensaient être les deux faces d'un ruban, ils finiraient par se rencontrer.

Quand on tord une bande de plusieurs demi tours avant de la recoller, on obtient des variantes du ruban de Möbius. Pour un topologiste, la distinction importante réside entre les bandes recollées après un nombre pair de demi

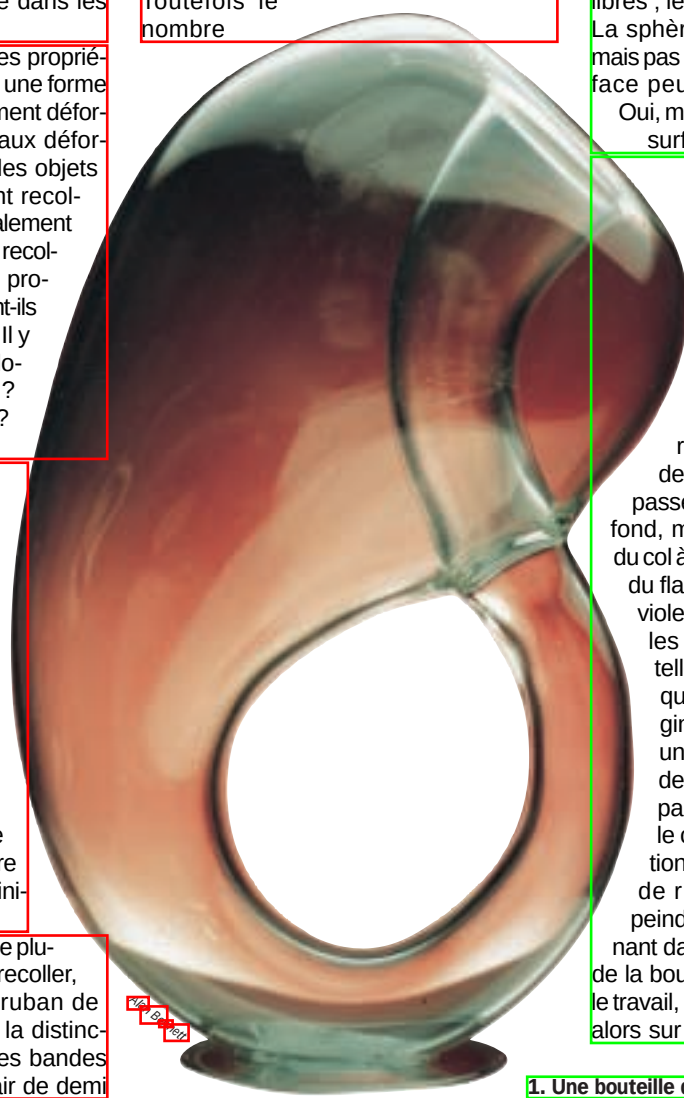
tours, et les bandes recollées après un nombre impair de demi tours ; les premières n'ont qu'une face, et les secondes en ont deux. Pour comprendre pourquoi, coupez une bande tordue de trois demi tours, par exemple ; puis, en conservant les deux coupures parallèles, déplacez l'une des extrémités afin de la dérouler (et non la détordre), avant de la ramener vers l'autre extrémité ; vous obtiendrez, par recollement, un ruban de Möbius, mais pas un simple cylindre. Toutefois le nombre

exact de demi torsions n'est pas sans importance : il détermine la façon dont la bande est plongée dans l'espace qui l'environne. La question de la géométrie intrinsèque de la bande est donc d'un autre ordre que la manière dont la bande est plongée dans l'espace. La première ne dépend que de la parité du nombre de demi tours, la seconde de la valeur exacte de ce nombre.

Le cylindre, obtenu par recollement d'une bande sans torsion, a deux bords libres ; le ruban de Möbius en a un seul. La sphère, en revanche, a deux faces mais pas de bord. Une surface à une seule face peut-elle ne pas avoir de bord ?

Oui, mais, dans notre espace, une telle surface se recoupe elle-même.

Cette particularité ne gêne pas les topologistes, dont c'est le métier d'imaginer des surfaces dans des espaces de dimensions supérieures ou, même, débarrassées des espaces où ces surfaces seraient plongées. En revanche, pour les souffleurs de verre, la difficulté est considérable. La figure 1 représente pourtant une bouteille de Klein en verre : le col a été étiré, passé à travers le flanc et recollé au fond, mais par l'intérieur. Le passage du col à travers le flanc sépare les points du flanc de façon permanente, ce qui viole les règles de la topologie, mais les topologistes admirent tant une telle matérialisation de leurs idées qu'ils ne s'en plaindront pas. Imaginons que nous voulions peindre une telle bouteille : nous partirions de l'extérieur du bulbe supérieur, par exemple, et descendrions vers le col. En arrivant à l'auto-intersection, nous poursuivrions comme si de rien n'était et continuerions à peindre le col, qui se trouve maintenant dans ce qui semble être l'intérieur de la bouteille. Toutefois, en poursuivant le travail, nous verrions que nous sommes alors sur la face « interne » du bulbe : ce



1. Une bouteille de Klein soufflée par Alan Bennett.



2. Bouteille de Klein à trois cols.



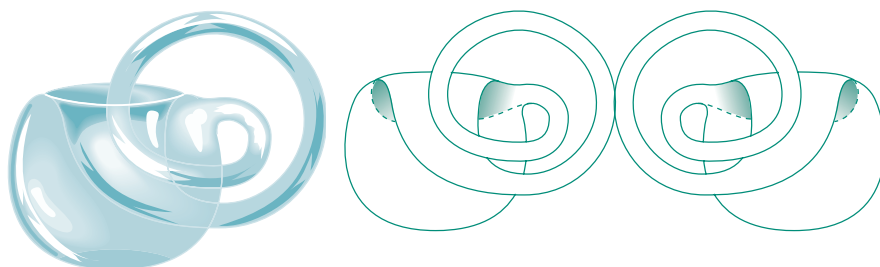
3. Trois bouteilles de Klein emboîtées.



