

LA NAISSANCE • LA VIE DE SAKHAROV • LE DRAGON DE KOMODO



Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Mai 1999

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

*Quand Vénus
entra en éruption*

**Le climat
de Vénus**

Canada : \$ 8,75



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

5

JEU-CONCOURS

Construction de triangles

par Pierre Tougne

6

TRIBUNE DES LECTEURS

7



POINT DE VUE

Des scientifiques s'égarent...

par Guillaume Lecointre

8

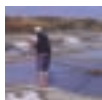


PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Les premières xénogreffes humaines

par Jean-Louis Fischer

12

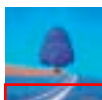


SCIENCE ET GASTRONOMIE

Grains de sel

par Hervé This

16



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

20

■ Cravate et maths ■ Un cadavre exquis? ■ Bleu cerise



■ La résistance des ginkgos ■ Le tout et les parties

■ Nœuds et ADN ■ Entre l'arbre et l'écorce ■ Aucun repunit n'est une puissance pure ■ Ventouses lumineuses ■ Étoile spirale

■ Le canard... ■ Le verlan et la fracture sociale



IDÉES DE PHYSIQUE

La taille des molécules

par Roland Lehoucq

96

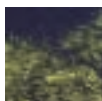


LOGIQUE ET CALCUL

La conjecture de Kepler démontrée

par Christoph Pöppe

100



VISIONS MATHÉMATIQUES

Chœurs lumineux

par Ian Stewart

104



L'IMAGE DU MOIS

Lutte territoriale

par Catherine Perrin et Renaud Boistel

106



ANALYSES DE LIVRES

108

■ Couleurs de la Terre, des mappemondes médiévales aux images satellitales, sous la direction de Monique Pelletier

■ La subduction océanique, de S. Lallemand

■ Biochimie : livre compagnon, de R.I. Gumport, A. Jonas, R. Mintel, C. Rhodes et R.E. Koeppel

■ Histoires d'une mer au Sahara. Utopies et politiques, de René Letolle et Hocine Bendjoudi

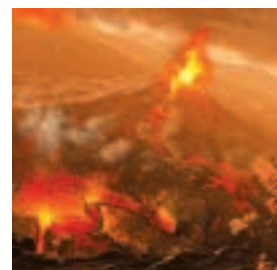
■ Plantes transgéniques : les grains de la discorde, sous la direction de P. Philippon et C. Tastemain

Le climat variable de Vénus

34

par Mark Bullock
et David Grinspoon

La cartographie précise de la surface de Vénus et l'analyse de son atmosphère actuelle révèlent que le climat de cette planète a fortement varié depuis un milliard d'années.



L'argent de l'ancien Pérou

42

par Alain Gioda
et Carlos Serrano

Entre 1590 et 1600, Potosi produisit plus de 40 pour cent de l'argent mondial! Un réseau de réservoirs et d'adduction d'eau, construit par les Espagnols, fournissait l'énergie hydraulique nécessaire au traitement du minerai d'argent.

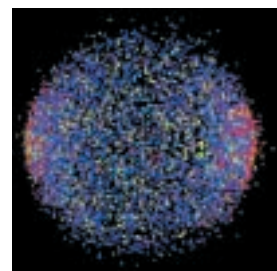


Un Big Bang miniature

48

par Madhusree Mukerjee

Des collisions de noyaux atomiques pourraient créer de la matière aussi dense et chaude que dans l'Univers primordial.



Le déclenchement de l'accouchement

56

par Roger Smith

Le placenta humain sécrète une hormone qui participe au déclenchement de l'accouchement. Les endocrinologues cherchent s'ils pourraient l'utiliser pour éviter des naissances prématurées.



La visualisation de l'embryon humain

par **Bradley Smith**

La microscopie par résonance magnétique révèle les secrets de l'embryon au cours de son développement.



64

Les éclipses de Soleil

par **Pierre Guillermier et Serge Koutchmy**

Spectacle naturel extraordinaire, les éclipses restent un moyen unique d'étudier la couronne, l'atmosphère chaude qui ceinture le Soleil.

Éclipses et chronologie

par **Denis Savoie**

Les éclipses anciennes nous renseignent sur le ralentissement de la rotation terrestre.



70

78

Le dragon de Komodo

par **Claudio Ciofi**

Le plus grand lézard du monde, maître incontesté de quelques petites îles de l'archipel indonésien, est menacé par l'homme.

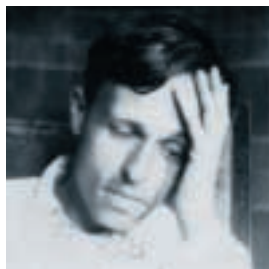


82

La métamorphose d'Andreï Sakharov

par **Gennady Gorelik**

Andreï Sakharov est le «père» de la bombe à hydrogène soviétique. Pourtant il fut lauréat du prix Nobel de la paix pour son combat en faveur des droits de l'homme. Comment s'est-il ainsi transformé?



90

Kepler avait doublement raison

Nous exploitons encore la combinatoire ouverte par l'hypothèse atomique : les propriétés de la matière sont déterminées par l'organisation géométrique des atomes et des molécules. Aussi était-il tentant de s'interroger sur l'organisation la plus compacte possible de molécules sphériques («soit une vache sphérique», ironisent les physiciens). C'est le problème, dit de Kepler, qui vient d'être résolu par le mathématicien américain Thomas Hales (voir *La conjecture de Kepler démontrée*, par Christoph Pöppe, page 100.)

Les mathématiciens appartiendraient à deux types, ceux qui bâtissent des théories et ceux qui résolvent des problèmes. Thomas Hales fait partie de la seconde catégorie. La conjecture énoncée par Kepler placerait celui-ci dans la première, si la formulation était sienne. Il n'en est rien : le problème avait été posé par un des premiers tenants de la théorie atomiste, Thomas Harriot. Mais on ne prêtait (déjà!) qu'aux riches ; la dénomination d'une conjecture, d'un résultat ou d'un théorème revient souvent au plus célèbre de ses formulateurs, même si cette paternité est indue.

Grâce aux lois de Kepler (et là, elles lui sont incontestables) sur le mouvement des planètes et aux enrichissements mathématiques de Newton, Laplace et leurs continuateurs modernes épaulés par la puissance de calcul informatique, nous prévoyons le mouvement des astres : le balayage de l'éclipse du 11 août est calculé à la seconde près (voir *Les éclipses de Soleil*, par Pierre Guillermier et Serge Koutchmy, page 70).

Plus qu'un spectacle, les éclipses sont des observatoires privilégiés de la couronne de lumière qui entoure le Soleil. Ce sont aussi, par la détermination des dates des éclipses anciennes, un moyen pour évaluer la viscosité de notre planète : les frottements liés à l'amortissement des marées, ralentissant son mouvement, décalent les dates des conjonctions planétaires (voir *Éclipses et chronologie*, par Denis Savoie, page 78).

Alors, quand même, merci Monsieur Kepler.
Philippe BOULANGER

Célébrité publique

La physique ne vous intéresse pas le moins du monde, mais vous avez entendu parler de Newton et d'Einstein ; il n'est pas possible que vous n'ayez aucune idée de leurs théories... La littérature vous ennuie, pourtant avez dû, un jour ou l'autre, feuilleter le dernier Modiano ou le dernier Sollers... Vous méprisez le sport et les champions, mais il n'empêche : vous savez qui est Zidane, et vous êtes capable de reconnaître Hinault sur une photo...

En somme, le critère le plus sûr pour savoir qu'une personne a réussi dans son domaine est que, de gré ou de force, elle se soit fait connaître de gens indifférents ou hostiles. Voilà qui donne une tonalité un peu désespérante à la valeur et au sens des efforts que nous faisons pour réussir aussi bien que possible dans le domaine où nous avons choisi de nous exprimer.

Notez bien les notes

Comme tout ce qui devient à la mode, le «principe de précaution» prend des formes inattendues. De nombreux musiciens font écouter leurs concerts par un huissier chargé de déterminer le nombre officiel de fausses notes qu'ils commettent. Ils espèrent de la sorte mettre fin à la vague de procès intempestifs intentés par des auditeurs furieux, prétendant avoir subi pendant le concert plus de fausses notes qu'il n'est supportable.

Épistémologie prémonitoire

Les débats les plus modernes ont souvent des origines anciennes. A l'appui de cette affirmation, voici, de Blaise Pascal (1623-1662) une contribution qui reste pertinente sur la question de l'intelligence artificielle. «La machine d'arithmétique fait des effets qui approchent plus de la pensée que tout ce que font les animaux ; mais elle ne fait rien qui puisse faire dire qu'elle a de la volonté comme les animaux.»

Le Robert sent le bûcher

En principe, rien n'est plus neutre qu'un dictionnaire, qui doit refléter l'état de la langue aussi fidèlement que possible. En fait, bien sûr, un dictionnaire est, comme tout ouvrage, imprégné de l'idéologie de son auteur. Débusquer les pré-supposés nichés dedans est donc instructif.

Philippe Wallon, auteur d'un *Que sais-je ?* sur le paranormal, a ouvert son dictionnaire Robert à l'article «sorcier», et a lu : «Personne qui pratique une magie de caractère primitif, secret et illicite.» Ph. Wallon s'étonne. Cela suggère, écrit-il, qu'il y aurait «une magie évoluée, licite et qui s'étalerait au grand jour». (Ne chicanons pas Ph. Wallon qui, en bonne logique, aurait dû écrire «ou», non «et».) Son étonnement est sans doute feint, car il interprète l'inadvertance du Robert comme une trace... des grands procès de sorcellerie ! Ces derniers ont exprimé la lutte entre la bour-

geoisie chrétienne des villes et la paysannerie encore très largement animiste.

Si Robert stigmatise la magie de caractère primitif, c'est qu'il reconnaît la légitimité de la magie évoluée, qu'il prend le parti de la sorcellerie qui a gagné, le christianisme, contre celle qui a échoué, l'animisme. De déduction en déduction, nous voici amenés à la conclusion subversive qu'une religion n'est rien de plus qu'une sorcellerie licite, c'est-à-dire une sorcellerie autorisée par la société à s'étaler au grand jour.

Pour peu qu'on lise entre les lignes, toute œuvre contient de quoi envoyer son auteur au bûcher.

Frisson millénariste

Les fins de siècle sont réputées époques de langueur ; avoir l'esprit fin de siècle, c'est ressentir la décadence du monde.

Certes, mais rien n'est plus proche d'une fin de siècle qu'un début de siècle. Allons-nous vivre alors une époque de renouveau de la culture, des arts, des lettres, des sciences ? Que nenni ! Les débuts des siècles ne valent pas mieux que leurs fins. Dure loi, observée par d'Alembert : «Il semble que depuis environ trois cents ans, la nature ait destiné le milieu de chaque siècle à être l'époque d'une révolution dans l'esprit humain.» D'Alembert étaye sa thèse : le milieu du xv^e siècle a vu naître les lettres en Occident, après la chute de Constantinople ; au milieu du xvi^e, la Réforme a vivifié le débat théologique ; au milieu du xvii^e, Descartes a renouvelé la philosophie...

L'observation de d'Alembert lui paraît d'autant plus pertinente qu'il publie son *Essai* en 1759, et qu'il participe à l'*Encyclopédie* depuis ses débuts, en 1751...

Trêve de plaisanterie. Que les milieux de siècle soient promis à la gloire n'implique pas que les extrémités en soient privées. Il pourrait même y avoir une révolution dans l'esprit humain tous les huit jours. Libre au xxi^e siècle de commencer en fanfare, donc, il ne contreviendra pas à la loi de d'Alembert pourvu que le milieu du siècle fasse lui aussi des prodiges. Mon pessimisme concernant le début du prochain siècle n'avait donc aucun fondement sérieux.

Pour ma défense, je dirai juste que cette prédiction n'était pas plus tirée par les cheveux que le procédé dont use d'Alembert pour tresser subrepticement des lauriers à l'*Encyclopédie*. On n'a pas attendu l'an 2000 pour accommoder le calendrier.

Un quotient «intellectuel»

Le saviez-vous ? «Si on divise la hauteur de la tour Sears de Chicago, c'est-à-dire le gratte-ciel le plus haut, par celle du bâtiment Woolworth de New York, qui détenait le même record en 1913, on obtient 1,836. Ce rapport coïncide parfaitement avec celui de la masse du proton à celle de l'électron multiplié par un facteur mille.» (Malcolm E. Lines, *Dites un chiffre*, Flammarion, 1999, p. 67.)

Et l'auteur d'ajouter : «Il y a là matière à réflexion !» En écrivant cela, toutefois, il est ironique. En effet, il a choisi l'exemple ci-dessus pour se moquer des gens qui soupçonnent l'existence d'un message caché chaque fois qu'ils découvrent une coïncidence surprenante. Ainsi, les rapports entre diverses dimensions de la grande pyramide de Gizeh ont souvent été interprétés comme la preuve que des extra-terrestres nous avaient laissé là des messages. En vérité, il existe tellement de données numériques dans la nature et dans les œuvres humaines, tellement d'unités possibles pour les exprimer qu'on peut fabriquer autant de «coïncidences stupéfiantes» qu'on le veut.

Voici donc un nouveau jeu de société. Choisir un nombre dans une table de constantes physico-chimiques. Celui qui trouve deux grandeurs n'ayant rien à voir, mais dont le quotient est égal pile à cette constante, celui-là marque un point. Celui qui fournit une explication à cette coïncidence inexplicable marque aussi un point. On recommence. Le premier qui arrive à marquer exactement π points a gagné.

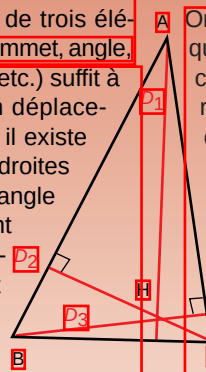
JEU-CONCOURS N° 59

PIERRE TOUGNE

Construction de triangles

En général, la donnée de trois éléments d'un triangle (sommet, angle, côté, hauteur, médiane, etc.) suffit à déterminer celui-ci à un déplacement près. D'autre part, il existe de nombreux triplets de droites concourantes dans un triangle dont les plus simples sont les hauteurs, les bissectrices, les médiatrices et les médianes. En revanche, la donnée de ces trois droites concourantes conduit en général à une infinité de triangles ayant ces droites comme hauteurs, bissectrices, etc.

Par exemple, si l'on se donne trois droites distinctes D_1, D_2, D_3 , concourantes en H , construire un triangle ayant pour hauteurs D_1, D_2, D_3 est trivial.



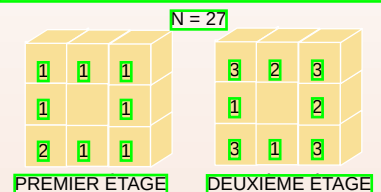
On prend disons sur D_1 un point A autre que H , on abaisse de A les perpendiculaires sur D_2 et D_3 qui coupent respectivement D_3 et D_2 en B et C et le triangle ABC répond au problème (voir la figure). Le cas des bissectrices et des médiatrices n'est guère plus difficile. Étant donné trois droites distinctes concourantes, sauriez-vous construire un triangle ayant ces droites pour bissectrices et un (autre) triangle ayant ces droites pour médiatrices.

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 1999, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

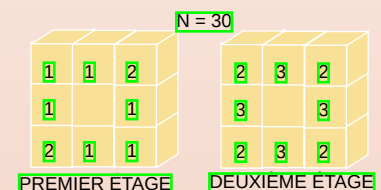
RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 57

Deux façades opposées comportant 11 mathématiciens et les quatre chambres entre ces deux façades pouvant recevoir au minimum 4 mathématiciens (pas de chambre vide) et au maximum 12 mathématiciens (pas plus de trois mathématiciens par chambre), le nombre total de mathématiciens est compris entre $22 + 4 = 26$ et $22 + 12 = 34$. D'autre part, le nombre de mathématiciens du deuxième étage étant le double de celui du premier étage, le nombre total de mathématiciens doit être un multiple de 3. Il nous reste donc que trois possibilités pour le nombre de mathématiciens 27, 30, 33. S'il y a 33 mathématiciens, les chambres centrales entre deux façades opposées doivent contenir $33 - 22 = 11$ mathématiciens donc au minimum 5 au premier étage. Ce raisonnement est valable pour l'autre paire de façades opposées, ce qui fait au minimum 10 mathématiciens dans les quatre chambres centrales du premier étage donc des chambres de coins devraient être vides, ce qui est proscrit. Par conséquent, le nombre de mathématiciens attendus étaient de 30 et le nombre

d'arrivants de 27. Maintenant pour trouver les répartitions, il suffisait de procéder par essai erreur. Pour les 27 mathématiciens, il n'y a qu'une solution aux symétries et rotations près que voici :



En revanche, pour les 30 mathématiciens, il y a de nombreuses solutions (20). Cependant, comme me le fait remarquer Monsieur Jean Jacquelin, si l'on ajoute la condition «que deux chambres de trois mathématiciens ne doivent pas être contiguës», il n'y a qu'une solution que voici :



Activité contestée

L'un des arguments présentés par Bernard Guerrien et Sophie Jallais dans *Actifs et inactifs* (voir *Pour la Science*, février 1999) me paraît faussé : le graphique et le texte donnent le pourcentage de la population âgée de 0 à 14 ans et de plus de 65 ans. Or, il y a longtemps que l'obligation scolaire en France va jusqu'à 16 ans, et la scolarité effective dépasse largement cet âge. Il serait plus crédible d'utiliser ces chiffres. Plus difficile aussi, puisque la scolarité a évolué dans la période 1960-2000, et qu'il faudrait faire des prévisions pour la période 2000-2040.

P. J. HAUG, Grenoble

On ne peut pas ajouter des enfants et des retraités : allocation familiales et Éducation nationale coûtent, par individu, deux fois moins que les retraites. On ne peut pas non plus déclarer comme une évidence que si, en 1960, 62 pour cent d'actifs avaient la charge de 38 pour cent d'inactifs, la productivité croissant, 58 pour cent d'actifs pourront prendre en charge 42 pour cent d'inactifs en 2040. L'augmentation est de 18 pour cent, et au niveau actuel des prélèvements sociaux, les actifs n'accepteront pas d'augmenter de 18 pour cent leurs contributions.

Jean TUGAYE, Gif-sur-Yvette

Réponse de Bernard Guerrien et Sophie Jallais

Si nous avons retenu les chiffres de 14 et de 65 ans, c'est parce qu'ils sont utilisés dans les comparaisons internationales. De toutes façons, si nous avions pris 16 ans au lieu de 14 ans, cela n'aurait guère modifié l'idée de fond de l'article, qui est celle de la relative stabilité dans le temps de la proportion actifs-inactifs. On peut remarquer que, dès à présent, la population qui poursuit ses études au-delà de 16 ans est importante (voir l'augmentation impressionnante du nombre d'étudiants ces dernières décennies, qui semble d'ailleurs avoir atteint un palier).

L'article traite essentiellement de la proportion actifs-inactifs, et non du coût des inactifs, difficile à évaluer d'ailleurs. Quant à la proposition selon laquelle «les actifs n'accepteront pas d'augmenter de 18 pour cent leurs contributions», elle est discutable : les actifs sauront qu'ils deviendront un jour inactifs, et ils verront autour d'eux (à commencer par leur propre famille) qu'il y a des retraités ayant droit à des revenus «normaux». La raison et le cœur leur dicteront probablement d'accepter, comme nous acceptons les prélèvements obligatoires actuels pourtant jugés «insupportables» il y a 20 ou 30 ans. Ils pourront évidemment envi-

sager de repousser l'âge de la retraite ou de baisser les prestations, mais en sachant qu'ils seront eux-mêmes concernés, le jour venu...

Animaux tremblants

Brightie Chamak retrace de façon remarquable l'histoire des encéphalopathies spongiformes subaiguës transmissibles et éclaire bien les difficultés qu'ont rencontrées les scientifiques de toutes disciplines pour comprendre ces maladies (voir *La vache folle : une crise annoncée*, *Pour la Science*, février 1999). J'aimerais toutefois souligner deux dates pour compléter son exposé. D'abord, le début de l'étude scientifique de la tremblante, donc des encéphalopathies spongiformes, date de 1898 : de façon symbolique, un vétérinaire, M. Benoit, et un médecin, C. Morel, décrivent à Toulouse pour la première fois la dégénérescence vacuolaire des neurones qui constitue la lésion microscopique caractéristique de cette maladie. Ensuite, c'est en 1961 que R. L. Chandler, en Grande-Bretagne, décrit pour la première fois la transmissibilité de la tremblante à la souris.