4. Cette bouteille de Klein à col spiralé se coupe en deux rubans tordus de sept demi-tours avant recollement.



5. Autre bouteille de Klein spiralée.



6. Le vase d'Ouslam, dont le col s'enroule deux fois, se sépare en deux rubans de Möbius à trois demi-tours quand on le coupe verticalement.

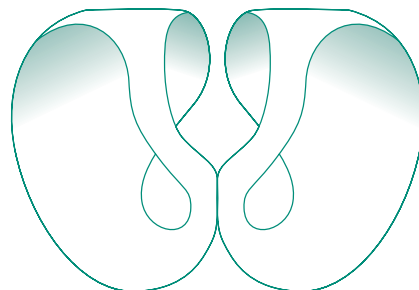
qui semble être l'intérieur se relie continûment à l'extérieur : la bouteille de Klein n'a qu'une face et pas de bord.

A. Bennett avait entendu dire que si l'on coupe une bouteille de Klein le long d'une courbe appropriée, elle se sépare en deux rubans de Möbius. Plus précisément, une telle opération, pour une bouteille immergée dans l'espace ordinaire telle celle d'A. Bennett, conduit à deux rubans tordus d'un demi-tour. A. Bennett se demandait quelle forme il faudrait couper pour obtenir deux rubans tordus de trois demi-tours. Son programme de recherche ? C'est un acte de foi : «Je crois que si l'on réalise assez de variations du concept de base, la solution la plus logique ou la plus évidente saute finalement aux yeux.»

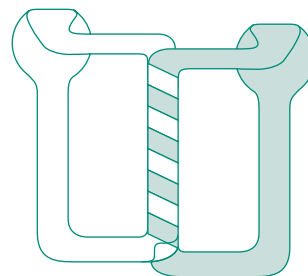
Soufflant ainsi le verre à la recherche d'une surface qui formerait des bandes à trois demi-tours, A. Bennett testa des objets où une trinité apparaissait : des bouteilles à trois cols, des bouteilles trois fois emboîtées, des bouteilles à cols recourbés trois fois... Il apprit à prévoir ce que donneraient les coupures, vérifiant ses prévisions en sciant effectivement les merveilleuses bouteilles qu'il soufflait.

La solution apparut alors qu'il avait soufflé une bouteille dont le col formait deux boucles, avec trois auto-intersections. Il la nomma «vase d'Ouslam», d'après l'oiseau mythique qui vole en cercles décroissants jusqu'à disparaître à l'intérieur de lui-même. Quand on coupe ce vase d'Ouslam verticalement, selon son plan de symétrie (le plan du papier, pour la figure 6), on obtient deux rubans à trois demi-tours : le problème est résolu.

Comme un mathématicien l'aurait fait, A. Bennett poursuivit l'étude : comment obtenir deux rubans à cinq demi-tours ? À sept demi-tours ? À neuf demi-tours ? Le problème général a-t-il une solution ? Ajoutant une boucle supplémentaire au vase d'Ouslam, A. Bennett obtint, après découpe, les rubans à cinq demi-tours, et, chaque fois qu'il ajoutait une boucle, il obtenait deux demi-tours de plus dans les rubans formés ensuite. Puis il simplifia la forme, afin de la rendre plus solide, et il obtint des bouteilles de Klein spiralées. Celle qui est représentée sur la



7. On obtient deux rubans de Möbius quand on coupe une bouteille de Klein comme indiqué ici.



RESSUS DE LAURE GERE

8. Une bouteille de Klein coupée selon une spirale.

figure 4 donne deux rubans à sept demi-tours, après découpe, et chaque tour de spirale ajouté conduit à deux demi-tours de plus sur les rubans formés.

Ayant ainsi compris l'importance des tours de spirale, A. Bennett comprit qu'il pouvait revenir à la bouteille de Klein initiale, en déroulant la spirale. La ligne de coupure se déforme simultanément et s'enroule alors en spirale. Ainsi, si l'on coupe une bouteille de Klein ordinaire selon une spirale, on obtient autant de demi-tours que l'on veut (neuf dans le cas représenté sur la figure 8).

Enfin, une curiosité : on sait maintenant couper une bouteille de Klein afin d'obtenir deux rubans à un demi-tour, mais on peut aussi couper une bouteille de Klein afin d'obtenir un seul ruban de Möbius. Je vous laisse chercher comment, et je vous donnerai la solution dans un prochain numéro de *Pour la Science*.

Thomas BANCHOFF, *La quatrième dimension*, éditions Pour la Science, collection L'univers des sciences.



# Rotations culinaires

SHAWN CARLSON

*Comment construire une centrifugeuse à partir d'un robot culinaire.*

**L**es biochimistes ont l'art d'utiliser des méthodes expérimentales simples pour explorer des mystères insondables : ne se préoccupent-ils pas du fonctionnement de la vie ? Si la dernière décennie a vu l'éclosion de méthodes perfectionnées et coûteuses, des découvertes restent à la portée des amateurs éclairés. Pourquoi ces derniers se sont-ils généralement peu intéressés à la biochimie ? Probablement parce que peu d'entre eux disposent de cet outil indispensable qu'est la centrifugeuse.

Dans de tels appareils, la rotation rapide de petits tubes contenant des suspensions sépare les divers constituants. Comme des passagers dans une automobile qui prend un virage serré, les particules en suspension dans les tubes sont soumises à une force centrifuge qui les fait précipiter. Les biochimistes utilisent cet effet pour accélérer une précipitation. Pour purifier des protéines, par exemple, ils ajoutent souvent un acide ou une base faibles (du vinaigre cristallin ou du bicarbonate, par exemple) afin de provoquer une précipitation ; puis la forte pesanteur apparente exercée par la rotation provoque la sédimentation des particules coagulées.

Aucune autre méthode ne permet d'isoler si rapidement de grandes quantités de composés. Si vous voulez extraire des bactéries de leur milieu de culture, purifier des protéines ou isoler des anticorps, vous devrez utiliser une centrifugeuse. Hélas, les appareils professionnels coûtent des milliers de francs.

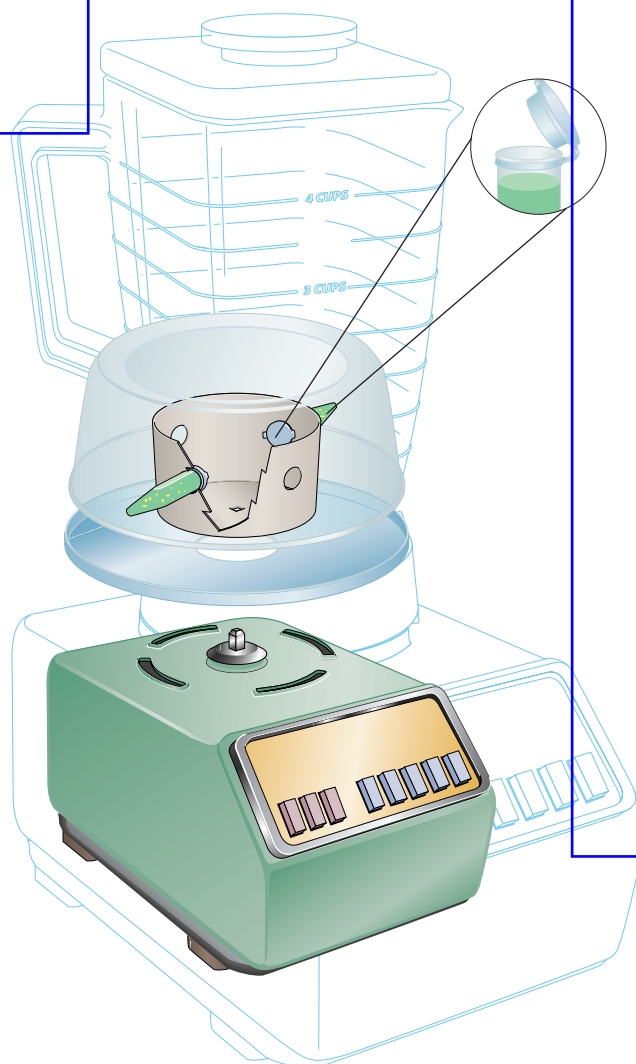
Charles Carter, un ingénieur de l'Ontario, a mis au point une centrifugeuse à la fois peu coûteuse et d'une construction très

simple. Une après-midi de travail et une centaine de francs, un vieux robot de cuisine et quelques objets en plastique suffisent pour reproduire son système, qui est une microcentrifugeuse plutôt qu'une centrifugeuse, car elle met en rotation de petits tubes à centrifuger. Le système est composé de trois parties : une base comportant un moteur, un cylindre

rotatif interne, auquel on fixe les tubes à centrifuger, et une enceinte de protection externe. Avant de construire le système, procurez-vous de petits tubes à centrifuger chez un fournisseur de matériel de laboratoire (quelques adresses sont indiquées en fin d'article).

La plupart des mixers ont un disque de plastique posé directement sur le sommet de la base. Éliminez cette pièce à la scie et lissez les bords découpés au papier de verre. Puis réalisez l'enceinte de protection en utilisant le fond d'un de ces récipients en plastique où l'on conserve les aliments : prenez un modèle de plus de 20 centimètres de diamètre et de 10 centimètres de profondeur. Coupez un gros trou au centre du couvercle et collez-le face en bas sur la base du bloc moteur, à l'aide d'une colle très forte, en prenant garde de ne pas recouvrir les aérations qui servent au refroidissement du moteur. Réalisez le rotor à partir d'un fond de tube en polychlorure de vinyle (PVC) : la pièce doit être un cylindre de dix centimètres de long, fermé à une extrémité, et avoir une épaisseur de 0,3 centimètre au moins. Dans la partie cylindrique, percez quatre trous régulièrement répartis, à mi-hauteur, en utilisant des mèches de perceuse de diamètres croissants : c'est dans ces trous que vous placerez les tubes à centrifuger.

L'axe du moteur devra être fixé exactement au centre de masse de cette pièce en PVC. Or le centre de masse n'est pas toujours le centre géométrique. Pour déterminer la position où vous devrez percez le fond du cylindre de PVC, suspendez la pièce par une petite ficelle de sorte que le fond plan soit per-



Un vieux robot culinaire peut être transformé en centrifugeuse de laboratoire.

pendiculaire au sol. Le centre de masse est sur la droite qui passe par la ficelle. Marquez alors cette droite en enduisant de craie un fil à plomb, en suspendant ce fil à côté de celui qui tient la pièce, puis en accolant les deux fils : la craie laissera une marque sur le PVC. Puis répétez l'opération en fixant la pièce par un autre point du bord : l'intersection des segments marqués à la craie indique le centre de masse. Le forage au centre de masse doit ensuite être bien perpendiculaire au fond plan : si vous ne vous sentez pas capable de garder la verticalité du foret, fixez votre perceuse sur une potence abaissable. L'axe de nombreux mixer est de section carrée : Ch. Carter propose de l'introduire dans le trou rond que vous aurez percé, puis de coller l'axe au fond.

Lors de vos premiers tests, utilisez des tubes à centrifuger vides, et pensez toujours à bien répartir la charge. Faites tourner le moteur à vitesse aussi faible que possible, en protégeant vos mains. Si vous entendez du bruit et si vous voyez des vibrations trop importantes, arrêtez aussitôt le moteur et procédez à des réglages : retirez un des tubes, par exemple, puis remettez le moteur en marche ; si les bruits ou les vibrations cessent, vous saurez que vous devrez retirer de la masse du côté de ce tube : éliminez un petit morceau de PVC au bord supérieur de la pièce, à la verticale de la position du tube retiré. Recommencez ces ajustements jusqu'à ce que les vibrations disparaissent.

Pour tester votre centrifugeuse, remplissez deux tubes propres d'un millilitre de lait écrémé, puis finissez de remplir les tubes avec respectivement de l'eau et du vinaigre cristal (la concentration en acide acétique est égale à cinq pour cent). Placez les tubes dans des trous opposés, les couvercles à l'intérieur de la pièce en PVC (on doit disposer deux tubes opposés, de masses égales, sans quoi la rotation serait déséquilibrée).