Aujourd'hui, les moutons atteints de tremblante sont particulièrement surveillés en France depuis le 14 juin 1996, date à laquelle cette maladie est devenue légalement réputée contagieuse : toute personne qui la suspecte doit la déclarer aux services vétérinaires, et les animaux malades doivent être abattus et détruits pour ne pas atteindre l'assiette du consommateur. Une série de textes officiels organise depuis cette date une lutte obligatoire contre cette maladie, grâce à la mise en œuvre d'un réseau d'épidémiosurveillance qui, à la fin du mois de janvier 1999, a déjà identifié 153 cas de tremblante dans notre pays.

Marc SAVEY, Maisons-Alfort

L'eugénisme et son contraire

Si l'élimination volontaire des individus tarés est inacceptable en vertu des dangers qu'a fort bien soulignés Pierre-Henri Gouyon (voir *L'eugénisme*, *Pour la Science*, mars 1999), son inverse, le maintien en vie des individus «tarés», c'est-à-dire la médecine, présente aussi des risques. Cet «anti-eugénisme» est à court terme merveilleux, puisqu'il réduit les inégalités de naissance ; à moyen terme, ne devons-nous pas redouter un effet boule de neige qui aurait pour résultat que nul ne puisse survivre sans l'assistance de la médecine ? À long terme c'est, là aussi, l'extinction de l'espèce par évolution (?) anarchique.

Jean-Marc CHENU, La Motte du Caire

Réponse de Pierre-Henri Gouyon

Dans un sens, le fait que des individus qui, dans le passé, n'auraient pas survécu, se reproduisent et transmettent leurs gènes dans l'avenir, va augmenter les dépenses de santé de nos sociétés. Le surcoût occasionné par cette situation ne sera-t-il pas préjudiciable à d'autres opérations qu'on pourrait juger plus urgentes (emploi, social...) ? À l'opposé, le fait de laisser vivre et se reproduire des individus qui n'auraient pas pu le faire sans l'«industrie» (au sens originel) humaine constitue une des spécificités de notre espèce. Sans aller jusqu'à dire, comme certains, que la sélection a disparu dans nos sociétés, la médecine, les lois sociales et même l'ensemble du contexte culturel ont déplacé les critères sur lesquels s'effectue la sélection. Ainsi, jusqu'à l'avènement de la contraception, le désir sexuel suffisait à amener beaucoup d'individus à se reproduire alors qu'aujourd'hui, c'est le désir d'enfants qui joue ce rôle et qui est, de ce fait, sélectionné.

L'exemple de la perte du pelage donné dans l'article peut servir de support à cette réflexion. Cette perte nous a, tout compte fait, rendus dépendants du feu et de l'habillement, mais en cela, elle a été génératrice de nombreux emplois, de nombreuses fonctions sociales (habitations, chauffage, habits...) et même d'une certaine forme de création artistique et d'un mode d'expression (il y a longtemps que l'habillement est un mode d'expression, et ça ne semble pas en passe de disparaître). En rendant les individus futurs de plus en plus dépendants de la technique, on peut créer de nouvelles voies dans lesquelles la créativité de notre espèce trouvera du grain à moudre. Quant au fait que cela puisse amener l'espèce à disparaître, on peut objecter que l'avenir de notre espèce sera mieux assuré si nous continuons à chercher toutes les méthodes possibles de lutte contre la maladie, qu'en nous abandonnant passivement aux lois de la sélection naturelle...

Erratum

Dans l'article *Assurance biologique* (voir *Pour la Science*, avril 1999), au milieu du troisième paragraphe, au lieu de : «Ces résultats étaient soutenus par des modèles, selon lesquels la diversité des systèmes écologiques devrait plutôt déstabiliser ceux-ci», il faut lire : «Par ailleurs, les modèles théoriques généralement admis indiquaient que la diversité des systèmes écologiques devrait plutôt déstabiliser ceux-ci.» Les modèles théoriques en question n'ont rien à voir avec les expériences mentionnées précédemment.

Des scientifiques s'égarent...

GUILLAUME LECOINTRE

La communauté scientifique française se méfie trop peu des offensives spiritualistes lorsque celles-ci, bien financées, adoptent des allures respectables.

Deux moteurs engendrent des explications du monde. Le premier est la fascination pour l'élégance des explications rationnelles et expérimentales, pour les positivités issues de presque trois siècles de méthodes scientifiques. Le second est la fascination pour le mystère, l'obscur, l'inexpliqué. Le premier donne des outils de découverte du monde et se préoccupe de maintenir les conditions du dialogue scientifique par la reproductibilité des expériences. Le second se soucie peu de l'efficacité de ces outils puisque c'est la persistance du mystère qui l'alimente.

Sans que notre communauté scientifique ne s'en émeuve, une organisation financée par des fonds privés, l'*Université interdisciplinaire de Paris* (UIP), tient un discours du second type avec l'appui de scientifiques dits «renommés» (douze prix Nobel et quelques noms connus : la renommée ne garantit pas la vigilance épistémologique). Sous l'impulsion de Jean-François Lambert et de Jean Staune, l'UIP a organisé six colloques en trois ans, dont le dernier s'est tenu en avril 1999 sous le haut patronage de Jacques Chirac et sous la présidence de Frederico Mayor, directeur général de l'UNESCO : «Un siècle de Prix Nobel : science et humanisme».

Rien de plus banal, semble-t-il, pour qui n'a pas connaissance du lourd passé et des écrits des membres de l'UIP. Cette organisation milite pour un «nouveau paradigme», celui d'une réintroduction de la spiritualité dans le champ de la découverte scientifique. L'UIP a d'ailleurs

reçu une bourse de 10 000 dollars de la fondation Templeton «pour le progrès de la Religion». L'UIP organise actuellement un programme de conférences intitulé «Science, conscience et sens», où interviennent sept membres de l'Académie des sciences. Enfin l'UIP compte parmi ses membres des gens qui proposent ouvertement un «retour au Moyen Âge», précisément pour remettre l'homme au centre de toute la cosmologie et soumettre la science au pouvoir théologique. Alors, la science est-elle soluble dans la spiritualité ?

Est-il besoin de rappeler ici que la spiritualité qui s'instruit de tout, y compris de vérités révélées, n'a rien à faire dans le champ des sciences ? Les vérités révélées ne s'évaluent pas scientifiquement, et ne peuvent que polluer un peu

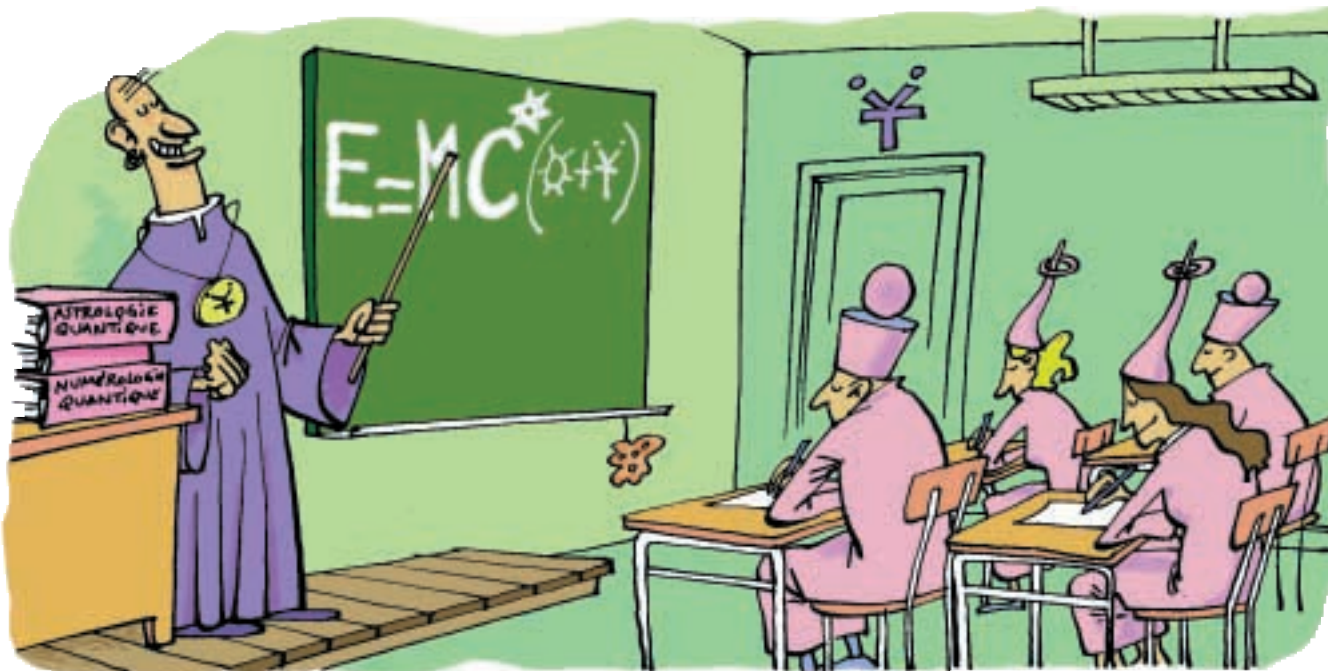
plus le processus de la découverte scientifique, déjà bien assez entravé de contraintes économiques et sociales.

Allons au fond. Quelle que soit la discipline scientifique, l'UIP attaque le principal pilier des sciences modernes : le matérialisme méthodologique. J. Staune écrit dans *Convergences* : «Il y a un niveau de réalité qui échappe au temps, à l'espace, à l'énergie et à la matière, mais qui pourtant peut avoir dans certaines expériences une influence causale sur notre niveau de réalité. Cela ne constitue pas une preuve de la validité d'une vision "spiritualiste" du monde, mais cela lui donne une crédibilité nouvelle tout en rendant le matérialisme plus difficile à penser. Le matérialisme est encore possible, mais il doit se transformer en matérialisme de science-fiction, capable d'intégrer la déchosification de la matière.»

Cette stratégie a été usée jusqu'à la corde par les églises et les sectes : utiliser les frontières actuelles de la science, le front d'émergence des connaissances où tests et réfutations s'opèrent et où les difficultés s'éprouvent, pour proclamer la mort du matérialisme et la naissance d'une nouvelle «science» spirituelle où une autre dimension, jusque là imperceptible aux scientifiques (Dieu ?), aurait sa place. Ainsi, en tant qu'organisation antimatérialiste, l'UIP est vigoureusement antidarwinienne sans toutefois être créationniste. Un créationnisme strict, à l'américaine, serait d'ailleurs, en France, un frein à la respectabilité à laquelle aspire l'UIP.

Les écrits les plus éclairants sur les impostures intellectuelles de l'UIP sont ceux du juriste Philip Johnson, dans la revue de l'UIP *Convergences* : «Le darwinisme est basé sur un accord préalable en faveur du matérialisme et non sur une évaluation philosophiquement neutre des preuves. Séparez la philosophie de la science et vous verrez le fier édifice s'écrouler. Quand le public aura compris cela, le darwinisme de Lewontin [un biologiste de l'évolution] n'aura plus qu'à quitter les programmes d'études pour aller moisir au musée de l'histoire des idées près du marxisme de Lewontin.» Premier piège : P. Johnson voudrait nous faire croire qu'il existe une neutralité de l'observation indépendante





de toute philosophie, une sorte d'œil naturel, quasi divin, avec lequel un scientifique «objectif» déchiffrerait la nature. Balivernes : le scientifique conscient de son travail, le philosophe sait que la théorie – et dans une certaine mesure la philosophie qui la nourrit – investissent le fait scientifique. La raison ne peut s'exercer en dehors de tout cadre de référence.

Second piège : P. Johnson voudrait nous faire confondre le matérialisme méthodologique qui fonde les sciences depuis le XVIII^e siècle et le matérialisme dialectique qui accompagne le marxisme. Ridicule ! Si Marx et Engels ont construit le matérialisme dialectique comme une grande hypothèse pour expliquer le devenir de l'humanité, le matérialisme des sciences leur préexiste et conserve son indépendance. Car le matérialisme méthodologique désigne simplement une attitude théorique ayant recours exclusivement au comportement de la matière pour expliquer les phénomènes physiques et psychiques. Ce matérialisme-là permet la mise en place des expériences. L'expérience est l'action sur le monde matériel qui permet de vérifier les théories énoncées et de créer de nouvelles expériences. Le dialogue scientifique est fondé sur la *reproductibilité* des expériences. Matérialisme et dialogue scientifique sont donc consubstantiels. En voulant la mort du matérialisme, l'UIP réclame celle de la science. La ficelle de l'UIP est un peu grosse : les scientifiques conscients de leur matérialisme sont accusés de faire de l'«idéologie». Le matérialisme, en tant que voie nécessaire et antidogmatique de la connaissance est la condition méthodologique de la science et un outil d'émancipation de l'esprit humain. Le contraire, donc, d'une «idéologie».

Autre artifice, de forme celui-là : l'enrôlement en douceur. Les organisations ancêtres de l'UIP avaient des titres de conférences du plus parfait ésotérisme New-Age. Cela ne faisait pas sérieux. L'UIP a restructuré le tout pour donner à ses pulsions spirituelles des allures respectables. Une intense activité de démarchage fut nécessaire pour le financement : Assystem, Auchan, L'Oréal, Nature et Découverte, France Télécom, Air France financent aujourd'hui l'UIP. Il fallut aller chercher aux États-Unis des professeurs d'universités et des lauréats du prix Nobel ayant quelque chose à révéler sur Dieu (on imagine mal combien ils sont nombreux). Pour finir, on gomme tout accent un peu trop mystique et, pour faire admettre à des chercheurs d'intervenir dans un programme antimatérialiste, on argumente en termes de physique quantique face au biologiste et en termes de darwinisme face aux physiciens : l'extrême spécialisation des chercheurs les fragilise terriblement.

C'est ainsi que nos chercheurs sont invités à venir causer «humanisme» et, surtout, «limites de la Science» en présence d'un assortiment de lauréats du prix Nobel. Flattés, ils sont pris au piège sur la «photo de famille». Leur nom servira au crédit que d'autres porteront au prochain colloque. Leurs propos sur les «limites de la Science» seront utilisés pour justifier l'avènement du «nouveau paradigme».

La formule semble fonctionner. Le colloque d'avril 1999 était honoré de la présence de nouvelles personnalités comme le directeur du Muséum national d'histoire naturelle, Henry de Lumley, et la série de conférences «Science, conscience et sens» s'enorgueillissait des interventions de Jean-Didier Vincent, d'Antoine Danchin et, à ma grande

surprise, de Jean-Marc Lévy-Leblond. Inconscience ou tromperie ? Que font nos chercheurs là-dedans, aux côtés des permanents de l'UIP tels que Bernard d'Espagnat, Christian de Duve, Ilya Prigogine, Anne Dambricourt-Malassé ou Trinh Xuan Thuan ? Ont-ils lu les aberrations de l'UIP avant d'aller y causer ? «Prenez l'idée la plus absurde, il se trouve toujours deux prix Nobel pour la cautionner» : que cette phrase ait été écrite par un prix Nobel ne suffit pas à la discréditer.

Une vigilance intellectuelle de notre communauté est souhaitable. Un réarmement des journaux est indispensable : ceux qui ouvrent leurs pages aux affres du relativisme (selon lequel les vérités scientifiques ne seraient qu'une affaire de convention sociale) et aux membres de l'UIP entretiennent une confusion sur ce qu'est la science. En cette époque d'attitudes extrêmes, où alternent sectarisme et relativisme, le public n'a vraiment pas besoin qu'on lui brouille les contours de la science.

Guillaume LECOINTRE est maître de conférences du Muséum national d'histoire naturelle de Paris (Laboratoire d'ichtyologie et Service de systématique moléculaire).

G. LECOINTRE et P. DELEPORTE, *L'église et la science : l'offensive antimatérialiste*, in *La Raison* n°s 430, 431, 432 (1998).

G. LECOINTRE, *Au labo, ni Dieu ni Marx*, in *Charlie Hebdo* n° 287, p. 14 (1997).

Jean STAUNE, *Aux frontières de la physique*, in *Convergences*, n° 7, 1999.

P. E. JOHNSON, *The political crisis of scientific materialism*, in *Convergences*, n° 7, 1999.



Les premières xénogreffes humaines

JEAN-LOUIS FISCHER

Dans les années 1920-1930, des milliers d'hommes reçurent des greffes de testicules de singe.

Pourra-t-on un jour pallier la pénurie d'organes disponibles en greffant, chez l'homme, des organes prélevés sur des animaux ? De telles xénogreffes résoudraient ainsi un lancinant problème de santé publique. Les premières tentatives sont anciennes : dans les années 1920, Serge Voronoff (ci-dessus) fut le premier à transplanter à un grand nombre d'hommes des greffons d'origine animale.

Un porc transgénique, modifié pour ne plus exprimer les antigènes de porc qui déclenchent le rejet chez l'homme, fournirait des greffons de vaisseaux sanguins, de valves cardiaques, de foie ou encore de cellules de pancréas productrices d'insuline. Le babouin, qui ne fait l'objet d'aucun projet de transgénèse, donnerait des greffons de tissu cérébral, de moelle osseuse, voire de foie. Les espoirs seraient grands si l'on était assuré que ces organes animaux sont exempts d'agents viraux transmissibles et adaptables à l'homme, et si l'on maîtrisait mieux la transgénèse chez le porc.

Quelques rares greffes d'organes animaux ont déjà été pratiquées, sans pour cela que de tels actes chirurgicaux ne soient entrés dans la pratique.

UN PARFUM D'EUGÉNISME

Serge Voronoff (1866-1951) quitte la Russie à 18 ans pour étudier la médecine à Paris. Naturalisé français en 1895, c'est un chirurgien habile et d'une grande ingéniosité. Son ami, Alexis Carrel, lui enseigne la technique et la pratique des greffes.

Toutefois, l'importance que Voronoff et ses disciples donnent aux greffes de testicules de singe à l'homme étonnent les biologistes, les histologistes et les physiologistes, car les résultats proclamés ne concordent pas avec les connaissances de l'époque. De surcroît, d'autres critiques sont d'ordre moral : les idées de Voronoff et de ses disciples illustrent le courant eugéniste des années 1920-1930. Ils privilégient une biologie de l'hérédité « globale » où le milieu social est

tenu pour responsable de la dégénérescence d'une partie de l'espèce humaine, dégénérescence contre laquelle ils veulent réagir.

A l'extrême de cette idéologie, un grand nombre d'eugénistes prônent le modèle des chevaux de course pur sang et la constitution d'un « haras humain ». Cette « philosophie » est suivie par Voronoff : « Je n'hésite pas à affirmer, écrit-il, que le singe est supérieur à l'homme par la vigueur de son corps, la qualité de ses organes, la pureté de son sang, l'absence de ses tares, héréditaires et acquises, dont la plus grande partie de l'humanité est affligée. » Voronoff souhaite participer au « rajeunissement » de l'organisme humain par la greffe de glandes de chimpanzés et de babouins, qu'il élève au statut d'espèces fraternelles de

AVANT



APRÈS



Pour démontrer l'efficacité de sa méthode, Voronoff présente les photographies de M. E. L. à 74 ans (ci-dessus, à gauche), à 76 ans (ci-dessus, à droite), un an et demi après avoir reçu une greffe de testicules de singe, et à 77 ans, deux ans et demi après la greffe (à droite).



l'homme. Il crée ainsi une nouvelle catégorie de greffes : les homéogreffes.

En juin 1889, le physiologiste Adolphe Brown-Séquard (1817-1894) annonce qu'il s'est injecté sous la peau un extrait aqueux de testicules broyés de chien et de cobaye. Ses injections de sucs testiculaires lui ont redonné, prétend-il, des forces physiques et des capacités que l'âge avait atténuées. Brown-Séquard ouvre ainsi la voie aux recherches en endocrinologie et à l'opothérapie, ou traitement par les sucs (en grec, *opos* signifie suc).

Ainsi naissent des laboratoires de produits opothérapiques proposant une quinzaine de produits dont les pilules d'orkitine préparées avec des testicules de bœlier pour combattre l'anémie, l'impuissance, la sénilité ; les pilules d'ovairine destinées aux femmes présentant les troubles de la ménopause ou une absence de règles. Les opothérapeutes proposent également des pilules de capsularine contre le diabète, d'encéphaline contre les névroses et les psychoses, de pneumonine contre les infections pulmonaires. Toutes ces pilules sont préparées à partir d'organes de mouton et de taureau et sont préconisées par le corps médical et pharmaceutique, car certains succès dans les traitements à base de thyroïdes animales destinées aux pathologies hypothyroïdiennes témoignaient de l'efficacité de ces nouveaux produits. L'organothérapie, où l'on administre des extraits d'organes animaux pour pallier une déficience, a encore aujourd'hui des adeptes.

Lors d'un séjour en Égypte qui dure de 1896 à 1910, Voronoff s'intéresse aux eunuques, castrés dès l'enfance et qui présentent diverses déficiences. Ses observations le convainquent que le rôle des testicules n'est pas limité à la fonction génitale, mais que leurs sécrétions agissent sur le développement osseux, musculaire, nerveux et psychique de l'individu.

Voronoff et ses disciples tiennent un discours eugéniste où beauté, jeunesse et capacités intellectuelles constituent la «trinité biologique de l'existence humaine». La vieillesse résultant d'un ralentissement des

sécrétions endocriniennes, notamment des hormones sexuelles, la greffe de structures testiculaires jeunes et actives sur les sujets âgés devait réactiver leurs sécrétions glandulaires et restaurer leur activité intellectuelle et physique.

DES EXTRAITS AUX GREFFES

Le liquide de Brown-Séquard, fait à partir d'extraits testiculaires se révèle vite inefficace. Voronoff ayant réussi à greffer des thyroïdes de chimpanzés à des personnes atteintes d'anomalies de la thyroïde, et de l'os de chimpanzé à un soldat blessé en 1915, il a l'idée de greffer du testicule de singe à l'homme (Voronoff eut la «chance» de choisir des tissus ou des organes qui ne manifestent pas de trop violentes réactions de rejet, comme c'est le cas, par exemple, de la peau). La greffe glandulaire, pense Voronoff, devrait produire l'hormone bénéfique sur une longue période en évitant les inconvénients de l'opothérapie, qui contraind la personne traitée à des prises quotidiennes de pilules ou à des injections répétées pour des résultats décevants. Voronoff est convaincu que des morceaux de testicules greffés continueront à «vivre» dans l'organisme receveur et à sécréter l'hormone bénéfique pendant des mois, voire des années.

Avant de pratiquer des greffes sur l'homme, il expérimente sur l'animal. Entre

1917 et 1926, il pratique plus de 500 homogreffes sur des bœliers et des boucs (le «donneur» et le «receveur» appartiennent souvent à la même famille), et sur un taureau. Il greffe des testicules de jeunes animaux sur des animaux âgés : d'après ses comptes rendus, les animaux âgés reprennent de la vigueur.

Le 12 juin 1920 il pratique la première greffe officielle de testicule de chimpanzé à l'homme : le receveur (l'homme) et le donneur (le singe) sont opérés simultanément, dans la même salle. Le singe subit une anesthésie générale, l'homme une anesthésie générale ou locale. Toilette et désinfection des parties à opérer sont minutieuses.

Pendant qu'une équipe chirurgicale extrait le testicule du singe, une autre prépare le testicule de l'homme à recevoir le greffon. Le testicule du singe est découpé en morceaux d'environ deux centimètres de long et un demi de large sur quelques millimètres d'épaisseur. Le chirurgien introduit généralement deux greffons dans les bourses et les fixe par des points de suture. Le greffon est placé dans une zone bien vascularisée et scarifiée pour permettre la formation de nouveaux vaisseaux sur le greffon à partir des vaisseaux sanguins du testicule humain. Les plaies opératoires de l'homme sont refermées, nettoyées et pansées. Voronoff recommande à l'opéré de rester quelques jours à la clinique, fils et agrafes étant retirés au bout de huit jours.

Pendant les années 1920, les «candidats» à la greffe se font opérer dans la clinique Villa Molière à Auteuil, à la Maison de santé Ambroise Paré à Neuilly et à la Maison de santé de la rue Montaigne, à Paris. Sur la quarantaine d'hommes opérés entre les années 1920-1923, on dénombre neuf fonctionnaires, sept médecins, quatre ingénieurs, quatre hommes de lettres, trois architectes, trois industriels, deux avocats, deux professeurs d'Université, un rentier, un agronome, un peintre, un ouvrier. Dix-huit sont d'origine étrangère. La plupart des patients se contentent d'une seule greffe, quelques-uns de deux, un industriel en subit trois, à 39 ans, à 40 et à 41 ans.

Dans cette population d'hommes greffés, quatre



L'opothérapie, ou traitement par les sucs, a été très en vogue au début du ^{xx}e siècle, comme en témoigne cette affiche publicitaire datant de 1913.

PHOTOGRAPHIES D'J.L. FISCHER



Voronoff et ses disciples considéraient le singe comme supérieur à l'homme par «la qualité de ses organes, la pureté de son sang et l'absence de tares». Pourtant, Voronoff n'hésite pas à sacrifier son «frère de sang» sur l'autel de la chirurgie. Quant à Dartigues, un de ses émules,



il commente, en 1925, l'illustration de droite de la façon suivante : «Je ne veux pas diminuer la valeur de suprématie du jeune nègre, mais je ne peux m'empêcher de remarquer la vivacité d'expression des yeux des singes, à côté du regard morne du nègre.»

ont entre 20 et 30 ans, cinq entre 31 et 40 ans, sept entre 41 et 50 ans, 11 entre 51 et 60 ans, 12 entre 61 et 70 ans et cinq entre 71 et 80 ans. Ainsi, les principaux candidats sont des hommes des classes aisées âgés de 50 à 70 ans. En 1930, en France, 500 hommes ont reçu une greffe et plusieurs milliers d'hommes dans le monde ont enduré ce type d'intervention. La méthode est pratiquée aux États-Unis, en Italie, au Portugal, en Russie, au Brésil, au Chili, en Inde, en Angleterre ; dans ce dernier pays, la législation alors en vigueur interdisait la vivisection, de sorte que les chirurgiens ne pouvaient utiliser de testicules de singe et greffaient des testicules humains.

Voronoff est dépassé par son succès. La demande dépasse l'offre, et l'approvisionnement est insuffisant : les chimpanzés et les babouins sont rares et chers, car difficiles à capturer et souvent tués sur place pour leur nourriture. Quand ils sont capturés vivants, beaucoup meurent pendant le transport. Le gouverneur général de l'Afrique occidentale préconise même, en 1923, l'établissement de grandes singeries en Guinée française pour assurer un large approvisionnement à la Métropole. Voronoff en fait construire une à Menton.

Les résultats du traitement ont été rapportés par Voronoff : sur les 41 premiers greffés, 58 pour cent déclarent avoir

constaté une reprise des fonctions physiques, intellectuelles et génitales. La question de l'origine physiologique de cette apparente amélioration reste contestée. Voronoff et ses disciples affirment avoir retrouvé, plusieurs années après l'opération, des greffons de testicules de chimpanzé dans les testicules des hommes opérés.

RÉALITÉ OU FICTION?

Toutefois, l'analyse histologique des greffons montre des tissus nécrosés dépourvus de cellule de Leydig ; or on sait, depuis le début du ^{xx}e siècle, que ces cellules sécrètent l'hormone mâle, qu'on nommera la testostérone. Les partisans de Voronoff prétendent alors que l'hormone mâle est libérée par les cellules de Sertoli, qui bordent les tubes séminifères producteurs des spermatozoïdes (les coupes histologiques laissent deviner la persistance de certaines structures des tubes séminifères de singe). Ils en concluent que les greffons de singe ont une activité hormonale.

Dans la pratique des greffes, les femmes ne sont pas oubliées. Certaines sont greffées avec des ovaires de guenon pour pallier les inconvénients de la ménopause. Voronoff n'hésite pas à greffer de l'ovaire de femme sur une femelle chimpanzé, laquelle est ensuite inséminée avec du sperme humain... sans

résultat. Cette femelle, nommée Nora, est l'objet d'un roman intitulé *Nora, la guenon devenue femme* (Félicien Champ-saur), exemple de la dérive médiatique associée aux pratiques de Voronoff et des mentalités racistes de l'époque (la chanteuse Joséphine Baker est même assimilée à Nora).

Cette histoire fut sans lendemain, parce qu'elle reposait sur une théorie erronée. Même si Voronoff continua à croire à l'efficacité de sa méthode, il dut cesser sa pratique devant la pression de la communauté scientifique et celle du public qui finit par reconnaître qu'il s'était laissé abuser. Des animaux transgéniques deviendront peut-être des donateurs d'organes pour l'homme, et les xénogreffes seront sans doute un moyen d'améliorer la santé publique : c'était déjà l'objectif de Voronoff, même si certaines de ses conceptions ne sont – heureusement –, plus d'actualité.

Jean-Louis FISCHER, enseignant à l'Université Paris 8, est chercheur au Centre Alexandre Koyré d'histoire des sciences et des techniques (EHESS-CNRS-MNHN).

J. RÉAL, *L'homme et la bête*, Stock, 1999.
Serge VORONOFF, *Étude sur la vieillesse et le rajeunissement par la greffe* (1926), réédition, préface J.L. Fischer, Éditions SenS, Chilly Mazarin, 1999 (à paraître).



Grains de sel

HERVÉ THIS

Mythes et légendes culinaires de l'or blanc.

Les mythes du sel ont la vie dure. Passons-en quelques-uns en revue avant de les analyser expérimentalement. Certains cuisiniers qui font bouillir de l'eau prescrivent de ne mettre le sel que dans l'eau déjà bouillante, parce que l'eau salée, disent-ils, mettrait plus longtemps à bouillir que l'eau pure ; le conseil a percé jusque dans le public, mais est-il justifié ?

À propos de viande, utilisée pour la confection des bouillons, les livres de cuisine indiquent de saler dès le début, afin de mieux extraire les «sucs». Est-ce efficace ?

Inversement, sur la salade, il faudrait éviter de mettre le sel trop à l'avance, parce qu'il flétrirait les feuilles. Le dicton vient du Japon ; qu'en penser ?

Le chimiste Michel-Eugène Chevreul indique en 1835, dans ses *Recherches des matières fixes tenues en dissolution dans l'eau pure ou salée, qui a servi à la cuisson des légumes*, que : «L'eau qui a servi à la décoction des légumes est colorée en brun rougeâtre ; elle retient une quantité sensible des principes odorants. L'eau salée qui avait servi à la cuisson des mêmes légumes était d'une odeur plus prononcée que ne l'était l'eau pure ; sa saveur, abstraction faite de la saveur propre au sel, était également plus prononcée, et cependant, chose remarquable, elle renfermait en définitive une moindre proportion de matières extractives.» Doit-on le croire ?

Méfions-nous des abstractions qui ne sont pas soutenues par une expérimentation saine. Par exemple, il est vrai que le sel ajouté à l'eau refroidit cette dernière (l'eau cède de son énergie pour dissoudre le sel), que le sel ajouté à l'eau élève la température d'ébullition, que la masse à chauffer est supérieure. Mais que le sel soit ajouté avant ou après l'ébullition, l'obtention de l'état final visé met en œuvre les trois phénomènes. Si nous chauffons de l'eau avec ou sans sel (la même quantité d'eau, dans la même casserole, en chauffant de la même façon), nous observerons que, aux erreurs expérimentales près, le temps de mise à ébullition est égal.

Passons au bouillon. On a soutenu que l'effet important était l'osmose : les diverses molécules tendent à diffuser, de

sorte que leurs concentrations finales soient partout égales. Comme les grosses molécules ne traversent pas les membranes cellulaires, c'est l'eau qui entre dans les cellules ou en sortirait, selon les conditions (le phénomène serait identique à celui que l'on observe quand on prépare des fruits au sirop : quand le sirop est trop léger, les fruits gonflent et éclatent ; mais les fruits se ratatinent quand le sirop est trop concentré).

Si l'on ne tient compte que de cet effet, on prévoit théoriquement que la viande doit perdre plus de jus quand elle est cuite en présence de sel. Faisons un test simple, bien que fastidieux : déposons deux morceaux de viande identiques dans deux casseroles identiques, l'une contenant de l'eau pure, et l'autre de l'eau salée à saturation. Puis cuissons pendant les cinq heures réglementaires, en pesant les deux morceaux toutes les dix minutes. Après cinq heures de cuisson, la masse des deux morceaux est égale, au gramme près.

Les œufs réagiraient-ils différemment ? Il est parfois indiqué que l'eau de cuisson des œufs durs doit être salée, parce que, sans sel, l'eau s'introduirait dans les œufs par osmose, les ferait gonfler et provoquerait leur fissuration. Cuisez une dizaine d'œufs dans une casserole pleine d'eau pure, et une dizaine d'œufs dans une casserole identique à la première, mais pleine de la même quantité d'eau (fortement) salée. Pesez les œufs à divers stades de la cuisson, afin de savoir si cette fameuse osmose leur a fait gagner du poids. Puis comptez le nombre d'œufs fêlés dans chaque lot.

La réponse à la question initiale vaut bien l'indigestion : le sel ne prévient pas la fissuration des coquilles (le bon moyen, pour l'éviter, consiste à percer les œufs à l'aide d'une aiguille : l'air de la poche interne de l'œuf s'échappe alors plus facilement, de sorte que l'œuf reste intact), mais il a un avantage que connaissaient les chefs du siècle dernier : il sale le blanc, rendant savoureuse cette matière insipide !

Terminons avec l'effet sur les végétaux. Comment se comportent des salades quand on les couvre de sel fin ? Sur les feuilles de la fragile laitue, le sel n'agit pas, même après plusieurs heures, tant que la salade est sèche : les feuilles

sont couvertes d'une cuticule cireuse qui prévient l'osmose.

Et les légumes cuits dans l'eau ? Pour connaître la quantité de matière perdue par les légumes dans l'eau de cuisson, couvrons la casserole et pesons les légumes en cours de cuisson. On mesure que des oignons perdent davantage de masse quand ils sont cuits peu de temps dans l'eau salée : cette fois, l'osmose se manifeste. Avec des carottes, la différence n'est pas nette. Dans les deux cas, les légumes se décomposent davantage quand ils cuisent dans l'eau salée. Enfin si l'on poursuit la cuisson trop longtemps, les légumes finissent dans le même état défilé, en présence ou en l'absence de sel.

Pourquoi les prévisions fondées sur l'osmose n'expliquent-elles pas bien le comportement des légumes et des viandes cuits dans l'eau ? Un coup d'œil au microscope donne la réponse : les cellules animales ou végétales ne se réduisent pas à des membranes semi-perméables à travers lesquelles s'effectuerait l'osmose. Du collagène gaine les cellules musculaires, et les cellules végétales sont recouvertes d'une paroi, rigide. Au début de la cuisson, l'osmose peut se faire sentir, mais, à long terme, quand la structure est dégradée, les cellules s'ouvrent, et l'aliment se comporte comme une éponge percée de canaux. Le sel n'y change rien.

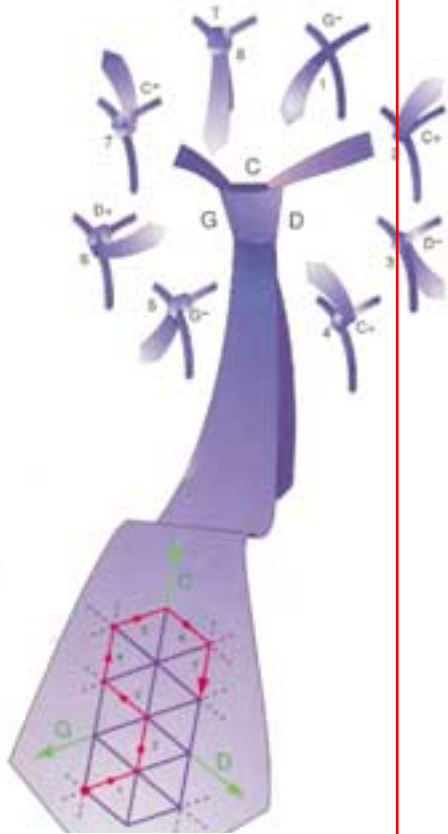
E les autres dictons ? On dit qu'une pomme de terre cuite et pelée dans une sauce trop salée enlève le sel. Certains chefs prétendent voir les sauces trop salées à de petits points brillants. Au XIV^e siècle, Guillaume Tirel, dit Taillevent note que les soupes et les ragoûts ont tendance à déborder tant qu'on n'y a pas ajouté du sel et du gras. Pour les grillades, on conseille souvent de ne pas saler en début de cuisson, mais de réserver le sel pour la fin de la cuisson, afin que «le sel s'imprègne dans la viande». Ginette Mathiot, conseille, «pour enlever à un plat un excès de sel, de plonger et laisser immergé pendant deux secondes un morceau de sucre.» Que pensez-vous de ces recommandations ?

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 26 mai 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Cravate et maths

Les mathématiques des nœuds de cravates donnent raison aux tailleurs et aux dandys.

Chaque matin, quelque fois avec l'aide de leur épouse, des milliers d'hommes s'évertuent devant un miroir à confectionner un nœud de cravate décent et présentable. Dans l'urgence, ils ne se soucient guère de savoir que cet accessoire vestimentaire tire son nom d'un régiment croate de Hrvatska dont les soldats (de Louis XIV) portaient une pièce de tissu noué à leur cou. Peu leur importe également de savoir si le nœud sur lequel ils s'énervent est un Pratt, un nœud inventé il y a tout juste dix ans, ou un Windsor, un nœud mis au point par le duc du même nom après son abdica-



Un nœud de cravate est une séquence de mouvements, chacun conduisant la branche la plus large dans l'une des trois zones délimitées par le premier passage : le centre (C), la gauche (G) et la droite (D). Cette séquence est représentée par un cheminement sur un maillage triangulaire muni de trois vecteurs unitaires représentant chacun un type de déplacement. Le chemin en rouge ci-contre représente le nœud, inédit jusqu'à aujourd'hui, détaillé en huit étapes (en haut).

tion en 1936. Et surtout, l'existence d'autres modèles possibles ne les préoccupe absolument.

Deux mathématiciens – qui ne portent probablement jamais de cravate – ont cherché de nouveaux nœuds en modélisant tous les nœuds possibles. Ils ont ensuite établi un palmarès esthétique en tenant compte de la symétrie, de la taille, de l'équilibre et de la forme. Aux dix premières places, on trouve les quatre nœuds les plus couramment utilisés, mais aussi six nœuds inédits.

Thomas Fink et Yong Mao, du Laboratoire Cavendish à Cambridge ont tout d'abord remarqué que le premier mouvement, le passage de la branche la plus large, ou branche active puisqu'elle est la seule à être déplacée, sur ou sous la plus fine, divise le plan du nœud en trois régions : au centre (C), à droite (D) et à gauche (G). Un nœud est donc une séquence de déplacements où la branche active passe de une zone à l'autre soit en avant (+) du plan du nœud en cours, soit en arrière (-). De plus, tout nœud s'achève par une séquence obligatoire : la branche passe de la zone gauche à la zone droite (ou l'inverse) à l'avant du nœud, puis, en arrière, vers le centre ; le nœud se termine quand on glisse l'extrémité de la branche à travers le nœud. Ce dernier mouvement se note (T). Par exemple, (G-, C+, D, C+, G-, D+, C-, T) représente la séquence du nœud de la figure. Un nœud est donc une combinaison de un à neuf termes pris parmi les six possibles. Chacune des combinaisons respecte quelques conditions : les (noté +) et les (noté -) sont alternés ; le premier terme est obligatoirement G (+ ou -), et les derniers sont (D+, C-) ou (G+, C-).

Les mathématiciens ont déterminé toutes les séquences possibles en assimilant le nœud de cravate à un chemine-

ment sur un maillage triangulaire muni de trois vecteurs unitaires (voir le motif de la cravate). Chaque mouvement de la branche active est représenté par un coté d'une maille du triangle. Ainsi, l'ensemble des nœuds de cravates possibles est équivalent à l'ensemble des chemins sur le maillage. Les quatre critères esthétiques ont ensuite été quantifiés pour chacune des séquences créées.

Premier critère : pour limiter la taille du nœud et respecter la longueur d'une cravate traditionnelle, ils ont restreint leur modélisation aux seuls 85 nœuds qu'il est possible de confectionner en moins de 10 mouvements. Deuxièmement, la différence des nombres de mouvements vers la gauche et de mouvements vers la droite rend compte de la symétrie du nœud : plus elle est petite, plus le nœud est symétrique. Troisièmement, la forme du nœud, c'est-à-dire sa convexité et son aspect «bombé», augmente avec la proportion de passages par le centre par rapport au nombre total de déplacements. Les mathématiciens n'ont pris en compte que les nœuds dont le rapport du nombre de passages au centre sur le nombre de mouvements total était compris entre 0,25 et 0,5. Enfin, dernier critère, l'équilibre du nœud rend compte de la répartition des déplacements dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport à ceux dans le sens inverse. Un nœud composé de mouvements orientés dans le même sens est de travers et peu résistant. En conséquence, plus un nœud alterne des mouvements dans un sens et dans l'autre, plus il est équilibré et conserve son maintien au cours de la journée.