Placez l'enceinte de protection et faites tourner pendant trois minutes, à la vitesse minimale. Quand le moteur est arrêté, retirez l'enceinte de protection, sortez les tubes et observez-les : le blanc du lait a sédimenté dans le fond du tube où le lait avait été additionné de vinaigre. En effet, le vinaigre a réduit le pH et a provoqué le caillage du lait : les protéines ont sédimenté, tandis que l'eau et la matière grasse ont surnagé.

**Quelques adresses où vous pourrez vous procurer des tubes à centrifuger :**

**Laboscope, 1 rue Le Goff, 75005 Paris.**  
(Tel : 01 44 32 03 32).

**Bioblock Scientific, BP 111, 67403 Illkirch cedex. Tel : 03 88 67 14 14**



# Entomologie

## Catalogue des Aphididae du monde

Georges Remaudière et Marc Remaudière. Éditions INRA (476 pages), 1997.

## Les pucerons des arbres fruitiers

Maurice Hullé, Éveline Turpeau, François Ceclant et Marie-Jeanne Rahn. Éditions ACTA et INRA, (80 pages) 1998.

Tous ceux qui cultivent les plantes, amateurs ou professionnels, ont eu à déplorer les dégâts des pucerons, dont les colonies denses envahissent les organes végétaux. Regroupés dans la famille des Aphididés, ils sont largement répandus dans le monde et étroitement inféodés au règne végétal. Grâce à leurs pièces buccales du type piqueur-suceur, ils se nourrissent essentiellement de la sève des plantes et sont d'importants ravageurs des cultures.

Leur cycle évolutif est complexe. À partir d'un œuf d'hiver, sort, au printemps, une femelle sans aile, nommée fondatrice. Celle-ci donne naissance, sans fécon-

dation (parthénogenèse), à des femelles vivipares, aptères ou ailées, qui se reproduisent de la même manière, donnant, à la belle saison, six à douze générations qui engendrent chacune plusieurs dizaines d'individus. En automne apparaissent des individus sexués, qui s'accouplent et pondent des œufs d'hiver. À ce cycle simple, dit monoécique, s'oppose un autre cycle, dit dioécique, qui se déroule obligatoirement sur deux plantes de familles différentes (souvent une herbacée et une ligneuse). Bien des variantes de ce schéma de base sont adaptées aux conditions climatiques.

La double reproduction saisonnière, sexuée et asexuée, est un des aspects les plus curieux de leur biologie. Après avoir longtemps intrigué, la parthénogenèse de ces insectes fut démontrée en 1740 par Charles Bonnet, sous l'impulsion de Réaumur, à la suite d'une expérimentation très minutieuse. Grâce à ce système de reproduction et à la viviparité, la rapidité de leur développement est considérable : on a estimé qu'en un an, une famille de pucerons formerait une masse vivante qui recouvrirait la Terre... mais leurs pullulations sont limitées par les conditions climatiques et par leurs nombreux ennemis. Parmi ces derniers figurent en bonne place les insectes tant parasitoïdes (petites guêpes...) que prédateurs (coccinelles, chrysopes, syrphes...).

Dans le domaine agroeconomique, ils représentent des ravageurs dont les prélèvements de sève affaiblissent les plantes cultivées, quand ne s'ajoute pas la transmission de virus pathogènes.

Si, sur le plan biologique, les pucerons ont été relativement bien étudiés, leur systématique est restée longtemps compliquée et incertaine, en raison de leur polymorphisme. En 1976, les entomologistes hollandais M. Eastop et Ris Lambers publiaient un *Catalogue des Aphides du Globe*, aujourd'hui épuisé. Depuis cette date, plus de 700 espèces nouvelles ont été décrites. Aujourd'hui on compte plus de 4 700 espèces d'Aphididés, réparties en 25 sous-familles et 18 tribus. Le *Catalogue des Aphididae du monde*, dont la bibliographie comporte plus de 1 200 titres, sera le livre de référence de tous ceux qui se penchent sur la systématique de ce groupe si important.

Avec un objectif pratique, *Les pucerons des arbres fruitiers* constitue un document utile sur les 20 principales espèces rencontrées sur ces cultures. Grâce au réseau AGRAPHID (observatoires permanents des populations de pucerons ailés disposés en plusieurs points du territoire et analysant près de 400 espèces) sont apportées des pré-

sions sur la répartition géographique, les rythmes d'activité et les variations annuelles d'abondance de sept des espèces les plus nuisibles aux vergers.

Cette brochure s'adresse autant aux producteurs professionnels qu'aux jardiniers amateurs.

Jacques d'AGUILAR

# Histoire des sciences

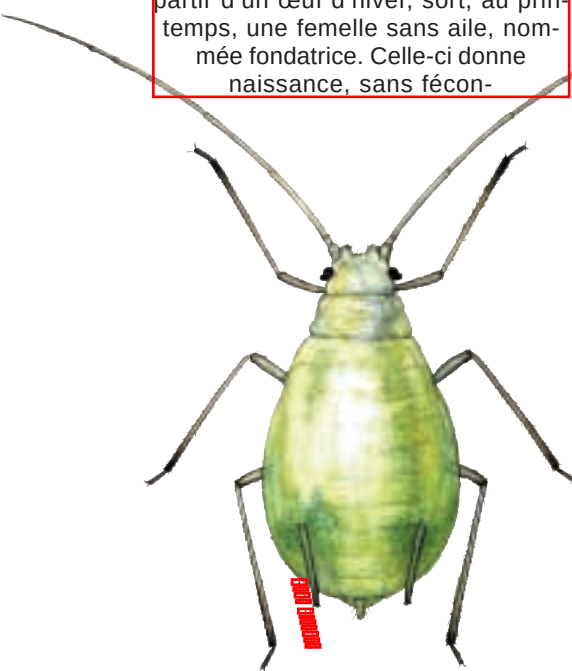
## Le legs de Claude Bernard

Mirko Grmek. Éditions Fayard, 1997.