A partir des 85 séquences, les mathématiciens ont établi un palmarès où un nœud est d'autant mieux classé qu'il est composé de peu de mouvements, qu'il est symétrique, qu'il est bombé et qu'il est équilibré. Parmi les quatre premiers nœuds, on trouve les trois les plus couramment utilisés : le «four-in-hand» ou nœud simple (G+, D-, G+, C-, T), le Pratt (G-, C+, D-, G+, C-, T) et le demi-Windsor G+, D-, C+, G-, D+, C-, T). Le premier est une simple boucle composée des seuls déplacements obligatoires. Le Windsor (G+, C-, D+, G-, C+, D-, G+, C-, T) est en huitième position, car huit mouvements sont nécessaires. Les six autres nœuds sont inédits (le sixième est représenté sur la figure). L'élégance est tombée dans le giron de la modélisation et Brummel devait être mathématicien.

Un cadavre exquis?

Un poisson fossile chinois trahit une origine peu compatible avec l'arbre généalogique des vertébrés.

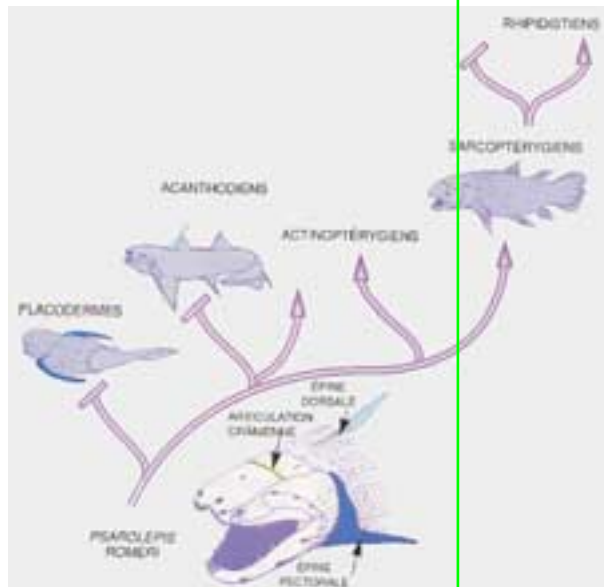
Jusqu'en 1998, la famille des poissons osseux était unie et harmonieuse. La phylogénie de ce grand groupe satisfaisait la communauté des paléontologues et bénéficiait d'un large consensus. Les fossiles s'inséraient sans ambiguïté dans l'un ou l'autre de ses groupes. Pourtant, un poisson fossile daté de 400 millions d'années et étudié récemment est venu semer la discorde dans cet équilibre familial. Ses différents caractères morphologiques en font un « vilain petit canard » qui n'a pas encore de place dans sa famille.

Plusieurs crânes ont été découverts il y a près de 20 ans sur le gisement de Oujiang, dans la province chinoise du Yunnan, par Yu Xiaobo, alors de l'Institut de paléontologie des vertébrés et de paléoanthropologie de Pékin. Ces crânes étaient conservés aux États-Unis, tandis que d'autres éléments du squelette avaient été négligés, car, en dépit de leur aspect identique, ils paraissaient ne pas appartenir à la même espèce. Ces os, ainsi que des fragments d'os des joues et de mâchoires, ont été réanalysés et attribués à une seule et même espèce, *Psarolepis romeri*, par Zhu Min, alors invité au

Muséum national d'histoire naturelle de Paris.

Psarolepis romeri présente des caractères morphologiques de chacun des grands groupes de vertébrés à mâchoires. Il n'est connu que par des éléments isolés d'individus différents (crâne, ceinture pectorale, écailles, etc.). Néanmoins, la structure caractéristique de la couche de tissu dur qui recouvre les éléments fossiles indique indubitablement une même espèce. Nommé cosmique, ce tissu proche de la dentine et de l'émail de nos dents est connu uniquement chez les Sarcoptrygiens, groupe de vertébrés dont une partie des nageoires est charnue ou transformée en membres. Les Sarcoptrygiens actuels sont représentés par le coelacanth qui vit au large des Comores et de l'Indonésie, les dipneustes (des poissons à poumons), et les tétrapodes (les vertébrés terrestres pourvus de pattes, tels les êtres humains). *Psarolepis romeri* appartient-il pour autant à ce groupe ?

Sa boîte crânienne est effectivement articulée en deux parties, antérieure et postérieure (en vert sur la figure), comme celles des Sarcoptrygiens primitifs, dont le coelacanth. Cependant, alors que sa mandibule fortement recourbée permettrait de le classer dans un sous-groupe éteint des Sarcoptrygiens, ses dents à structure plissée sont caractéristiques de l'autre sous-groupe, celui des Rhipidistiens, dont tous les vertébrés tétrapodes actuels sont issus. Par ailleurs, les os de la joue de *Psarolepis romeri* et le trajet de ses canaux sensoriels ressemblent à ceux des Actinoptérygiens primitifs – le groupe frère des Sarcoptrygiens, composé des poissons à nageoires rayonnées que nous connaissons aujourd'hui. En outre, sa ceinture pectorale, constituée de larges plaques osseuses et prolongée latéralement par une gigantesque épine (en bleu sur la figure), rappelle celle des placodermes aujourd'hui disparus. Enfin, des épines isolées (en turquoise sur la figure), présentant l'ornementation caractéristique de *Psarolepis romeri*, étaient



Psarolepis romeri (en bas) présente un mélange de caractères : l'articulation de sa boîte crânienne (en vert) ressemble à celles des sarcoptrygiens ; son dos est armé d'épines en avant des nageoires dorsales (en bleu clair), comme les acanthodien ; sa ceinture pectorale était prolongée par une épine latérale comme les placodermes (en bleu foncé). Les traits obliques sur les branches de l'arbre indiquent des familles éteintes.

BRÈVES

Perles (moins) rares

À l'Université de Mayence, Wolfgang Tremel, Jörg Küther et Ram Seshadri ont synthétisé des perles. Le travail des chimistes ne vise pas la production de bijoux, mais la compréhension des mécanismes de la « biominéralisation », qui régit la constitution des dents, des os... et des perles. Les chimistes ont obtenu des perles bien rondes, au lieu des cubes classiquement attendus, en faisant cristalliser la calcite sur une sphère d'or prétraitée : le prétraitement est la clef du succès ; selon les conditions, on obtient une croissance sphérique ou des agrégations de petits cristaux.

La sélection du maïs

Le maïs n'est pas une plante naturelle : il a été obtenu par sélection à partir de la teosinte, graminée sauvage d'Amérique centrale. L'équipe de John Doebley, de l'Université du Minnesota, a identifié l'un des gènes touchés par cette sélection : il régule la production d'une protéine qui limite la longueur des tiges latérales. Cette protéine est produite en plus grande quantité dans le maïs : les tiges de la teosinte sont longues et se terminent par une aigrette, tandis que celles du maïs sont courtes et portent de longs épis. L'examen des variantes de ce gène montre que la variété de teosinte la plus proche du maïs actuel est originaire du Sud-Ouest du Mexique : c'est probablement là que la plante céréalière a été domestiquée.



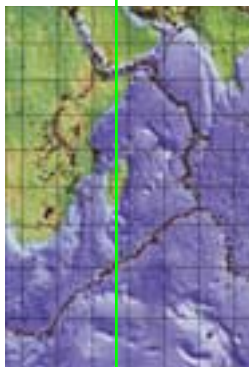
Congélation en altitude

L'archéologue Johan Reinhard vient d'annoncer la découverte, sur les pentes du volcan argentin Llullaillaco, à environ 7 000 mètres d'altitude, des corps congelés de trois enfants incas, probablement sacrifiés il y a 500 ans. Ces momies sont bien conservées : elles ne sont pas desséchées, le sang est encore gelé dans le cœur et dans les vaisseaux sanguins. Les analyses que Fon pratiquera sur ces restes préciseront leurs conditions de vie, le régime alimentaire ou les maladies des Incas, comme cela a été fait pour l'homme des glaces Otzi, découvert dans un glacier tyrolien il y a quelques années.

BREVES

Nouvel océan

La vallée du Rift, en Afrique de l'Est, résulte de la séparation du continent africain en deux plaques : la plaque somalienne, à l'Est, et la plaque nubienne, à l'Ouest. En rassemblant des données géométriques, Dezhi Chu et Richard Gordon, de l'Université Rice, confirment la conclusion issue de l'analyse de la topographie et de la composition des roches : les deux blocs ont des mouvements différents par rapport à la plaque Antarctique qui les borde au Sud. Ils pivotent l'un par rapport à l'autre, s'écartant de six millimètres par an au Nord (la vallée du Rift), et se rapprochant de deux millimètres par an au Sud (sous l'océan Indien).



Menace d'extinction

L'une des missions du Muséum national d'histoire naturelle de Paris est la conservation et la présentation au public des espèces, vivantes ou disparues. Saura-t-il conserver le savoir-faire nécessaire ? Les taxidermistes qui préparent les peaux des animaux et les reconstituent sur des mannequins, et qui étudient comment conserver ou imiter les végétaux, y sont en voie de disparition : de 14 il y a quelques années, leur nombre est aujourd'hui réduit à six. Au total, les organismes publics français n'emploient plus qu'une cinquantaine de ces spécialistes, dont la formation récente de nombreuses années de pratique.

Balance de précision

Si vous voulez de la précision, faites une mesure de fréquences, préconisait Pierre Curie. La masse des virus et d'autres particules très légères, de l'ordre du femtogramme (10⁻¹⁵ gramme), sera bientôt mesurée. Une équipe de l'Institut de technologie de Géorgie a mis au point une balance microscopique, constituée de nanotubes de carbone. Lorsque l'on applique une tension oscillante à ces tubes, ils vibrent comme des cordes de guitare. Les particules collées à un nanotube modifient sa fréquence de résonance, et cette variation mesure la masse de la particule qui y est attachée. Par cette méthode, les physiciens ont pesé une particule de graphite de 22 femtogrammes. Un record.

probablement situées en avant des nageoires dorsales comme celles des Acanthodiens.

L'analyse informatique de ses caractères indique que ce «cadavre exquis» paléontologique pourrait être un Sarcoptrygien très primitif ayant conservé des caractères hérités d'un ancêtre commun avec les autres groupes de vertébrés. Ces caractères, tels que la présence d'épines en avant des nageoires auraient alors été perdus par les Actinoptérygiens et par les Sarcoptrygiens. Une autre possibilité serait que *Psarolepis romeri* soit l'ancêtre

des Sarcoptrygiens et des Actinoptérygiens, présentant des caractères des deux groupes.

La découverte d'éléments osseux du squelette interne, par exemple des nageoires, fournira peut-être des indices moins équivoques. *Psarolepis romeri*, qui n'est peut-être qu'un Sarcoptrygien aberrant, trouvera alors sa place dans un des groupes de la grande famille des vertébrés. Le vilain petit canard sera peut-être alors un cygne qui bouleversera la généalogie des vertébrés.

Philippe JANVIER
Muséum national d'histoire naturelle

Bleu cerise

La perception des couleurs dépend du vocabulaire acquis pendant l'enfance.

Selon Paul Éluard, *La terre est bleue comme une orange, Jamais une erreur les mots ne mentent pas.* (L'amour, la poésie.) Cependant, dans notre vie quotidienne, notre langage oublie toute poésie : une orange est... orange et le ciel est bleu. Pendant notre enfance, nous nous sommes habitués à distinguer les couleurs et, même si le turquoise est ambigu (certains le voit bleu, d'autres vert), aujourd'hui nous avançons au feu vert, freinons au feu orange et stoppons au feu rouge.



1. La perception des différentes couleurs dépend du vocabulaire acquis. Alors qu'un Européen met dans deux catégories différentes le ciel (bleu) et l'herbe (verte), le Berinmo les regroupe sous le même vocable, le nol.

Notre rétine est composée de cellules nerveuses qui, grâce à des pigments, sont sensibles aux ondes lumineuses dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 800 nanomètres (milliardièmes de mètre). Les pigments ne sont pas suffisamment sensibles pour distinguer toutes les longueurs d'ondes : notre cortex cérébral caractérise alors les longueurs d'onde que nos yeux perçoivent de façon identique par un seul mot qui désigne une couleur. Ce sont les sept couleurs de l'arc-en-ciel et quelques autres, tels le rose, le marron... Ces catégories chromatiques sont-elles universelles et innées ou dépendent-elles d'un vocabulaire acquis ?

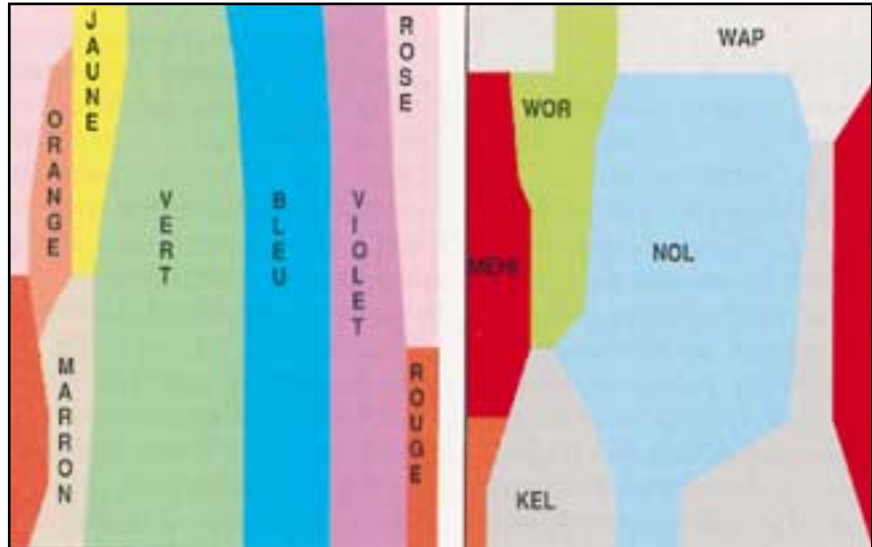
Deux équipes anglaises ont étudié les perceptions des Berinmo, une tribu de chasseurs-cueilleurs de Papouasie Nouvelle-Guinée, et ont conclu que la perception des couleurs a, pour une large part, une composante linguistique.

Les Britanniques ont présenté aux Berinmo un nuancier composé de 160 couleurs que nous classons en huit catégories : le marron, le rouge, le rose, l'orange, le jaune, le vert, le bleu et le violet. Les Berinmo ont réparti ces couleurs selon cinq termes – wap, mehi kel, nol et wor – dont les chercheurs ont évalué le contenu sémantique. Chacun des groupes a nommé les échantillons (voir la figure 2) en fonction de son vocabulaire et ainsi défini les catégories de couleurs propres aux deux cultures. On constate que les frontières des couleurs ne se superposent pas, c'est-à-dire qu'une couleur unique (le nol) aux yeux des Berinmo est perçue comme deux couleurs différentes par les Européens (le vert et le bleu). En revanche, les couleurs proches de la frontière nol/wor correspondent pour nous à du

vert ; notre œil établit deux distinctions – entre le bleu et le vert, et entre le vert et le jaune –, auxquelles les Berinmo sont insensibles.

Les linguistes ont ensuite approfondi l'étude par une série de tests. Ils présentaient au sujet – Berrinmo ou Anglais – un échantillon de couleur à mémoriser, puis 30 secondes plus tard, une paire d'échantillons peu différents et contenant la couleur initiale que le sujet devait retrouver : les résultats de ces tests ont confirmé que les Berinmo classaient bien les objets situés de part et d'autre de la frontière nol/wor (contrairement aux britanniques), mais se trompaient pour les nuances de bleu ou de vert.

Afin de tester l'universalité de la perception des couleurs, ils ont ensuite tenté d'enseigner à des anglophones la distinction nol/wor, et à des Berinmo, les distinctions bleu/vert et vert/jaune. Ils ont aussi enseigné une distinction arbitraire qui n'existe dans aucune des deux langues : vert 1 et vert 2. Les Berinmo ont appris avec la même difficulté à distinguer le bleu du vert que le vert 1 du vert 2. A l'inverse, les Anglais ont eu plus de facilités à différencier le jaune du vert que le nol du wor. La perception de couleurs différentes est plus facile lorsque les



2. Les deux graphes montrent les catégories de couleur discernées par un européen (à gauche) et un Berinmo (à droite). En abscisses sont notées les différentes nuances, et en ordonnées, l'intensité lumineuse. Les frontières des zones de couleurs ne sont pas superposables. À l'inverse des européens, les Berinmo ne distinguent pas le vert du jaune, ni le vert du bleu, mais différencient le nol du wor. La perception des couleurs dépend du langage acquis.

couleurs correspondent à une division linguistique acquise depuis longtemps.

Les chercheurs ont conclu de ces résultats que l'influence du langage est prépondérante dans la catégorisation

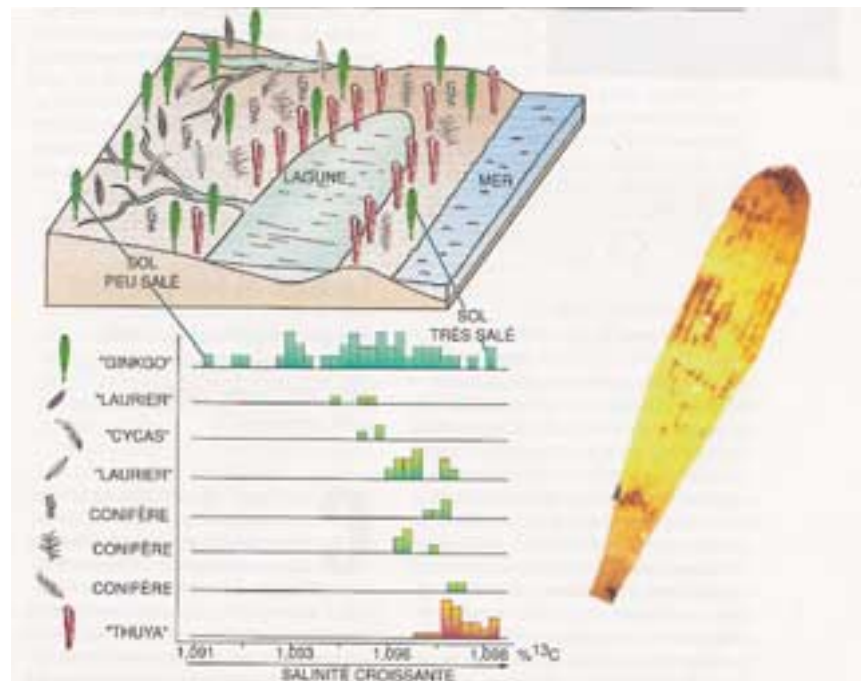
des couleurs. La façon dont on évoque un objet oriente sa perception. Avec un langage différent, les monochromes de Klein nous apparaîtraient-ils comme de magnifiques paysages ?

La résistance des ginkgos

Comme son parent actuel, un ginkgo disparu survivait dans des conditions variées.

Le Ginkgo biloba, ou Arbre aux 40 écus, se répand comme arbre d'ornement le long des trottoirs de nos villes : les paysagistes apprécient sa grande résistance aux agressions, maladies infectieuses, attaques d'insectes ou pollution atmosphérique. Il est le dernier représentant vivant de l'ordre des Ginkgoales, qui a prospéré à l'ère secondaire : une centaine d'espèces de ginkgo ont été répertoriées dans les sédiments de cette époque en Afrique, en Asie et en Amérique du Nord. L'une de ces espèces possédait, comme son parent actuel, d'étonnantes capacités d'adaptation : elle poussait dans des sols de salinité très variée.

Comment connaître l'écologie d'une plante fossile ? Vivait-elle dans un milieu aride ? Ou sur un sol salé ? La morphologie est parfois trompeuse : des



Plusieurs espèces de plantes poussaient il y a 100 millions d'années au bord d'une lagune située près d'Angers. La salinité du sol, donc la distance à la lagune, déterminée par le pourcentage de carbone 13 présent dans les feuilles fossiles, est caractéristique de chaque espèce, sauf pour un arbuste, aujourd'hui disparu de la famille du Ginkgo biloba (feuille à droite) : celui-ci s'adaptait à des milieux de salinités très diverses.

BREVES

Décapage au blé

Comment décaper sans altérer le support? Avec de la farine! Fort de ce constat, la Direction générale de l'armement a mis au point un robot qui utilise ce végétal amylacé respectueux du support. La structure du grain de blé est modifiée par un processus de cuisson et d'extrusion. En faisant varier la dureté de la granulométrie des grains, on décape la peinture sur des matériaux composites, très fragiles, sans les abîmer. La forme de l'objet à décaper est préalablement numérisée ; un robot assure ensuite le travail.