Dans l'atmosphère feutrée des bibliothèques, à certaines places réservées et numérotées, au pied des lampes qui diffusent une lumière tamisée, le chercheur qui consulte le fonds ancien (avant 1880) manipule avec respect (il a des gestes d'horloger), concentration (le monde et le temps sont abolis) et émotion des manuscrits dont il ignore souvent le parcours avant leur dépôt et leur enregistrement officiels : toutes les archives ont une histoire surprenante, et la notoriété du personnage dont elles proviennent ne change rien à l'affaire.

On pouvait imaginer qu'à la mort de Claude Bernard (1813-1878) les archives scientifiques de celui qui n'était pas seulement un grand physiologiste, mais «la physiologie elle-même» avaient été déposées dans leur intégralité au Collège de France, et que les historiens des sciences pouvaient se mettre au travail. Pas du tout : les notes manuscrites, cahiers d'expériences, feuilles volantes, dos de lettres, papiers divers sur lesquels Bernard avait consigné ses projets d'expériences, ses hypothèses, ses réflexions philosophiques se trouvaient à son domicile parisien de la rue des Écoles et dans sa maison de Saint-Julien-en-Beaujolais. Certains de ces documents ont été recueillis par des disciples, dont le fidèle assistant Arsène d'Arsonval et Marcellin Berthelot, puis les précieux feuillets ont dormi longtemps, dans des greniers successifs. Quand on a confié le soin de classer le legs manuscrit à un spécialiste de Bernard, Mirko Grmek, en 1961, il a fallu six années de travail.

Le résultat est à la hauteur de la tâche : nous recevons aujourd'hui un livre admirable où Claude Bernard apparaît avec



Sur ce puceron vert du pêcher, on distingue, à l'extrémité supérieure de l'abdomen, deux «cornicules», des tubes d'où sort le liquide sucré nommé miellat, que les fourmis apprécient et qui, déposé sur les plantes, constitue un milieu où se développent des champignons, les fumagènes (qui font un revêtement noir).

toutes les nuances d'un homme qui affine ses pensées et ses théories, expérimente, tâtonne, réalise de grandes synthèses, a des convictions et des présupposés philosophiques, se querelle avec d'autres scientifiques, et se montre capable de compromis, quand il veut atteindre son but, telle la victoire à une élection. En 1868, il présente sa candidature à l'Académie française, au siège du neurophysiologiste Pierre Flourens (1794-1867). Bernard est alors au faite de sa carrière. Sous Napoléon III, ceux qui «font» les élections à l'Académie sont les bien-pensants antigouvernementaux : «Si Claude Bernard est pour Dieu et contre l'empereur, il sera élu.» Le candidat Bernard n'hésite pas : il rédige une profession de foi théiste et spiritualiste, et, le 7 mai 1868, il est effectivement victorieux, battant notamment à plate couture le très grand écrivain Théophile Gautier. Entre l'élection et le discours de réception, un an se passe, pendant lequel le physiologiste reprend ses distances avec Dieu.

Car Bernard a toujours été agnostique et matérialiste : «La science n'a pas pour objet de prouver ni désapprouver Dieu. Elle est indépendante de cette question.» Son autre problème est le peu d'estime qu'il porte à son prédécesseur. La seule qualité qu'il lui accorde est d'avoir été un «illustre secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences». Le discours est composé pas à pas, chaque mot est pesé. Il en discute les différentes versions avec son amie de cœur Marie Sarah Raffalovitch. Le texte est si maîtrisé, le ton si compassé, qu'il est accueilli, le jour de sa réception (le 27 mai 1869), dans une ambiance glaciale, presque hostile. Bernard a trahi : pas de coups de griffe contre le gouvernement, et ses vues matérialistes sont considérées comme des attaques contre les fondements de la religion... Les thèmes scientifiques (l'apologie de la physiologie et de la méthode expérimentale) passent au second plan. Le public et les journalistes attendaient autre chose.

Ainsi, de nombreuses anecdotes, privées ou publiques, scientifiques ou mondaines, rendent cette biographie d'une lecture passionnante : je la conseille aux étudiants qui s'engagent dans le cursus scientifique, afin qu'ils comprennent comment se construisent les grands concepts en biologie, et je la recommande aussi aux chercheurs qui ne prennent plus le temps d'une réflexion épistémologique ou aux enseignants qui pratiquent la déduction et l'induction abusives. Mieux encore, j'engage tout amateur de culture scientifique à lire M. Grmek, qui mérite pleinement ce vaste lectorat.

Michèle FEBVRE

# Paléontologie

## Histoire de la paléontologie

Eric Buffetaut. Presses Universitaires de France (collection Que sais-je?), 1998.

**L**es ouvrages en langue française qui font l'histoire de la paléontologie sont épuisés. Ce petit livre devrait satisfaire le grand public, et attirer les spécialistes, en raison des occasions de discussions qu'il présente.

Eric Buffetaut traite le sujet thématiquement et chronologiquement. Il évoque l'ancienneté de l'intérêt pour les fossiles découverts dans les niveaux préhistoriques : les médecines traditionnelles ont utilisé des restes fossiles aussi bien en Asie qu'en Europe. Puis il examine les développements de la discipline devenue la paléontologie. L'historien grec Hérodote, vers 450 avant notre ère, pensait déjà que les coquillages fossiles étaient des restes d'organismes. On a opposé à cette conception que, dans la région méditerranéenne, la tectonique avait surélevé des niveaux quaternaires et que les prétendus fossiles n'étaient peut-être que des restes d'organismes actuels. Anciens? Modernes? Hérodote, en tout cas, admettait la na-

ture organique de ces restes, et c'est cela qui importe.