Un système extrasolaire

La vie n'a pas encore été découverte sur une planète extrasolaire, mais des astronomes américains viennent d'annoncer la découverte de deux planètes autour d'une étoile qui en comptait déjà une. Autour d'upsilon de la constellation



d'Andromède, située à une cinquantaine d'années-lumière de la Terre, tournent ainsi trois planètes : c'est le premier système planétaire autour d'une étoile analogue au Soleil. La planète déjà découverte, à 0,059 unité astronomique de l'étoile (la Terre est à une unité astronomique du Soleil), est aussi massive que Jupiter. Les nouveaux candidats sont à 0,83 et 2,5 unités astronomiques de l'étoile centrale et ont une masse plusieurs fois supérieure à celle de Jupiter.

Le virus de la variole

Faut-il détruire les échantillons du virus de la variole? En 1980, lorsque l'Organisation mondiale de la santé a déclaré l'éradication de la variole, elle a promis une destruction des souches existantes pour le 30 juin 1999. Aujourd'hui, le débat reste ouvert. Les partisans de la destruction des souches virales estiment que leur conservation ferait planer un risque : des terroristes qui s'empareraient des souches pourraient déclencher une pandémie, car ce virus est extrêmement contagieux. Au contraire, des biologistes prônent la conservation des souches en vue d'étudier les atteintes virales voisines, telles le monkeypox et le cowpox qui frappent maintenant l'homme.

caractères persistent dans des lignées dont l'environnement a changé. Ainsi les conifères, qui ont émergé sous des climats arides, ont-ils conservé l'épaisse cuticule qui les protège de l'évaporation, alors qu'ils vivent aujourd'hui à des latitudes tempérées, où l'eau abonde. L'assemblage des espèces trouvées dans le même gisement fossilifère ou la composition des sédiments dans lesquels elles sont enfouies donnent aussi des informations, mais toujours indirectes.

En revanche, les proportions relatives des isotopes stables du carbone nous informent directement sur l'environnement où la plante a vécu. Le carbone présente deux isotopes stables : le carbone 12, le plus abondant, dont le noyau contient six protons et six neutrons, et le carbone 13, dont le noyau contient un neutron supplémentaire et qui est donc un peu plus lourd. Lors de la photosynthèse, qui permet aux plantes de fabriquer les molécules nécessaires à leur croissance à partir du dioxyde de carbone de l'atmosphère, celles-ci utilisent plutôt le carbone 12, plus léger donc plus facile à incorporer. Cette préférence est moins marquée en cas de stress, en période de sécheresse par exemple : les teneurs en carbone 13 d'une plante sont donc plus grandes lorsqu'elle pousse en milieu aride que lorsqu'elle pousse en milieu humide.

En mesurant leur teneur en carbone 13, nous avons reconstitué l'écologie des plantes qui poussaient il y a environ 100 millions d'années au bord d'une lagune, à quelques kilomètres au Nord d'Angers. Outre les restes de nom-

breux exemplaires d'un ginkgo fossile, *Eretmophyllum andegavense*, ce gisement contient plusieurs autres plantes : un thuya de Berbérie fossile, deux autres conifères, un cypripède et deux lauriers fossiles. Ces plantes sont très bien conservées : lorsqu'ils ont vu les feuilles fossiles, les fouilleurs ont d'abord cru que le vent avait apporté des feuilles mortes de l'automne précédent. Après un court transport dans des ruisseaux, les tissus végétaux se sont fossilisés, au fond de la lagune, dans de l'eau saturée en sel et dépourvue d'oxygène. Leur composition en carbone n'a pas changé depuis leur mort.

Les fortes teneurs en carbone 13 du thuya montrent qu'il était très stressé : il vivait juste au bord de la lagune, là où le sol était très salé. Pour chacune des autres espèces, tous les individus étaient aussi étroitement regroupés autour d'une valeur moyenne de salinité, variable selon l'espèce. Seul le ginkgo fossile fait exception : la diversité des teneurs en carbone 13 des individus montre que l'espèce vivait aussi bien sur un sol salé que sur un sol «doux».

Cette adaptabilité ne lui a pourtant pas permis de subsister jusqu'à aujourd'hui. Le Ginkgo biloba lui-même n'existe plus à l'état naturel que dans une petite région de Chine. La faible efficacité du mode de reproduction des Ginkgoales (leurs graines ne sont protégées ni par un ovaire ni par un fruit, et ils ne possèdent pas d'organe qui retienne le pollen) ne leur a sans doute pas permis de résister à l'invasion des plantes à fleurs.

T.T. NGUYEN TU et H. BOCHERENS,
Lab. de biogéochimie isotopique,
Université Paris 6.

Le tout et les parties

Parmi les primates, seuls les hommes perçoivent plus vite une forme globale que ses détails.

Comment reconnaissons-nous visuellement un objet? Sommes-nous plutôt attentifs à l'identité des parties qui le composent ou, au contraire, à leur arrangement spatial? Lorsqu'on nous présente des formes construites par assemblage de formes plus petites (par exemple, un grand cercle construit avec de petits carrés), nous identifions plus vite la grande forme (le cercle) que la petite (le carré). Ce traitement prio-

ritaire des attributs globaux est certainement un avantage : la structure générale des objets ou des scènes visuelles est souvent une meilleure source d'identification et de discrimination que la structure des parties qui les composent. Pourtant, parmi les primates, nous seuls avons cette capacité.

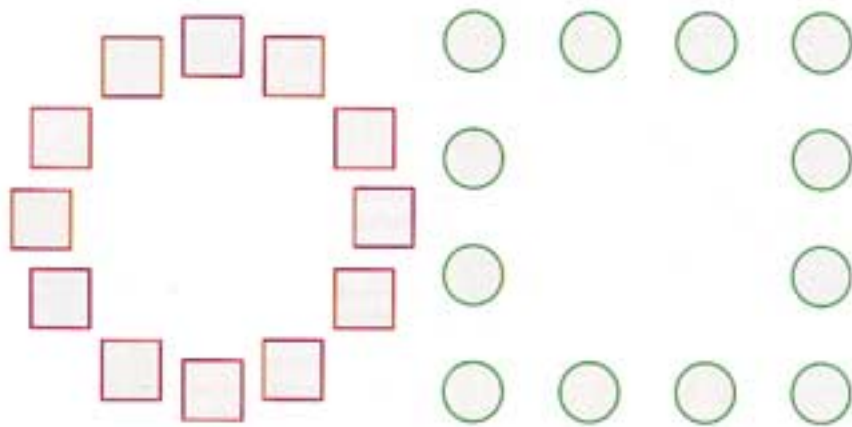
Des singes perçoivent-ils plutôt le tout d'un objet, ou plutôt ses parties? Nous avons placé des babouins devant un écran d'ordinateur sur lequel étaient affichées des formes composites, tels des carrés composés de petits cercles ou, à l'inverse, des cercles composés de petits carrés. Les singes devaient actionner le plus rapidement possible une manette de jeu dès que la forme présentée contenait un cercle, grand ou petit. Chaque bonne réponse était

récompensée par une friandise au goût de banane.

Contrairement à l'homme, les babouins détectent plus rapidement le cercle lorsqu'il est un constituant de la forme que lorsque c'est la forme globale. Cette perception préférentielle des constituants, qui s'applique à une grande variété d'objets, semble révéler un principe général du traitement visuel chez le babouin ; on la retrouve pour d'autres combinaisons de formes géométriques.

La différence entre l'homme et le babouin suggère qu'il y a eu une évolution des traitements visuels des objets chez les primates, notamment au sein de la lignée des singes dits de «l'Ancien Monde» qui a donné les singes anthropoïdes et l'homme. Avec Masaki Tomonaga, du Centre de recherche sur les primates d'Inuyama au Japon, nous avons confirmé cette hypothèse évolutive, en réalisant les mêmes expériences avec des chimpanzés, qui se situent, du point de vue de la phylogénèse, entre l'homme et le babouin. Le chimpanzé reconnaît les formes à la même vitesse, quel que soit le niveau de présentation : sa perception des objets et des scènes visuelles semble donc, comme sa position dans l'évolution, intermédiaire entre celle du babouin et la nôtre.

Des travaux utilisant les techniques récentes d'imagerie cérébrale ont montré que les zones du cerveau impliquées dans le traitement de la globalité des



Lorsque nous observons ces deux formes, nous percevons d'abord le cercle (à gauche) ou le carré (à droite) : nous sommes plus sensibles à la forme globale qu'aux détails. Au contraire, les babouins sont d'abord sensibles aux détails, sans doute parce qu'ils n'ont pas appris à associer automatiquement les constituants d'un objet.

images sont différentes de celles mises en œuvre pour le traitement des détails. La diversité dans la manière de percevoir les objets proviendrait-elle alors de différences neurobiologiques entre les cerveaux du babouin, du chimpanzé et de l'homme ? Probablement pas : toutes les données disponibles indiquent une grande ressemblance entre les voies visuelles et les aires corticales mises en jeu dans la perception des objets chez ces différentes espèces.

Nous proposons au contraire que ces variations entre espèces reflètent des différences dans la capacité à relier entre elles les parties pour percevoir

le tout. Le groupement des éléments locaux en une structure globale s'effectue de manière automatique chez l'homme, alors qu'il requiert une attention soutenue chez le singe, en particulier chez le babouin. Il est possible que certains apprentissages propres à l'homme, tel celui de la lecture, favorisent le caractère automatique de ce processus de groupement. Pourrait-on, par des apprentissages analogues, favoriser un traitement prioritaire de la structure globale chez le singe ?

Joël FAGOT et Christine DERUELLE, Centre de recherches en neurosciences cognitives, CNRS, Marseille

Nœuds et ADN

Les nœuds de l'ADN éclairent la réplication.

La voie la plus directe n'est pas toujours la plus rapide. Ainsi, les biologistes doivent-ils inventer des approches indirectes pour explorer les cellules vivantes. Nous avons utilisé une méthode qui se fonde sur les nœuds de l'ADN pour déterminer la structure de la molécule au cours de sa réplication.

L'étude de l'ADN dans les bactéries vivantes ne peut se faire par examen de minces coupes de bactéries, au microscope électronique : comment pourrions-nous alors discerner les molécules d'ADN, parmi les autres constituants cellulaires ? Même si nous localisions une molécule d'ADN, ce serait grand miracle que de l'avoir tout entière dans la coupe. Pourrions-nous

alors extraire l'ADN entier des cellules, et observer ensuite des micrographies électroniques de molécules en cours de réplication ? Nous ne verrions alors pas la structure tridimensionnelle des molécules, car elle aurait été modifiée par les manipulations.

Nous avons contourné cette difficulté en regardant l'ADN noué *in vivo* : les nœuds de l'ADN subsistent alors au cours des manipulations, de sorte qu'ils permettent de suivre à la trace la structure de l'ADN au cours de la réplication.

Les nœuds de l'ADN apparaissent au cours de la réplication. Lors de cette opération, les deux brins de la double hélice sont localement séparés par des enzymes, chaque brin constituant un modèle pour la synthèse du brin complémentaire. La région de séparation des deux brins, nommée « bulle de réplication », grossit à mesure que les brins complémentaires sont synthétisés.

Quand les hélices se détordent, la torsion des brins est reportée sur les

extrémités de la bulle de réplication ; pour dix bases répliquées, un tour de la double hélice d'ADN doit être éliminé par des enzymes nommées topo-isomérases. Celles-ci coupent l'ADN et laissent passer une autre partie de la molécule à travers la coupure, puis elles ressoudent ensuite les brins. Les erreurs qui ont lieu lors de ces passages conduisent à la formation de nœuds dans les parties répliquées de l'ADN.

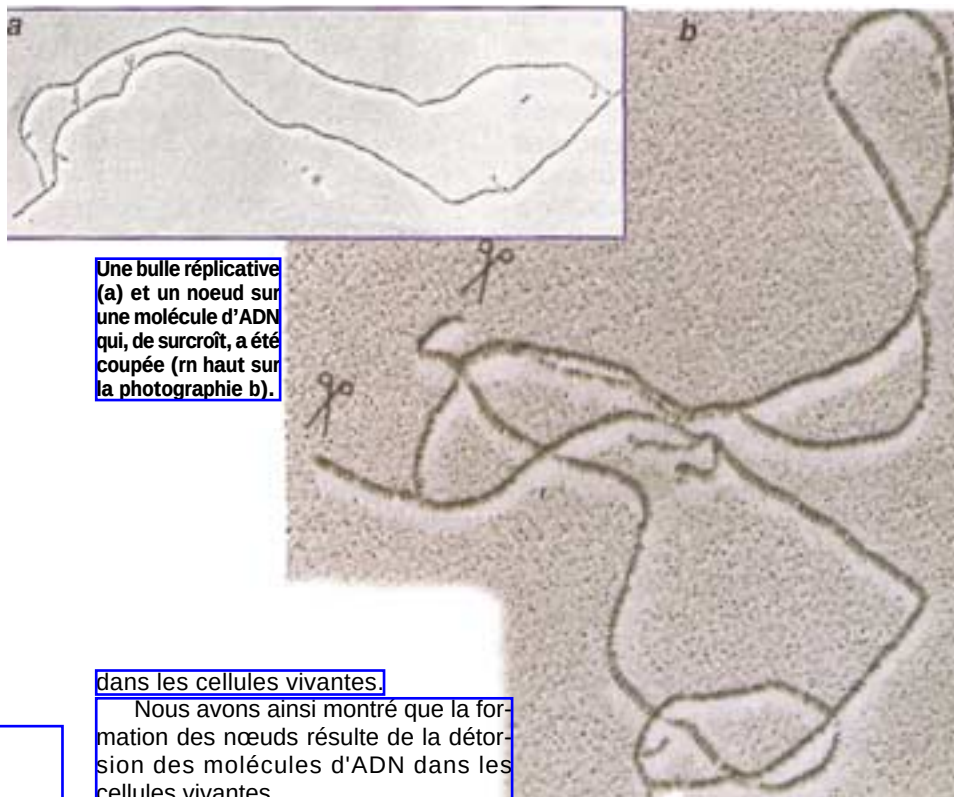
Ces nœuds nous intéressent. Pour les étudier, nous avons introduit des séquences à des points particuliers de l'ADN. Ces séquences bloquaient la réplication. Ainsi nous avons préparé des échantillons d'ADN qui étaient enrichis en bulles de réplication toutes de même taille. Puis, à l'aide d'« enzymes de restriction » (qui reconnaissent des séquences de l'ADN et coupent à ces séquences particulières), nous avons coupé les molécules d'ADN des deux côtés des bulles de réplication et obtenu des fragments que nous avons sépa-

rés par la technique d'électrophorèse sur gel (on dépose les molécules sur un gel et l'on applique un champ électrique, qui force la migration des molécules).

Nous avons alors observé une bande qui correspondait à des bulles de réplication non nouées. Cette bande était accompagnée de bandes satellites, moins nettes, composées de bulles de réplication qui portaient des nœuds de divers types.

Nous avons initialement étudié ces nœuds par microscopie électronique, mais, Comme l'ADN est une molécule très fine, leur observation directe ne permettait pas de voir correctement les croisements. Une autre méthode, indirecte, s'imposait : nous avons recouvert l'ADN d'une protéine, la protéine ReCA, afin de l'épaissir et de raidir les filaments d'ADN.

Ainsi nous avons réussi à observer les nœuds (voir la figure b) et à analyser les bulles de réplication : tous les nœuds sont de simples nœuds de trèfle, de même «chiralité» (un objet est chiral quand il se distingue de son image dans un miroir, comme une main gauche et une main droite). Quand des nœuds de ce type se forment par un procédé aléatoire, il en existe autant de chaque chiralité. Si l'on n'observe que des nœuds d'un seul type, c'est que leur mode de formation n'est pas aléatoire



Une bulle répliative (a) et un nœud sur une molécule d'ADN qui, de surcroît, a été coupée (rn haut sur la photographie b).

dans les cellules vivantes.

Nous avons ainsi montré que la formation des nœuds résulte de la détorsion des molécules d'ADN dans les cellules vivantes.

Pourquoi tous ces efforts ? La compréhension de la structure tridimensionnelle de l'ADN est importante en biologie et en médecine, parce que les inhibiteurs des enzymes topoisomérases sont utilisées pour bloquer la prolifération des cellules cancéreuses. Comprendre les mécanismes pathogènes de la réplication, nous pourrions chercher de nouveaux moyens de bloquer la réplication de l'ADN dans

les cellules cancéreuses ou dans les bactéries pathogènes.

J. SCHVARTZMAN, CIB-CSIC, Madrid,
J. SOGO, École polytechnique de Zurich
A. STASIAK, Université de Lausanne

Entre l'arbre et l'écorce

Contorsions d'une plaque entre deux supports rigides.

Les œuvres d'Edgar Poe regorgent de situations terrifiantes créées par des mécanismes diaboliques. Ainsi, dans *Le puits et le pendule*, les murs d'une cellule se rapprochent-ils inexorablement d'un prisonnier, le menaçant d'écrasement. Pour celui-ci, l'issue serait à coup sûr fatale, si les armées révolutionnaires n'intervenaient pas. Qu'en serait-il pour une plaque ainsi comprimée ?

Les plaques dévoilent de surprenantes capacités d'adaptation à l'écrasement. En se déformant, elles évitent de passer du régime élastique (la plaque reprend sa forme initiale après qu'on a supprimé la contrainte) au régime plastique (la déformation est définitive) ; quand les contraintes élastiques sont supprimées, les plaques

reprennent spontanément leur forme initiale.

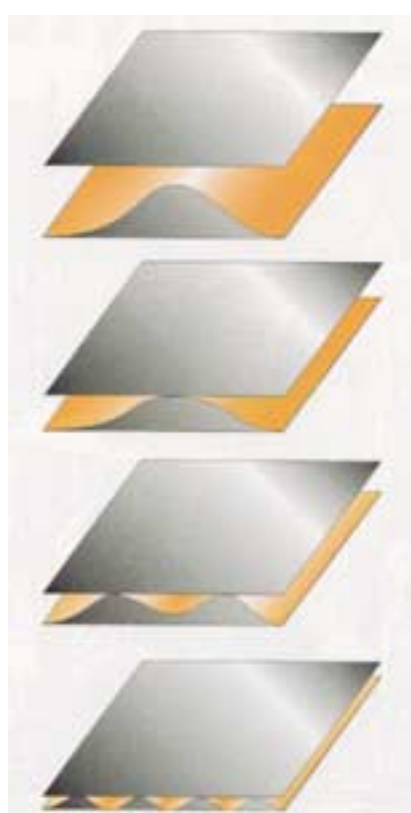
L'adaptation des plaques se traduit par leur déformation, et l'analyse de cette adaptation est aujourd'hui élucidée. Bien que la loi de Hooke de l'élasticité linéaire (la déformation est proportionnelle à la contrainte) reste valable en tout point de la plaque, elle est mise en défaut pour la réaction de la plaque sur les murs : celle-ci est fortement non linéaire.

Pour observer ce phénomène, posons une feuille de papier sur un support plan. Plissons-la légèrement en rapprochant deux bords opposés de cinq pour cent environ. Collons ceux-ci sur le support afin de maintenir le plissement, puis écrasons la feuille lentement à l'aide d'une plaque rigide. Le contact se fait d'abord suivant une ligne, puis selon un plan, jusqu'à ce qu'un flambage engendre un petit pli de courbure inversée. Écrasons davantage : le petit pli grossit, son sommet descendant vers la plaque inférieure, qu'il finit par toucher,

formant alors deux plis complets. La même évolution se répète ensuite pour chacun des deux plis formés.

Quelle force doit-on appliquer pour obtenir ces déformations ? Si la feuille était un ressort, sa réaction sur l'étau qui l'enferme augmenterait avec l'écrasement. Toutefois nos mesures montrent que cette intuition est erronée : la force croît et décroît alternativement au cours de l'écrasement. La réaction augmente, en moyenne, comme l'inverse du cube de la hauteur du pli, soit bien plus qu'un ressort, et avec des variations considérables, la force s'annulant même entre chaque flambement. Les accroissements de la réaction sur la plaque et le support correspondent à un comportement type ressort, et les diminutions à un comportement type «anti-ressort» : comme quand un matériau fragile se rompt, la réaction diminue ici avec l'écrasement.

Revenons au début de l'écrasement : lorsque le petit pli né d'un flambement vient



Les premières étapes de la déformation d'une feuille entre deux plaques rigides.

Juste de toucher le support, la feuille est composée de deux plis jumeaux dont la hauteur est moitié de la hauteur initiale avant écrasement. Que vaut alors sa force de poussée sur la plaque ? Pour la déterminer, agrandissons un des deux plis : nous retrouvons une situation identique à la situation initiale. Comme au début de l'opération, le pli ne poussait pas sur la plaque d'écrasement, chacun des plis jumeaux ne pousse pas non plus : la réaction de la feuille sur la plaque qui l'écrase est nulle. Le même raisonnement appliqué aux plis des générations successives conduit à la même conclusion : la réaction de la feuille s'annule par intermittence au cours de l'écrasement !

Ce raisonnement s'étend aux autres états de la feuille (à l'exception de ceux où un petit pli reste en suspens). Pour cela, comparons les états présentant des plis de tailles différentes, mais de même forme. Un calcul mécanique montre qu'à forme donnée, un pli de longueur moitié pousse quatre fois plus ; comme les plis sont alors deux fois plus nombreux que les plis initiaux, une feuille écrasée de moitié pousse donc au total non pas deux fois, mais huit fois plus fort !

Lorsque la plaque se déforme, chacune de ses parties reste ainsi élastique, mais la réaction globale est non linéaire : une succession de petits ressorts ne fait pas ici un grand ressort. Les systèmes lamellaires (contreplaqués, matériaux composites), les dépôts de films sur des substrats ou les couches géologiques se comportent probablement ainsi.

Alain POCHEAU et Benoît ROMAN
Université Aix-Marseille 1, Marseille

Aucun repunit n'est une puissance pure

L'ordinateur est un atout décisif en théorie des nombres.

Jean-Paul Delahaye nous a récemment fait voyager dans l'univers enchanteur des nombres dont l'écriture décimale possède de belles propriétés de symétrie, et, en particulier, parmi les repunits, ces nombres, comme 11 et 111111, constitués d'une chaîne de 1 (voir *Les chasseurs de nombres premiers*, Pour la Science, avril 1999, page 100)

Outre la question de leur primalité, thème central de l'article de J.-P. Delahaye, d'autres problèmes intéressent les mathématiciens, notamment le suivant : un repunit peut-il être un carré, un cube, ou, plus généralement, une puissance parfaite ? À première vue, si de tels nombres existent, ils semblent beaucoup plus rares que les repunits premiers, car seuls environ $x^{1/2}$ entiers compris entre 0 et x sont des puissances pures, (ce sont pour la plupart des carrés, les autres puissances étant nettement moins nombreuses), alors que, selon la loi de raréfaction des nombres premiers, $x/\log x$ d'entre eux, environ, sont des nombres premiers inférieurs à x .

Depuis une vingtaine d'années, on sait qu'aucun repunit différent de 1, est un carré, ni un cube, ni même une puissance p -ième pour tout entier p inférieur ou égal à 19, mais le résultat général n'a été démontré que l'an dernier : mis à part 1, aucun entier ne s'écrivant qu'avec le chiffre 1 en base dix n'est une puissance parfaite. En outre, la même conclusion s'applique à tous les nombres de la forme $10(k)10(k)10(k)1$, où $0(k)$ désigne le bloc formé de k fois le chiffre 0.

Le problème revient à résoudre l'équation diophantienne (cet épithète signifie que l'on ne s'intéresse qu'aux solutions qui sont des nombres entiers), $10^n - 1 = 9y^q$, où les inconnues n , y et q sont des entiers au moins égaux à 2. En effet, le nombre $10^n - 1$ s'écrit avec n chiffres 9, et donc $(10^n - 1)/9$ s'écrit avec n chiffres 1.

La première étape consiste à montrer que l'entier q , que l'on peut sans restriction supposer premier, n'est pas trop grand. Pour cela, décomposons un nombre de la forme $9y^q + 1$ en produit de facteurs premiers, et notons u l'exposant de 5 dans cette décomposition ; on travaille ici avec le nombre 5 mais on pourrait également choisir le nombre 2, l'essentiel est de considérer un diviseur premier de 10. Bien sûr, u peut être nul

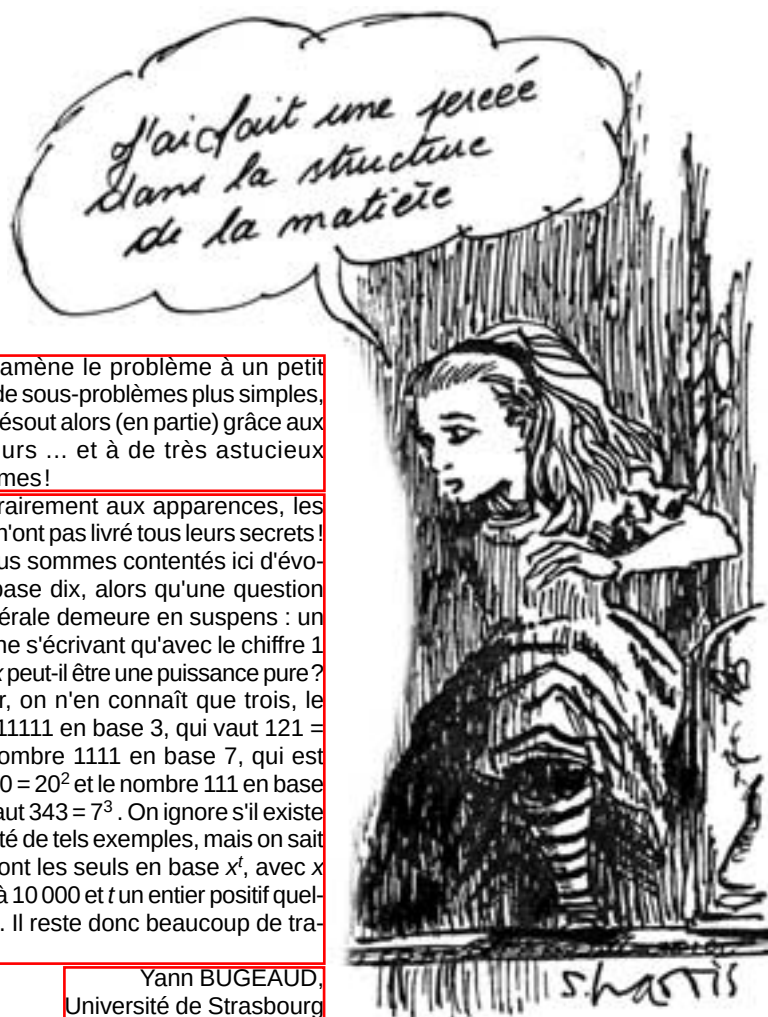
et est inférieur à $2 + q \log y / \log 5$, puisque $5^u < 10y^q$. Un résultat théorique riche de conséquences spectaculaires dans le domaine des équations diophantiennes donne cependant une bien meilleure majoration pour u , à savoir $u < 300 \log^2 q \log y$. Si l'on suppose que notre nombre $9y^q + 1$ est égal à 10^n , on a dans ce cas $u=n$ et, comme $10^n > y^q$, on obtient $n > q \log y / \log 10$. On déduit alors de ces inégalités une très bonne majoration pour q , et l'on parvient par cette méthode à montrer précisément que q est inférieur ou égal à 2063.

On a ainsi ramené la résolution d'une équation à trois inconnues à celle d'un nombre fini et pas trop élevé (en fait, exactement 311, car il y a 311 nombres premiers compris entre 2 et 2063) d'équations en deux inconnues n et y . Les étapes suivantes consistent à prouver que, pour chacune des 311 valeurs de q qu'il reste à traiter, si $10^n - 1 = 9y^q$, alors les entiers n et y vérifient nécessairement certaines conditions qui se révèlent, en fin de compte, incompatibles! Par exemple, on démontre, en utilisant des considérations de congruence, que q divise $n-1$. Il s'agit d'un simple test, cependant beaucoup trop long pour être effectué à la main. Il a donc fallu écrire un court programme et faire appel à l'ordinateur, qui s'est chargé des vérifications nécessaires. Cet aspect de la démonstration mérite d'être souligné, car nous sommes à une époque charnière où les progrès de nature théorique et les capacités de calcul des ordinateurs se complètent à merveille. Ainsi, dans de nombreuses questions relatives aux équations diophantiennes, la

théorie ramène le problème à un petit nombre de sous-problèmes plus simples, que l'on résout alors (en partie) grâce aux ordinateurs ... et à de très astucieux programmes!

Contrairement aux apparences, les repunits n'ont pas livré tous leurs secrets! Nous nous sommes contentés ici d'évoquer la base dix, alors qu'une question plus générale demeure en suspens : un nombre ne s'écrivant qu'avec le chiffre 1 en base x peut-il être une puissance pure? À ce jour, on n'en connaît que trois, le nombre 11111 en base 3, qui vaut $121 = 11^2$, le nombre 1111 en base 7, qui est égal à $400 = 20^2$ et le nombre 111 en base 18, qui vaut $343 = 7^3$. On ignore s'il existe une infinité de tels exemples, mais on sait que ce sont les seuls en base x^t , avec x inférieur à 10 000 et t un entier positif quelconque... Il reste donc beaucoup de travail!

Yann BUGEAUD,
Université de Strasbourg



Ventouses lumineuses

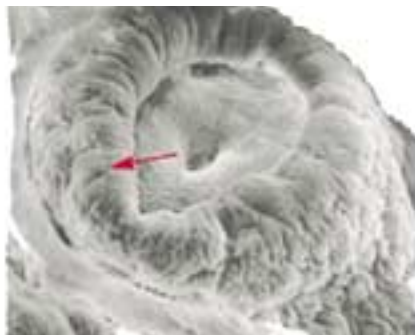
Les ventouses d'une pieuvre des grands fonds océaniques ont évolué en organes lumineux.

Dans les grands fonds de l'océan, là où la lumière du ciel ne parvient quasiment plus, certains poissons... pêchent «au lamparo» : ils sont munis d'un organe émettant de la lumière, attirant leurs proies qu'ils n'ont plus qu'à avaler. Diverses espèces marines, par exemple, les seiches et les calamars, ont également des organes lumineux. Toutefois, le groupe des pieuvres, voisin des seiches semblait dépourvu de cet artifice. Pourtant, Sönke Johnsen et Edith Widder, de l'Institut océanographique de Floride, et Elizabeth Balser, de l'Université de l'Illinois, ont découvert une espèce de pieuvre dont

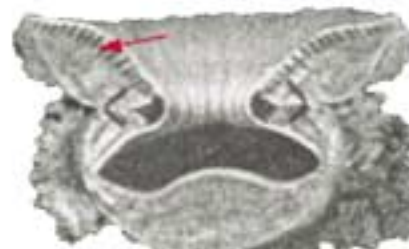
les huit tentacules sont munis d'une rangée d'organes qui émettent une lumière bleutée.

Dotées d'un système nerveux élaboré, les pieuvres sont parmi les invertébrés les

plus évolués. Elles sont capables d'apprendre en imitant un congénère. La plupart des espèces progressent sur des fonds rocheux à l'aide de deux rangées de ventouses adhésives disposées le long de leurs tentacules. Elles utilisent aussi les ventouses pour immobiliser leurs proies. Un sous groupe de pieuvres, les cirrates,



1. Microphotographie d'un organe lumineux (0,5 millimètre de diamètre) de *Stauroteuthis syrtensis* qui a conservé certaines caractéristiques anatomiques d'une ventouse : un anneau d'épiderme (flèche) entoure une dépression percée d'un pore.



2. Coupe transversale d'une ventouse typique (deux millimètres de diamètre). On retrouve le bourrelet (flèche) entourant une petite dépression. Au centre, un pore s'ouvre sur une chambre où la pression varie pour assurer l'adhérence.



3. Les ventouses de *Stauroteuthis syrtensis* ont évolué en organes lumineux.

dont les tentacules n'ont qu'une seule rangée de ventouses, a colonisé les grands fonds marins et n'utilise plus ses ventouses pour se déplacer : ces pieuvres nagent comme des méduses en refermant régulièrement leur huit tentacules.

Les zoologistes ont capturé trois spécimens de *Stauroteuthis syrtensis*, une espèce qui appartient au sous groupe des cirrantes, dans le golfe du Maine, au Nord-Est des États-Unis, à environ 800 mètres de profondeur. Les ventouses de ces animaux, d'environ 15 centimètres de longueur, étaient incapables de se fixer sur

un support. En revanche, dans l'obscurité, après une légère stimulation tactile de l'animal, par exemple avec la main, les pseudo-ventouses brillaient d'une lumière bleutée.

L'étude de l'anatomie (voir la figure 1) de ces organes, d'un demi millimètre de diamètre, a montré qu'ils conservent certaines caractéristiques des ventouses typiques (voir la figure 2). Ainsi, un bourrelet cutané entoure une petite dépression percée d'un pore. Cependant, l'analyse plus détaillée met en évidence certaines modifications, tant cellulaires que biochimiques. Les cellules musculaires sont atrophiées et ne sont plus contractiles ; elles

se sont transformées en cellules productrices de lumière, dénommées photocytes.

S. Johnsen, E. Widder et E. Balser en ont conclu que les ventouses ont évolué en organes lumineux. Dans les hauts fonds, les ventouses, devenues inutiles, ne représentaient plus un avantage sélectif. Pour un prédateur tel que la pieuvre, l'émission de lumière dans une zone obscure présente un avantage adaptatif qui a favorisé la modification des ventouses.

Grâce à ces photophores, les pieuvres communiquent, par exemple pendant la période de reproduction, ou encore attirent leurs proies, telles les petits crustacés. De plus, la longueur d'onde de la lumière émise est très proche du maximum de transmission par les océans, c'est-à-dire que les pieuvres sont visibles de loin.

Selon les zoologistes, l'évolution de ces organes est encore en cours. Les ventouses auraient tout d'abord évolué en un organe réflecteur de lumière extérieure, puis auraient produit leur propre lumière. *S. syrtensis* offre donc un terrain privilégié pour étudier l'évolution de la photoluminescence quand aucun fossile n'existe.

Étoile spirale

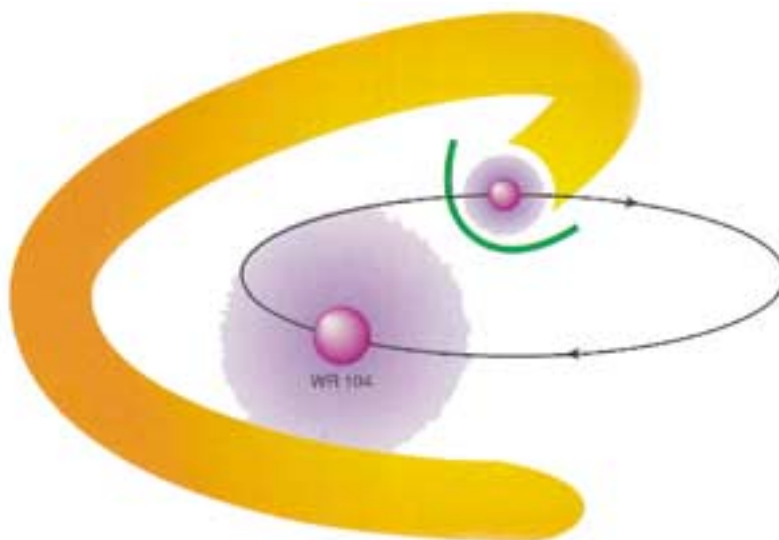
Une nouvelle technique d'interférométrie révèle une structure de poussières en spirale.

Les structures spirales sont bien connues des astronomes : ce sont celles des galaxies semblables à la nôtre. En revanche, ce genre de volutes n'existait pas pour les étoiles, jusqu'à ce que des astronomes américains découvrent une étoile spirale dans la constellation du Sagittaire à l'aide du télescope Keck, à Hawaï. Cette structure spirale serait un panache de poussières entraîné par la rotation d'un système binaire.

L'étoile WR 104 est une étoile de Wolf-Rayet, des étoiles chaudes plusieurs dizaines de fois plus massives que le Soleil. Située à près de 5 000 années-lumière de la Terre, cet objet est trop faible pour qu'on puisse le détailler, même à l'aide des meilleurs instruments. Aussi, les astronomes ont utilisé une technique interférométrique : la surface collectrice du télescope était masquée, à l'exception de 36 petites régions circulaires. Par la lumière captée, on reconstruit une image dont la résolution n'est que de quelques centièmes de seconde d'angle.

En avril 1998 et en juin 1998, les astronomes ont observé cette étoile. Ils ont découvert une structure spirale qui semblait tourner. Cette structure était vraisemblablement composée de poussières, car elle émettait dans l'infrarouge. Comment exprimer la forme de cette structure et sa rotation ?

En supposant que l'étoile WR 104 n'est pas seule : elle a un compagnon, une étoile de type OB, qui n'est pas directement visible, mais dont on note les effets sur les poussières. L'idée de la nature binaire de WR 104 n'est pas neuve, mais c'est seulement depuis quelques années que la présence d'une étoile compagnon

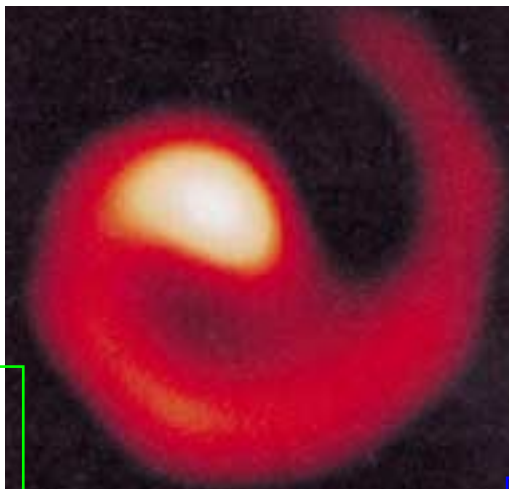


L'étoile WR 104 et son compagnon émettent un vent stellaire puissant (violet). Lorsque ces vents se rencontrent, une onde de choc se forme (vert), d'où résultent un refroidissement et une formation de poussières accrue. Le panache de poussières est entraîné par la rotation du système binaire, créant une spirale de poussières.

a été confirmée par la détection de raies d'hydrogène spécifiques aux étoiles de type OB.

Les étoiles de Wolf-Rayet ont une particularité : elles sont très lumineuses. Le même rapport de luminosité existe entre une étoile de Wolf-Rayet et le Soleil qu'entre le Soleil et la Lune. En raison de cette forte luminosité, l'atmosphère des étoiles de Wolf-Rayet est éjectée par la pression de radiation : ces étoiles émettent un vent stellaire violent.

Aussi les astronomes ont-ils été stupéfaits d'observer, sur WR 104, en plus du vent stellaire attendu, une importante quantité de poussières. Habituellement, les étoiles de Wolf-Rayet sont dépourvues de poussières, car ces dernières sont vaporisées par l'intense rayonnement ultraviolet de l'étoile. Pour expliquer ce paradoxe, les astronomes ont imaginé que le compagnon de WR 104 est à proximité et qu'il émet également un fort vent stellaire.



Cette spirale de poussières est en mouvement autour du système binaire WR 104.

Quel est le scénario de formation du panache ? Les vents de particules de WR 104 et de son compagnon sont émis dans toutes les directions. À l'endroit où ces vents se rencontrent, une onde de

compression se forme, refroidissant le vent stellaire. C'est dans ce cocon relativement froid, à l'abri du rayonnement destructeur des étoiles, que les poussières se rassemblent. Entraînées dans le mouvement de rotation du système binaire, les poussières dessinent alors une spirale tournante, comme un jet d'eau en rotation.

Pour expliquer leurs données, les astronomes ont supposé que la vitesse d'éjection des poussières dans la spirale est constante, mais les observations à l'aide d'interféromètres plus sensibles devront étayer cette hypothèse.

La découverte de cette structure spirale à l'aide d'une nouvelle technique d'interférométrie préfigure les résultats que l'on obtiendra lorsque des grands télescopes seront reliés pour en faire des interféromètres géants. Les quatre miroirs du VLT, le grand télescope européen en cours de montage au Chili, aura sa carte à jouer dans ce domaine.

Le canard...

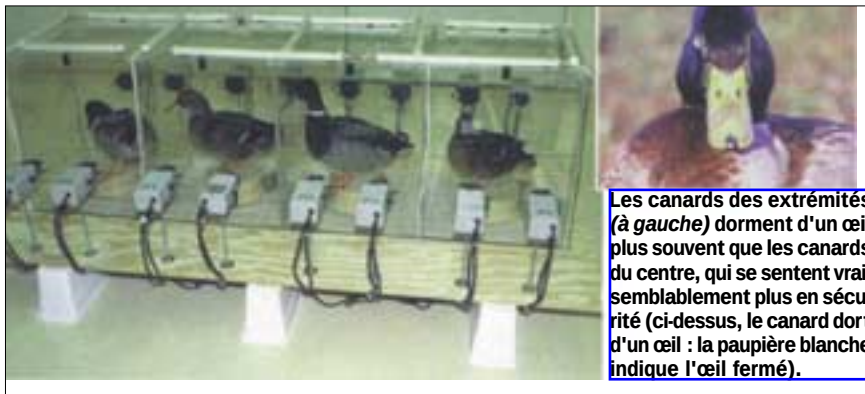
... qui ne dormait que d'un œil.