Quasi simultanément, le concept de *vis plastica* s'élabore : une force modelant des pierres à l'image des êtres vivants. La question, en se compliquant, se prolonge jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle. Car, pendant toute cette période de questionnement sur les bases de la paléontologie, des hommes sont assez ouverts pour admettre la nature organique des fossiles : Albert le Grand, des penseurs chinois, Boccace, Léonard de Vinci, Bernard

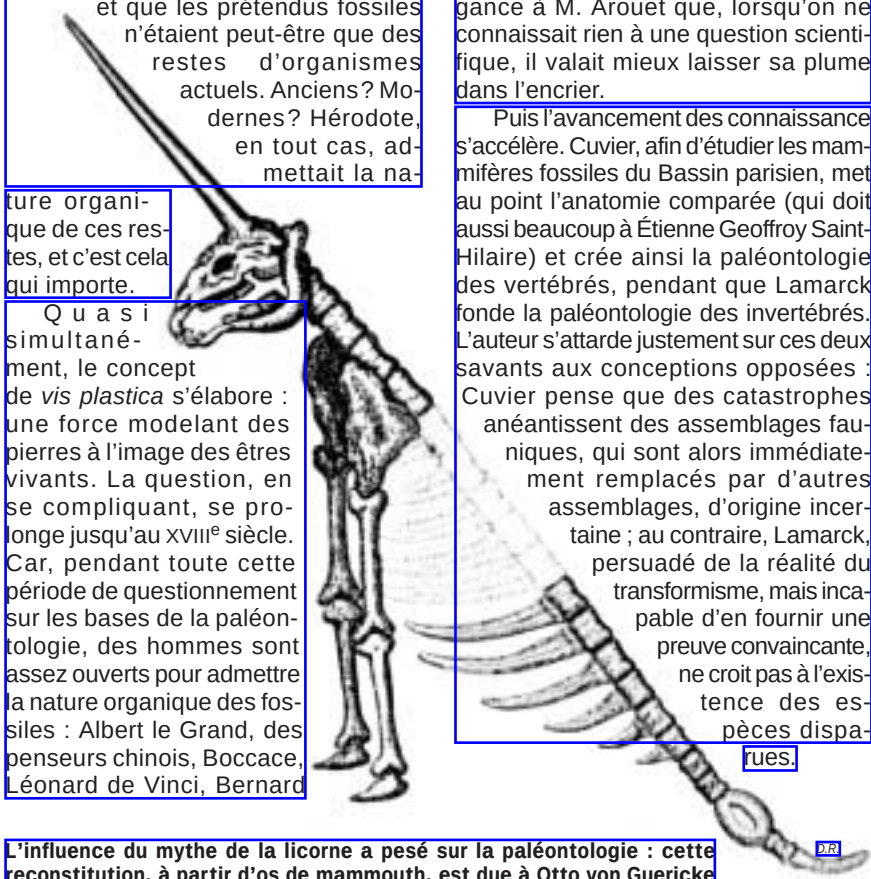
Palissy ou l'anatomiste et géologue danois Nicolas Sténon (1638-1686), qui reprit la démonstration de la vraie nature des dents de squales fossiles. Nous sommes alors à l'orée du XVIII<sup>e</sup> siècle : l'usage de l'anatomie comparée commence à se généraliser, et l'Italien M. Campini, en 1688, démontre par comparaison avec des moulages d'os d'éléphants que les os qu'il étudiait étaient des restes de proboscidiens (le sous-groupe de mammifères ongulés qui comprend les éléphants actuels).

Toutefois, si la nature organique des fossiles était plus facilement acceptée, les restes fossiles étaient fréquemment interprétés comme des victimes du déluge biblique. Le siècle des Lumières allait prendre à bras le corps divers problèmes : la présence d'animaux aujourd'hui tropicaux dans des régions tempérées (Amérique du Nord) ou froides (Sibérie), l'existence d'animaux disparus, telles les ammonites. Les solutions proposées ne furent pas toujours bonnes, mais la connaissance progressait.

A la fin du siècle, l'abbé Soulay, puis William Smith jetaient les bases de la biostratigraphie, fondée sur les faunes fossiles. E. Buffetaut épingle Voltaire, dont les opinions sur la géologie et sur la paléontologie sont particulièrement rétrogrades : Buffon fit savoir avec élégance à M. Arouet que, lorsqu'on ne connaissait rien à une question scientifique, il valait mieux laisser sa plume dans l'encrier.

Puis l'avancement des connaissances s'accéléra. Cuvier, afin d'étudier les mammifères fossiles du Bassin parisien, met au point l'anatomie comparée (qui doit aussi beaucoup à Étienne Geoffroy Saint-Hilaire) et crée ainsi la paléontologie des vertébrés, pendant que Lamarck fonde la paléontologie des invertébrés. L'auteur s'attarde justement sur ces deux savants aux conceptions opposées : Cuvier pense que des catastrophes anéantissent des assemblages fauniques, qui sont alors immédiatement remplacés par d'autres assemblages, d'origine incertaine ; au contraire, Lamarck, persuadé de la réalité du transformisme, mais incapable d'en fournir une preuve convaincante, ne croit pas à l'existence des espèces disparues.

L'influence du mythe de la licorne a pesé sur la paléontologie : cette reconstitution, à partir d'os de mammoth, est due à Otto von Guericke (1602-1686).

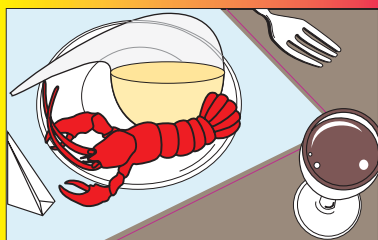


## FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent  
à écouter la chronique  
de Marie-Odile Monchicourt :

## Info Sciences

Tous les jours  
sur **France Info**  
à 15 heures 41,  
17 heures 10,  
20 heures 12,  
22 heures 12,  
et 23 heures 42



Les prochains  
résultats présentés  
dans la rubrique  
Science et Gastronomie  
seront annoncés sur  
**France Info**  
le 27 mai 1998.