Les oiseaux, dont on dit que leur cerveau est fort limité, savent pourtant dormir tout en restant éveillés. Si l'on savait déjà que les oiseaux ne dorment que d'un œil, une équipe de l'Université de l'Indiana a montré que, pendant ces périodes de sommeil, certaines zones du cerveau dorment tandis que d'autres veillent.

Cet état de semi-conscience est possible, car un hémisphère s'assoupit, tandis que l'autre reste éveillé et capable de réagir. L'oiseau donne l'impression de cligner de l'œil de façon prolongée : l'œil relié au cerveau éveillé reste ouvert, tandis que l'autre se ferme. Ce comportement est-il aléatoire, le sommeil gagnant au hasard l'hémisphère gauche ou l'hémisphère droit ? On sait que certains mammifères aqua-

tiques – le seul autre groupe qui a ce type de sommeil – conservent un hémisphère éveillé quand ils dorment, ce qui leur permet de continuer à battre une nageoire, et d'éviter ainsi de se noyer. Dormir dans l'eau est une situation exceptionnelle et ne justifie pas la présence de ce comportement chez les oiseaux. En fait les oiseaux ont davantage à craindre des prédateurs que de la noyade.

Les biologistes ont placé quatre canards en ligne. Au centre, chaque canard est entouré de deux voisins et se sent protégé, ce qui n'est pas le cas des canards des extrémités, exposés sur le côté découvert. Effectivement, au cours de l'expérience, ces derniers ont passé deux fois plus de temps en demi-sommeil que les canards du centre. De surcroît, pendant la quasi-totalité de leur phase de sommeil, ils ont gardé ouvert l'œil situé du côté non protégé. Au contraire, les canards du centre fermaient indifféremment l'un ou l'autre des deux yeux.



Les canards des extrémités (à gauche) dorment d'un œil plus souvent que les canards du centre, qui se sentent vraisemblablement plus en sécurité (ci-dessus, le canard dort d'un œil : la paupière blanche indique l'œil fermé).

Dans la suite des expériences, on a projeté aux canards à moitié endormis l'image d'un prédateur qui s'approchait : les canards se réveillaient instantanément, ce qui prouvait que l'œil ouvert était sur le qui-vive. Ainsi, les canards à moitié endormis ont bien un hémisphère cérébral et un œil parfaitement vigilants.

Si le sommeil partiel est si utile pour la détection des prédateurs, pourquoi si peu d'animaux en sont-ils pourvus ? Il semble que ce comportement ancestral se soit perdu, il y a fort longtemps. Les lézards aussi dorment d'un œil, surtout quand ils ont remarqué la présence d'un prédateur, mais ce comportement n'est peut-être pas un sommeil hémisphérique, car les ondes cérébrales des lézards assoupis diffèrent de celles des oiseaux et des mammifères. Toutefois, le fait que les lézards aussi présentent ce comportement indique peut-être qu'un lointain ancêtre commun en était doté.

Les tout premiers mammifères passaient vraisemblablement le plus clair de leur temps à dormir à l'abri au fond de leur terrier et, à l'exception des mammifères marins, ils auraient fini par perdre cette capacité qui, au contraire, s'est développée chez les oiseaux. La capacité n'est sans doute pas totalement perdue, même chez l'homme ainsi, les ondes cérébrales enregistrées chez les personnes ayant subi un grave traumatisme rappellent celles des oiseaux pendant leur demi-sommeil. Une partie ancestrale de leur cerveau maintient peut-être ces personnes traumatisées en état d'alerte par crainte d'un nouveau danger.

Le verlan et la fracture sociale

L'exclusion sociale a sa langue, qui prend le français à rebours.

L'argot a laissé peu de traces écrites : peu d'auteurs l'ont employé, et François Villon, qui composa ses ballades en parlant de la Coquille, langue d'une confrérie de voleurs, a longtemps fait exception. L'apparition de l'argot a toutefois suivi de peu celle du langage lui-même. Compris seulement des initiés, il a d'abord une fonction de codage : il permet la conversation sur des sujets réprouvés par la morale ou par la loi, ou il est associé à la transmission de savoir-faire dans les corporations. Aujourd'hui, il s'est répandu dans les cités, à la périphérie des grandes villes. Selon Jean-Pierre Goudaillier, du Centre de recherches argotologiques de l'Université René Descartes, son usage s'est aussi transformé : parler argot permet avant tout d'affirmer son identité, sociale et géographique. En outre, en utilisant des mots et des constructions grammaticales qui prennent le français à rebours, notamment le verlan, ses locuteurs marquent leur opposition envers une société dont ils se sentent exclus.

choské : *loc. pronom.*, quelque chose
étymologie : verlan approximatif de quelque chose exemples : «tu veux choské? (Mafia Trece, 1997) ; tu veux quelque chose? (avec le sens de qu'est-ce que tu me veux?) ; t'as chosqué à kesmo? (Goudaillier, CARGO 1998) as-tu quelque chose à fumer?

feumeu : *n. f.*, fille, femme
étymologie : reverlanisation de meuf
synonymes : belette, caille, charnelle, clira, dama, damoche, diig, fatma, fébosse, fillasse, gadji, gavali, gazelle, go, gorette, meuda, meuf, og, racli, radasse, rate, rumo, soua, souris, tasse, taspé, taspèche, taupe, zesse, zessgon, zouz
Exemple : «c'te feumeu, c'est ma pref! » (Goudaillier, CARGO 95-96)

D'après Jean-Pierre Goudaillier, Comment tu t'chatches! Dictionnaire du français contemporain des cités, Maisonneuve et Larose, 1998

Le verlan, inversion des phonèmes des mots, est un procédé très utilisé pour la formation de mots nouveaux en français contemporain des cités. Son usage est même parfois redoublé, sur des mots très répandus tel que meuf, verlan de femme, ou fekeu, verlan de keuf, lui-même dérivé de flic (policier).

Les cités d'immeubles construites dans les villes et à leur périphérie, depuis les années 1960 pour la plupart, rassemblent des populations d'origines géographiques et linguistiques très diverses. Elles sont particulièrement touchées par le chômage et la précarité sociale. Depuis une vingtaine d'années, les linguistes observent l'émergence d'une «langue des cités» qui, au français courant, mêle des mots et des expressions d'autres langues, ainsi que des constructions argotiques. Cette langue a remplacé la langue populaire, autrefois parlée par les ouvriers : la plupart des jeunes, n'ayant jamais travaillé, ne ressentent pas d'appartenance à la classe ouvrière, par ailleurs en régression.

La langue des cités utilise largement le verlan, procédé argotique où les phonèmes des mots sont inversés (meuf pour femme, genar pour argent ...). Comme son nom l'indique, le verlan prend la langue à l'envers : ceux qui l'emploient indiquent, consciemment ou non, leur opposition au français académique.

Le verlan n'est pas la seule inversion présente dans ce français des cités. Ainsi, en français, lorsque des mots sont tronqués, c'est le plus souvent par apocope, abandon des dernières syllabes, moins riches en informations sur le sens : auto pour automobile, télé pour télévision, com pour communication... En langue des cités, au contraire, l'aphérèse, troncature des premières syllabes, est très présente : blème remplace problème, dwich, sandwich, vail, travail.

L'usage du verlan s'accompagne aussi du déplacement de l'accent tonique de l'avant-dernière à la première syllabe et de la neutralisation de nombreuses voyelles, remplacées par un son e générique : au contraire du français qui est une langue à voyelles, la langue des cités privilégie les consonnes. Ces deux dernières caractéristiques sont aussi des traits de l'arabe, et la grande proportion d'arabophones dans ces banlieues a sans doute favorisé leur adoption.

Enfin, ce retournement du langage est d'autant plus intense que la cité est séparée du reste de la ville. Ainsi, le verlan est très courant en région parisienne, où la capitale est nettement délimitée par la barrière du périphérique, et où, au sein même des villes de banlieue, les cités sont isolées des quartiers pavillonnaires : le français académique est d'autant plus identifié à la langue des «costard-cravate», ceux qui sont «dans la place» (qui ont un travail.). Il est au contraire rare à Marseille, ville mosaïque où les différentes cités sont autant de quartiers d'une seule grande ville, et où la population est plus homogène.

Le climat variable de Vénus

MARK BULLOCK • DAVID GRINSPOON

APHRODITE TERRA

1. LA SURFACE DE VENUS

a été révélée dans son intégralité par un système radar embarqué à bord de la sonde *Magellan*, avec une précision qui atteint 120 mètres. C'est la vue la plus complète dont nous disposons pour une planète, y compris la Terre, où nous connaissons mal les fonds océaniques. Un vaste système équatorial de hautes plaines et de rides court depuis le relief de type continental Aphrodite Terra (à gauche du centre) jusqu'à Bêta Regio (à droite et au Nord), en passant par le haut plateau brillant Atla Regio (juste à droite du centre). Cette image est centrée à 180 degrés de longitude. Elle a été réalisée à l'aide d'une projection sinusoidale qui, contrairement aux projections cartographiques traditionnelles, telle celle de Mercator, ne déforme pas les aires. Les zones sombres correspondent à un terrain lisse à l'échelle de la longueur d'onde du radar (13 centimètres) ; les aires brillantes sont rugueuses. Les stries Nord/Sud sont des imperfections de l'image.

La cartographie précise de la surface de Vénus et l'analyse de son atmosphère actuelle révèlent que le climat de cette planète a fortement varié depuis un milliard d'années.

La Terre et Vénus sont presque jumelles : de même taille et de même composition, elles se sont formées ensemble, à partir du disque de matière qui entourait le Soleil en formation. Toutefois, aujourd'hui, elles ne se ressemblent pas. À la sur-

face de Vénus, la température est d'environ 460 °C, assez pour que les roches émettent une lueur rouge, à la manière d'un fer chauffé. Un effet de serre très efficace y est dû à l'atmosphère, formée surtout de dioxyde de carbone. Des composés soufrés et un peu de vapeur d'eau qui subsiste de temps anciens alimentent des nuages d'acide sulfurique, autour de la planète. En surface, l'eau liquide n'existe pas, et la pression atmosphérique est près de 100 fois supérieure à celle qui règne à la surface de la Terre.

BETA REGIO

ATLA REGIO

Nous connaissons Vénus grâce à 22 sondes automatiques qui ont photographié, scruté et analysé sa surface, soit quand elles étaient en orbite, soit quand elles y ont atterri. Nous manquons toutefois d'une vue d'ensemble de la surface de Vénus : elle est presque toujours masquée par des nuages opaques aux rayonnements visibles. Nous avons une vision statique de la planète, ignorant si des phénomènes géologiques, tels le volcanisme ou la tectonique des plaques, s'y déroulaient ou non. La carte à haute résolution de toute la surface de la planète, dressée de 1990 à 1994 par la sonde *Magellan*, qui regardait à travers les nuages à l'aide d'un radar, a révélé que des éruptions volcaniques massives se sont produites dans le passé et qu'il s'en produit encore certainement aujourd'hui. Des simulations numériques qui intègrent

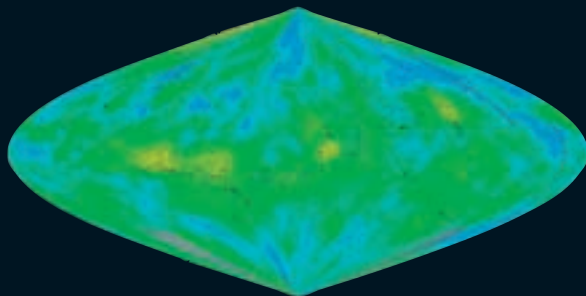
ces informations sur la géologie vénusienne conduisent à des descriptions de l'évolution de cette planète pendant le dernier milliard d'années : un volcanisme intense, notamment, aurait provoqué des changements climatiques de grande ampleur.

Parmi les planètes du Système solaire, Vénus et la Terre sont les seules dont le climat varie et interagit avec l'activité géologique. Mars, autre voisine de la Terre, a aussi connu des changements climatiques importants, mais elle n'évolue plus notablement : son atmosphère actuelle n'est qu'une relique de son passé. L'intérieur de Mars est aujourd'hui trop froid pour que des éruptions volcaniques se produisent, et la surface est profondément gelée. Le climat de Mars ne changerait que si le mouvement de la planète sur son orbite était perturbé.

Comment des mécanismes géologiques semblables à ceux que nous observons sur la Terre ont-ils produit un résultat si différent sur Vénus ? La compréhension de l'évolution climatique d'autres planètes nous éclaire sur les phénomènes qui déterminent le climat sur Terre et nous aidera peut-être à identifier la responsabilité des activités humaines dans les évolutions de celui-ci. En rejetant dans l'atmosphère une quantité croissante de gaz, l'humanité a en effet entrepris involontairement une expérience globale et incontrôlée sur le climat terrestre ; il est peut-être vital de prévoir les résultats de cette opération.

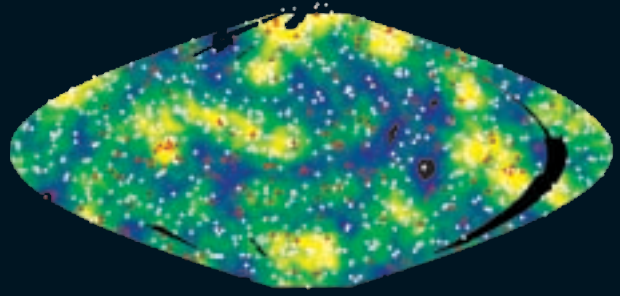
Bien avant que le trou de la couche d'ozone terrestre ne soit connu du public, des astronomes avaient étudié la photochimie de l'atmosphère supérieure de Vénus, et ils avaient

ALTITUDE



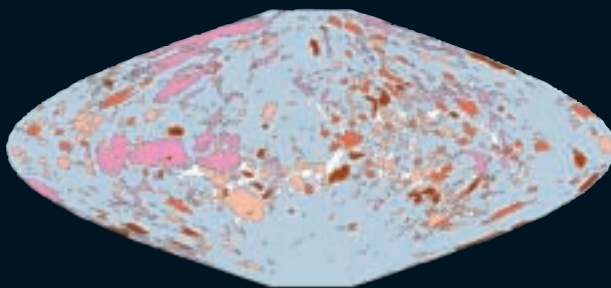
La différence d'altitude entre les points les plus bas de Vénus (en bleu) et les points les plus hauts (en jaune) est d'environ 13 kilomètres. Trois cinquièmes de la surface sont à une altitude inférieure à 500 mètres par rapport à l'altitude moyenne, qui correspond à un rayon planétaire de 6 051,9 kilomètres. Sur la Terre, les altitudes sont concentrées autour de deux valeurs correspondant aux continents et aux fonds océaniques.

CRATÈRES D'IMPACT



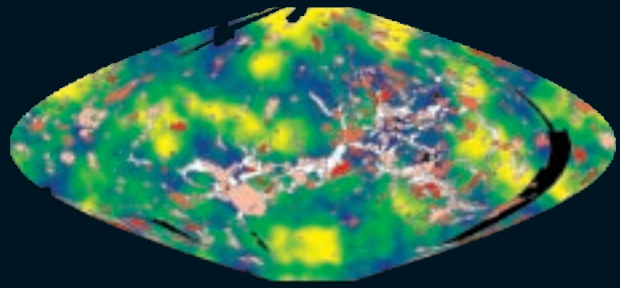
Les cratères dus à des astéroïdes ou à des météorites sont répartis aléatoirement sur toute la planète. La plupart sont intacts (points blancs). Ceux qui ont été modifiés par de la lave (points rouges) ou par des failles (triangles) sont assez groupés. Les régions de faible densité de cratères (fond bleu) se situent plutôt sur des hauts plateaux. Les densités de cratères supérieures (fond jaune) sont généralement dans les basses plaines.

TYPES DE TERRAINS



Le sol de Vénus est surtout composé de plaines volcaniques (en bleu). Dans ces plaines, on trouve des régions déformées, telles les tesseræ (en rose) et les fossés d'effondrement (en blanc), ainsi que des formations volcaniques telles que des coronæ (en pêche), des coulées de lave (en rouge) et des volcans de tailles diverses (en orange). Les volcans ne se concentrent pas en alignement comme sur la Terre, ce qui indique qu'il n'y a pas de tectonique des plaques.

ÂGES DES TERRAINS



Cette carte géologique montre les différents terrains et leurs âges relatifs, déduits de la densité de cratères d'impact. Les volcans et les coronæ sont à peu près groupés le long de fossés d'effondrement équatoriaux, qui sont plus jeunes (en bleu) que le reste de la surface vénusienne. Les tesseræ, les crêtes et les plaines sont plus anciennes (en jaune). Toutefois, la diversité de l'âge des terrains est plus faible que sur la Terre et sur Mars.

découvert que la présence de chlore diminue la proportion d'oxygène libre au-dessus des nuages de la planète. Ce résultat a aidé à comprendre un phénomène analogue sur Terre : dans la stratosphère, le chlore issu des chlorofluorocarbures, utilisés dans des systèmes de réfrigération ou dans des bombes aérosols, détruit l'ozone.

Volcans et plaques mobiles

Le climat de la Terre varie en partie parce que la composition de son atmosphère résulte d'échanges permanents de gaz entre la croûte, le manteau, les océans, les calottes polaires et l'espace extérieur. La source d'énergie fondamentale des processus géologiques intenses, l'énergie géothermique, est produite surtout par la désintégration d'éléments radioactifs dans le noyau ; elle intervient aussi dans l'évolution de l'atmosphère, lorsqu'elle se dissipe par deux mécanismes : le volcanisme et la tectonique des plaques.

Sur la Terre, cette dissipation de l'énergie géothermique est assurée principalement par le mouvement des plaques tectoniques. En outre, lorsque celles-ci plongent dans les profondeurs du manteau, elles recyclent les gaz libérés par les volcans dans l'atmosphère, ce qui stabilise le climat terrestre (*voir l'encadré de la page 41*). Cette stabilité n'est toutefois pas absolue. Ainsi, lors des éruptions volcaniques massives qui ont produit les immenses provinces volcaniques du Globe (des régions couvertes de basaltes probablement issus d'énormes panaches de magma au sein du manteau), l'émission rapide de grandes quantités de gaz dans l'atmosphère a peut-être perturbé temporairement le climat global, qui se serait réchauffé.