FRANCE

info

Dans la foulée de Cuvier, la paléontologie stratigraphique se précise, avec Alcide d'Orbigny, tandis qu'en Grande-Bretagne Adam Sedgwick et Roderick Murchison établissent les grandes subdivisions de l'ère primaire. Toutefois le système de d'Orbigny, avec ses 27 catastrophes et créations successives, atteignait ses limites, d'autant plus que Charles Lyell avait démontré que les événements du passé dépendaient de causes identiques aux causes actuelles, ce qui excluait les catastrophes. L'étape suivante ne vint pas des paléontologues, car Darwin n'utilisait guère les fossiles dans son *Origine des espèces*.

Malgré des opposants farouches, tels Louis Agassiz et Richard Owen, la paléontologie accepta assez vite le transformisme, étayé par la découverte de formes intermédiaires. Les fossiles absents de l'œuvre de Darwin réapparurent dans la «théorie synthétique de l'évolution», avec les travaux de George Simpson : si les fossiles ne permettent guère de déduire les mécanismes de l'évolution, ils permettent de les tester sur de longues durées.

La découverte de fossiles répartis sur l'ensemble du Globe avait, dès le début du siècle, permis de reconnaître des provinces paléogéographiques, au cours des temps géologiques. Alfred Wegener ne se priva pas d'utiliser ces arguments pour tenter de convaincre de la réalité de la dérive des continents. L'auteur fait remarquer le manque d'audace de la plupart des paléontologues, qui n'osèrent pas braver les oppositions de la communauté géologique. Par exemple,

Simpson avait bien compris que les fossiles ne pouvaient, à eux seuls, expliquer l'évolution, mais ses interprétations paléogéographiques font appel à de multiples ponts continentaux. Il fallut un demi-siècle pour que la tectonique des plaques confirme les théories wegenériennes.

Venons-en à la paléontologie moderne. E. Buffetaut refuse le caractère universel du cladisme : s'il a imposé plus de rigueur dans la définition des caractères primitifs et évolués, il donne une impression de rigueur absolue qui camoufle la subjectivité. Cette seule objection relativise son efficacité. Notons qu'au moment où l'on enseigne la méthode cladistique dans les lycées de nombreux paléontologues, confrontés à l'épreuve des faits, doutent qu'elle soit une panacée, jusqu'à l'auteur de ces lignes qui a pourtant commis un certain nombre de cladogrammes. Le cladisme doit demeurer ce qu'il est : un outil et non un dogme. E. Buffetaut rappelle également que, depuis près de 20 ans,

le catastrophisme a fait un retour en force avec la démonstration d'un impact météoritique à la limite Crétacé-Tertiaire. Il note toutefois que le rôle de cet impact dans les extinctions de la fin du Crétacé reste à discuter sur la base de données objectives.

E. Buffetaut termine ce petit ouvrage par un chapitre intitulé «Fossiles, culture et grand public», où il montre l'intérêt du public pour les fossiles, depuis maintenant près de deux siècles. Alors que la discipline peut se sentir menacée par l'exubérance des sciences de la Terre ou de la vie, il est réconfortant de constater que le public reste attiré par les fossiles.

Faut-il écrire que je recommande la lecture de ce petit livre ?

Michel MARTIN

## Histoire des sciences

### Histoire des sciences arabes (trois tomes)

Sous la direction de Roshdi Rashed, avec la collaboration de Régis Morelon. Éditions du Seuil, 1997.  
Vol. 1 : Astronomie théorique et appliquée (384 pages) ;  
vol. 2 : Mathématiques et physique (432 pages) ; vol. 3 : Technologie, alchimie et sciences de la vie (330 pages).

**D**'entrée de jeu, Roshdi Rashed précise comment il convient d'entendre le titre de cet ouvrage à caractère encyclopédique : l'*Histoire des sciences arabes* traite des activités scientifiques et techniques qui se menèrent en langue arabe depuis le VIII<sup>e</sup> siècle jusqu'au XV<sup>e</sup>, entre des latitudes qui s'étiraient de l'Espagne à la Chine. Notre savoir en la matière a été transformé au cours des dernières décennies, et ces trois volumes en témoignent de plusieurs façons.

Nos connaissances se sont d'abord accrues. Il suffit de considérer le nombre de spécialistes associés à l'entreprise pour ne pas s'en étonner : l'étude de la science arabe a bénéficié, dans la seconde moitié de ce siècle, d'un soutien institutionnel notable, et l'ouvrage propose, sans prétendre à l'exhaustivité, une première synthèse.

Cependant, au-delà de ces transformations, de nature purement quantitative, l'entreprise reflète deux mutations plus fondamentales de notre savoir sur la science arabe. Elles devraient, à terme, conduire à un bouleversement plus large en histoire des sciences.

La première mutation est en germe depuis le siècle dernier. Le rappel de quelques faits nous aidera à en apprécier la portée. Dès leur émergence, les communautés scientifiques du monde arabophone n'eurent de cesse d'identifier les écrits fondamentaux qu'avaient produits leurs prédécesseurs grecs et de les traduire pour en nourrir leurs propres travaux. C'est ainsi que l'essentiel du corpus scientifique grec fut rendu en arabe, un fait dont les conséquences restent capitales pour notre accès aux textes grecs eux-mêmes.

Par exemple, les manuscrits arabes par lesquels les *Éléments de géométrie* d'Euclide nous ont été transmis sont plus anciens que les sources grecques conservées. Il y a plus : encore aujourd'hui, on extrait régulièrement des fonds de manuscrits arabes des textes hellénistiques que l'on croyait perdus ; leur traduction, jadis, en arabe les a sauvés du néant. L'étude de la science grecque ne peut donc pas faire l'économie de l'examen des traditions textuelles arabes.

Par ailleurs, au XII<sup>e</sup> siècle, lorsque les savants européens comprennent que la science de leur temps s'élabore en arabe, ils affluent vers le Sud et commencent à traduire en latin des textes de base. Ils découvrent ainsi, entre autres, la géométrie euclidienne et l'astronomie ptoléméenne, déjà lourde des premières transformations que lui avaient fait subir les astronomes arabes du IX<sup>e</sup> siècle, mais, également, l'algèbre et l'arithmétique positionnelle décimale, par le biais des plus anciens ouvrages arabes à leur être consacrés. L'Europe du Nord se fondera sur ces éléments pour nourrir une activité scientifique encore balbutiante.

Les sciences arabes se réduisaient-elles à ce que ces premières traductions y prélevaient ? Les scientifiques arabes s'étaient-ils contentés de transmettre un héritage grec sans le faire fructifier ? Certains en décidèrent hâtivement, pressés d'étayer la thèse selon laquelle, la science, occidentale par nature à les croire, se serait pour l'essentiel élaborée en Grèce, puis en Europe, à partir de la « Renaissance ». La thèse nécessitait de nier par principe la possibilité qu'une quelconque contribution ait été faite par ailleurs.

# POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06  
Tél : 01-55-42-84-00  
<http://www.pourlascience.com>

**POUR LA SCIENCE** Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte, assisté de Anne Gusdorf. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Paloma Cabeza-Orcel, Yvan Castin, Patrick Chautette, Bettina Debû, Paul Decaix, Luc Fougeirol, Christian Jeanmougin, Jean Laherrère, Marie-Thérèse Landousy, Annie Luciani, Anne Masé, Claude Olivier, Pierre Ozon, Jean-Pierre Turbil.

**SCIENTIFIC AMERICAN** Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : Robert Biewen, Frances Newburg, Anthony Degutis.

## PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06  
Tél. : 01 55 42 84 28.  
Télex : LIBELIN 202978F.  
Télécopieur : 01 43 25 18 29

**Étranger** : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

## SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon : 01 55 42 84 04.

## SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

## DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

**Canada** : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

**Suisse** : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay

**Autres pays** : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

**Toutes demandes d'autorisation de reproduire**, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressés par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

## © Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

en d'autres temps. Les échos de ces opinions résonnent encore aujourd'hui, alors que, dès le XIX<sup>e</sup> siècle, des historiens des sciences ont opposé des faits à leurs allégations, démontrant que bien des travaux originaux avaient été menés en arabe. Les faits ont continué à s'accumuler, l'*Histoire des sciences arabes* en fournit la preuve.

L'ouvrage témoigne également d'une prise de conscience. L'étude de la science arabe, devant dès ses débuts constamment défendre la légitimité de son objet, s'en est trouvée marquée jusque dans les questions qu'elle privilégiait : comment mieux faire la preuve de l'originalité, de l'importance des scientifiques arabes, sinon en démontrant qu'ils avaient obtenu les mêmes résultats que les savants européens, mais avant eux ? Les historiens se sont ainsi lancés dans une recherche des précurseurs, guidée, par l'aval, par l'état que devait ensuite prendre la science moderne en Occident. Notons que l'étude des sciences en Inde, en Chine, bref dans les zones non occidentales, a connu la même dérive et pour les mêmes raisons : la thèse d'une nature occidentale de la science chez les uns a mis les spécialistes des zones non occidentales sur la défensive. Insistant sur une collection toujours plus large des résultats par lesquels des éléments de la science moderne avaient été anticipés ici et là, hors de l'Occident, l'histoire des sciences dites non occidentales masquait en conséquence les cohérences des programmes de travail dont ces résultats ponctuaient le déploiement.

L'*Histoire des sciences arabes* témoigne de ce que la discipline a partiellement rompu avec cette logique. En montrant en quoi la connaissance de la contribution arabe constitue une condition *sine qua non* pour la compréhension de la science moderne, l'ouvrage la fait émerger non plus comme une série d'îlots, mais comme un continent à part entière. L'image éclatée d'antan fait progressivement place à la description de courants de recherche distincts, qui se déploient, se déplacent, se rencontrent, se fécondent, se réorganisent. Par suite, le long laps de temps, du VIII<sup>e</sup> au XV<sup>e</sup> siècle, au cours duquel des travaux originaux se sont menés en arabe n'apparaît plus comme formé d'un seul tenant ; on y distingue des périodes.

La première mutation renouvelle en conséquence notre compréhension du processus de transmission, du Nord vers le Sud : nous savons qu'au XII<sup>e</sup> siècle les traductions vers le latin n'ont essentiellement prélevé, du corpus

arabe, que les textes les plus anciens et les plus élémentaires ; la recherche se poursuivait alors en arabe à un tout autre niveau, et les multiples échos que ces développements ultérieurs éveillent, avec les œuvres scientifiques de Nicolas Copernic (1473-1543), de François Viète (1540-1603) ou de René Descartes (1596-1650), par exemple, impliquent que la transmission s'est poursuivie sur plusieurs siècles, selon des modalités autres qu'il reste à préciser.

La seconde mutation en cours dont témoigne l'*Histoire des sciences arabes* appelle à un renouvellement plus radical de la manière dont nous pensons les circulations de savoirs à l'échelle de la planète. Préoccupée de revendiquer une juste place aux contributions arabes entre l'antiquité grecque et les débuts de la science moderne en Occident, l'étude des activités scientifiques en arabe s'était pour beaucoup concentrée sur cet axe, promouvant une image linéaire, essentiellement occidentale, au sens géographique du terme, cette fois, du développement des sciences.

Certes, on savait que les scientifiques arabes s'étaient intéressés aux savoirs indiens, et que la Chine et le monde arabe avaient eu des contacts scientifiques directs, mais ces épisodes paraissaient secondaires : l'unique passé de référence restait la Grèce, l'unique futur semblait l'Europe.

Cette tendance a masqué une réalité pourtant cruciale pour la constitution de la science internationale. R. Rashed y insiste en introduction : à partir du VIII<sup>e</sup> siècle, des productions de multiples traditions, venues des quatre coins de la planète, ont toutes été rendues progressivement en une seule et même langue : l'arabe. Plutôt que coincée entre la Grèce et l'Europe, c'est au confluent des principales routes du monde qu'il faut désormais se représenter la science arabe.

En ce sens, l'*Histoire des sciences arabes* est plus qu'une encyclopédie où s'engrangent des connaissances (il s'agit d'un outil d'étude plutôt que d'un livre de vulgarisation) ; elle annonce des transformations en profondeur des représentations générales de l'histoire des sciences.

Karine CHEMLA

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de *Pour la Science* est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>