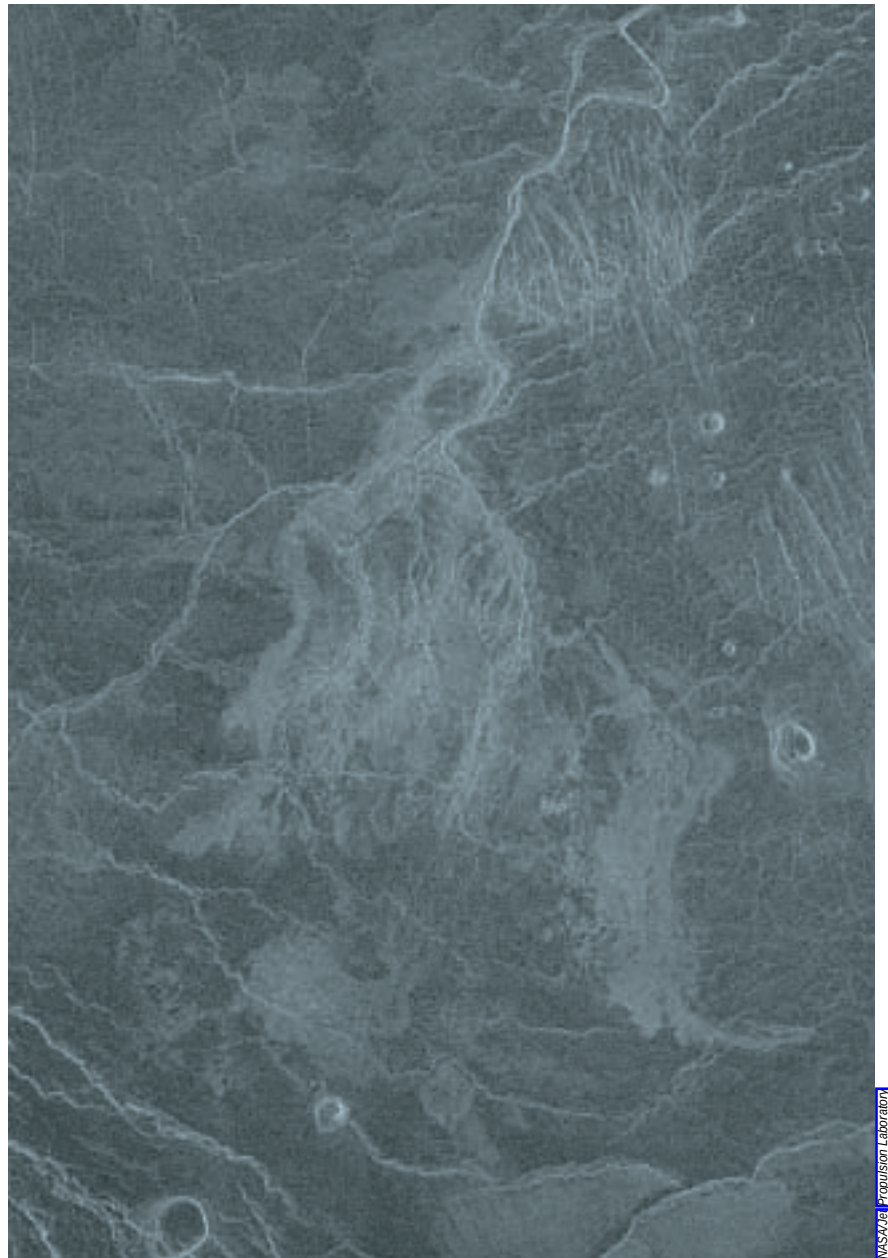
Et sur Vénus ? La surface photographiée par la mission *Magellan* ne semble pas perturbée par une tectonique des plaques, sauf peut-être ponctuellement : au moins dans un passé récent, l'énergie géothermique a été dissipée par l'éruption de grandes quantités de lave basaltique qui ont formé de vastes plaines et, plus tard, par les volcans qui se sont construits dessus.

Peut-on dater ces événements volcaniques ? Comme on ne peut pas analyser de roches pour dater leur formation, on compte les cratères d'impact météoritiques : les observations du nombre d'astéroïdes et de comètes dans le Système solaire interne, ainsi

que le décompte des cratères sur la Lune (dont on a daté directement les roches), permettent de calculer la fréquence des collisions. La surface de Vénus porte peu de cratères d'impact : on n'en dénombre que 963 sur la carte dressée par *Magellan*. L'atmosphère épaisse arrête la plupart des projectiles de diamètre inférieur à un kilomètre, qui creuseraient des cratères jusqu'à 15 kilomètres de diamètre, mais les calculs indiquent qu'environ 1,2 cratère par million d'années devrait apparaître sur Vénus. Les impacts des 3,7 premiers

milliards d'années de l'histoire de la planète ont donc été effacés.

Sur la Terre, les cratères d'impact sont effacés par l'érosion : on observe des états d'altération variés, de la cuvette presque intacte du Meteor Crater, en Arizona, aux contours à peine discernables des impacts de plus de 600 millions d'années enfouis dans la croûte continentale la plus ancienne. Toutefois, la surface de Vénus est bien trop chaude pour que de l'eau y coule, et les vents de surface sont aujourd'hui peu puissants : les cratères ne sont donc pas



2. UNE RIVIÈRE SUR VÉNUS ? Ce delta est à l'extrémité d'un chenal étroit qui court sur 800 kilomètres à travers les plaines volcaniques septentrionales. Il n'a pas été creusé par l'eau : Vénus est trop chaude et trop sèche. C'est peut-être l'œuvre de laves riches en sels carbonatés et sulfatés, qui auraient coulé alors que la température moyenne était supérieure de plusieurs dizaines de degrés à celle d'aujourd'hui. La région représentée a 40 kilomètres de large et 90 kilomètres de long.

altérés ni effacés par l'érosion, mais par les activités volcanique et tectonique.

La plupart des cratères vénusiens semblent récents : les bords de six pour cent d'entre eux seulement sont partiellement recouverts par des coulées de lave, et seulement douze pour cent ont été déformés par un plissement ou par une cassure de la croûte. Où sont donc les cratères plus anciens ? S'ils ont été recouverts par de la lave, pourquoi ne voyons-nous pas plus de cratères partiellement comblés ? Et quel mécanisme les a effacés en préservant la répartition aléatoire et régulière de ceux qui restent ?

Un événement géologique a-t-il brusquement effacé tous les vieux cratères il y a environ 800 millions d'années ? Les cratères que nous observons

se seraient alors formés sur cette surface neuve. On ne connaît toutefois pas, sur Terre, de phénomène géologique qui aurait remodelé l'intégralité de la surface de la planète.

Selon un autre modèle, appelé « renouvellement progressif de la surface », des processus géologiques constants effaceraient en permanence de petits groupes de cratères, préservant une distribution globale qui paraît aléatoire. Toutefois, certaines formations géologiques sur Vénus sont très étendues, et l'activité géologique ne gommerait donc pas les cratères de façon aussi efficace partout sur la planète. La réalité est probablement entre ces deux modèles. La plupart des planétologues pensent aujourd'hui qu'un volcanisme global a effacé la plupart des cratères

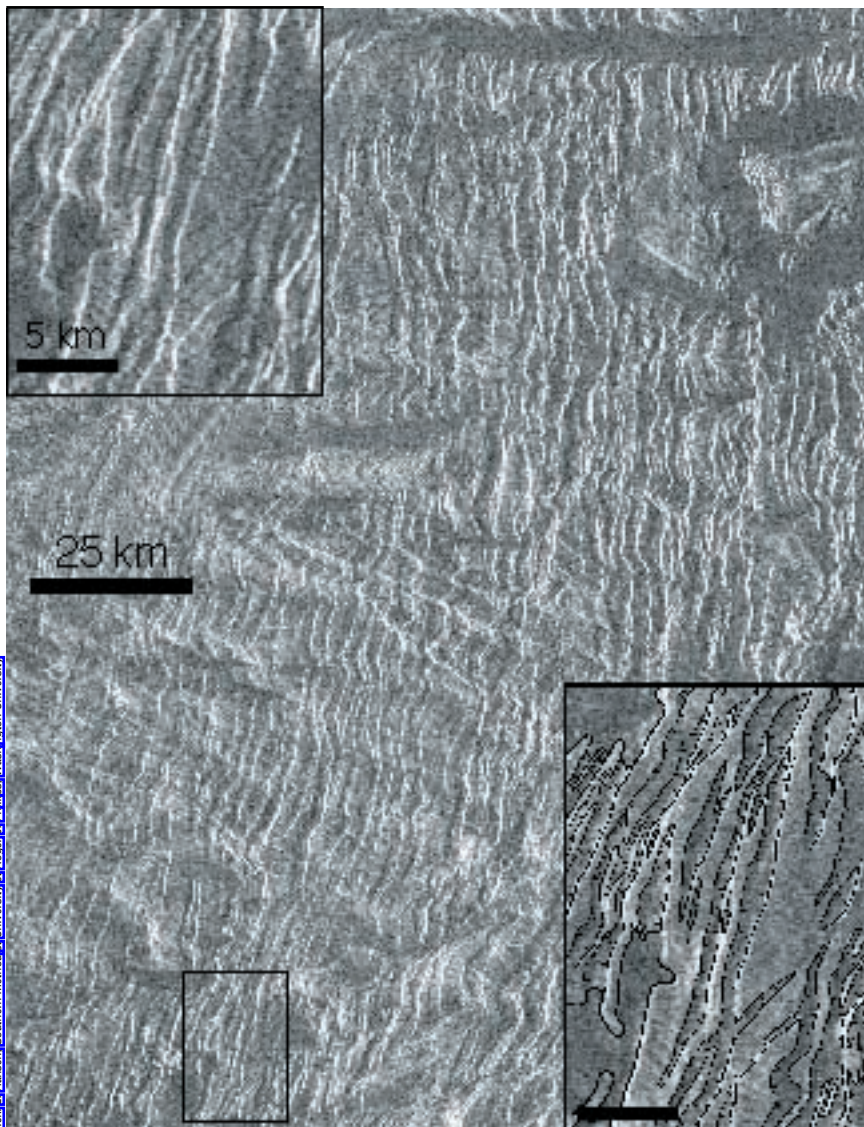
d'impact et a créé les vastes plaines volcaniques il y a 800 millions d'années ; depuis, une faible activité volcanique persisterait.

Des écoulements sans eau

Toutefois, certaines formations géologiques ne semblent pas résulter du volcanisme, mais de profondes variations du climat de Vénus. D'abord, des lignes, dont certaines atteignent jusqu'à 7 000 kilomètres de long, ressemblent aux rivières sinueuses et aux plaines alluviales terrestres. Beaucoup de ces lignes aboutissent à des chenaux d'écoulement semblables à des deltas fluviaux.

L'extrême sécheresse qui règne sur Vénus rend peu probable une érosion par l'eau. En revanche, la surface, en équilibre avec une atmosphère pesante de dioxyde de carbone et de composés soufrés, est vraisemblablement riche en carbonate et en sulfate de calcium : les sondes soviétiques *Vénéra* ont mesuré de sept à dix pour cent de sels de calcium (presque certainement des carbonates) et de un à cinq pour cent de sulfates dans les roches superficielles. Or, les laves riches en composés de ce type fondent à des températures supérieures de quelques dizaines à quelques centaines de degrés aux températures vénusiennes actuelles. De vastes réservoirs de carbonate de calcium et de sodium fondus, analogues aux nappes aquifères terrestres, pourraient exister à quelques centaines de mètres ou à quelques kilomètres sous la surface, et des températures de surface un peu plus élevées dans le passé auraient conduit à l'épanchement de ces laves en surface, où leur écoulement aurait sculpté les reliefs que nous voyons aujourd'hui.

Les *tesserae*, terrains les plus anciens de Vénus, devraient aussi leur aspect actuel à des augmentations de température dans le passé. Ces paysages très ridés sont sur des plateaux comparables aux continents terrestres, à plusieurs kilomètres au-dessus des basses plaines de lave. Ils se seraient formés par extension de la lithosphère (la croûte et le manteau supérieur) : c'est comme si l'on avait étiré du chocolat chauffé au bain-marie, chaud et mou au-dessous, plus froid et cassant au-dessus. Aujourd'hui, la partie externe, cassante, de la lithosphère est trop épaisse pour se casser de cette manière, mais, à l'époque de la formation des *tesserae*, elle devait être plus mince, et donc la surface était un peu



3. UN TERRAIN RUBANÉ est composé de dépressions peu profondes (400 mètres) à fond plat et à flancs escarpés. Ces formations peuvent résulter de la fracture d'une couche de roches mince et cassante, au-dessus d'un substrat ductile. Les cartouches présentent un agrandissement de la région encadrée, avec les dépressions indiquées en bas à droite.

plus chaude (comme pour le chocolat, l'épaisseur de la couche externe dépend de sa température).

Enfin, des failles et des plis qui balafrent la planète se seraient aussi formés lors de variations climatiques, en particulier les plis en forme de rides. Toute la lithosphère de la surface de Vénus semble avoir été étirée ou comprimée en même temps. Il est difficile de concevoir un mécanisme interne à la planète qui produise de tels reliefs. En revanche, C. Solomon, de l'Institut Carnegie de Washington, a calculé que des variations de la température de 100 °C, à la surface de la planète, auraient engendré des tensions dans la lithosphère atteignant 100 millions de pascals, proches de celles qui créent les chaînes de montagnes sur la Terre et suffisantes pour produire les déformations que nous observons.

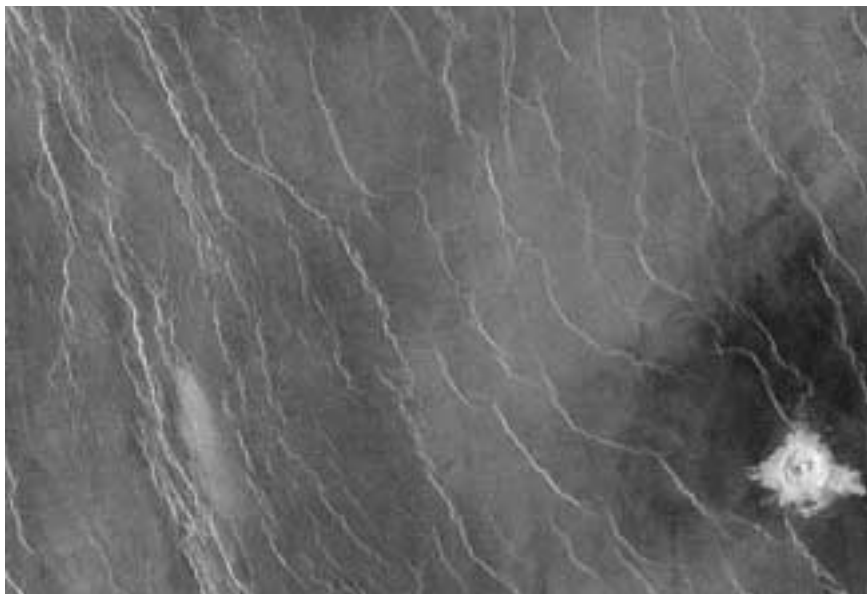
Une serre efficace

Parallèlement à ces recherches géologiques, nous avons modélisé l'atmosphère de Vénus : la température élevée est maintenue par les propriétés complémentaires des constituants de l'atmosphère vénusienne. La vapeur d'eau, même en faible quantité, absorbe le rayonnement infrarouge à des longueurs d'onde où le dioxyde de carbone est transparent, et le dioxyde de soufre et d'autres composés soufrés absorbent à d'autres longueurs d'onde infrarouges encore (voir l'encadré de la page 40). Tous ces gaz à effet de serre rendent l'atmosphère de Vénus partiellement transparente au rayonnement solaire incident, mais presque totalement opaque au rayonnement thermique réémis par le sol. Par conséquent, la température de surface (mesurée en kelvins) est trois fois supérieure à ce qu'elle serait sans atmosphère. Sur la Terre, l'effet de serre n'accroît aujourd'hui la température de surface que de 15 pour cent.

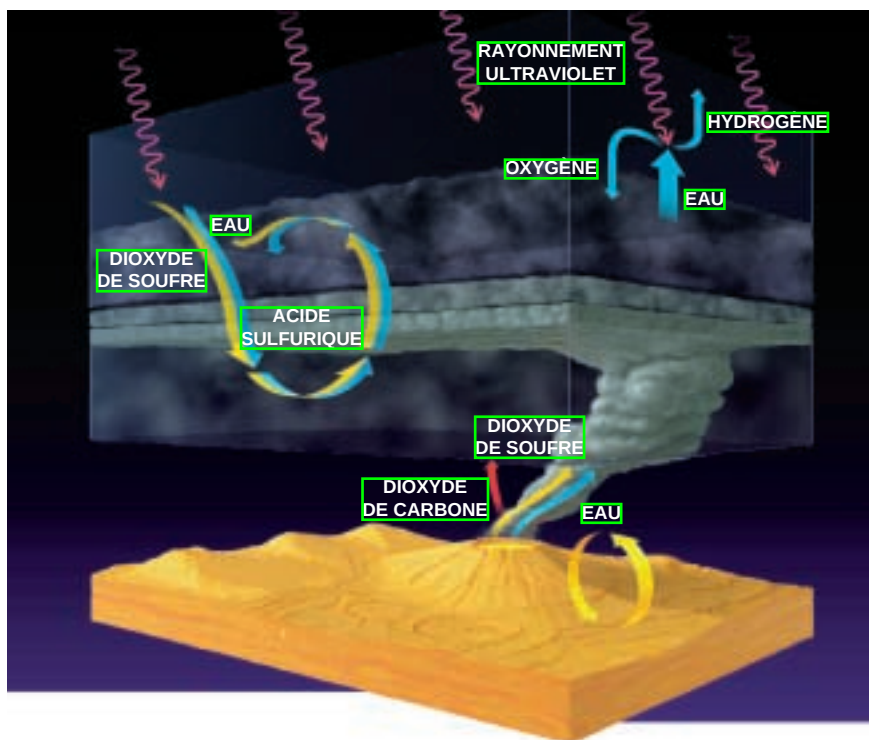
Si le volcanisme a remodelé la surface vénusienne il y a 800 millions d'années, il a aussi injecté rapidement beaucoup de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. On estime que la lave émise pendant ces éruptions aurait formé une couche de un à dix kilomètres d'épaisseur autour de la planète : la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère aurait peu augmenté, malgré la libération d'une grande quantité de ce composé, parce

qu'elle était déjà très grande. Au contraire, les concentrations en vapeur d'eau et en dioxyde de soufre auraient été respectivement multipliées par 10 et par 100. Le climat vénusien aurait évolué en raison de

plusieurs phénomènes qui interagissent : le dégazage volcanique, la formation de nuages, la perte d'hydrogène au sommet de l'atmosphère et les réactions des gaz atmosphériques avec les minéraux de surface.



4. LES RIDES PLISSÉES sont les structures les plus fréquentes des plaines volcaniques de Vénus. Parallèles et équidistantes, elles se sont probablement formées quand les plaines ont subi une contrainte, en raison d'une variation importante et rapide de la température de surface. Cette région, qui fait partie des plaines équatoriales Rusalka Planitia, mesure approximativement 300 kilomètres de côté.



5. L'ATMOSPHÈRE DE VENUS est à une température de plusieurs centaines de degrés Celsius ; sa pression est élevée, et elle est chargée de nuages composés d'acide sulfurique, parce que Vénus ne possède pas les cycles qui stabilisent le climat terrestre. Le dioxyde de carbone rejeté par les volcans reste dans l'atmosphère ; l'eau, dissociée en oxygène et en hydrogène par les ultraviolets solaires, est à jamais perdue dans l'espace ; le dioxyde de soufre, jadis piégé dans les minéraux, s'accumule en surface.

Les interactions de ces phénomènes empêchent la détermination de leurs conséquences individuelles sur le climat. Ainsi, l'augmentation des concentrations en vapeur d'eau et en dioxyde de soufre a des conséquences contradictoires : d'un côté, la vapeur d'eau et le dioxyde de soufre réchauffent la surface par effet de serre et, d'un autre côté, la vapeur d'eau et le dioxyde de soufre forment des nuages qui réfléchissent la lumière solaire vers l'espace et refroidissent ainsi la planète.

Nos simulations montrent que la réflexion du rayonnement solaire par les nuages l'a d'abord emporté : la température de surface a diminué

d'environ 100 °C. Puis les nuages ont lentement disparu : l'eau a diffusé vers les hautes couches de l'atmosphère, où elle a été dissociée par le rayonnement ultraviolet solaire. L'hydrogène produit par cette dissociation s'est lentement échappé dans l'espace : la moitié de la quantité initialement présente a été perdue en 200 millions d'années. Entre-temps, le dioxyde de soufre réagissait avec les roches carbonatées. Des expériences de laboratoire démontrent que la vitesse de réaction du dioxyde de soufre de l'atmosphère vénusienne avec les carbonates a été bien supérieure à la vitesse de dégazage de l'eau dans l'espace.

L'évaporation favorise l'évaporation

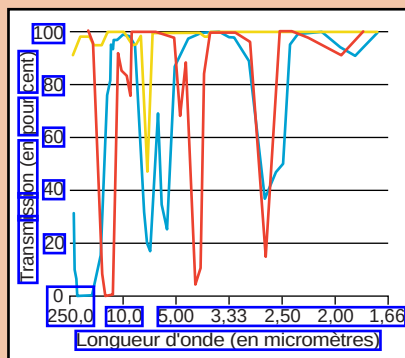
Quand les nuages se sont amincis, la surface a reçu plus d'énergie solaire et s'est réchauffée. Après 200 millions d'années de réchauffement, la base des nuages a commencé à s'évaporer. Une rétroaction positive s'est établie : plus les nuages s'amincissaient, moins le rayonnement solaire était réfléchi vers l'espace, donc plus la surface s'échauffait, et plus les nuages s'amincissaient. Les nuages ont ainsi rapidement disparu.

Pendant environ 400 millions d'années, seule une haute bande vaporeuse essentiellement composée d'eau a subsisté. Les températures de surface ont augmenté jusqu'à 100 °C au-dessus de leurs valeurs actuelles, d'une part à cause de l'effet de serre dû à la vapeur d'eau atmosphérique et d'autre part à cause du faible filtrage du rayonnement solaire par les nuages. Si toute activité volcanique avait cessé, les nuages se seraient complètement dissipés environ 600 millions d'années après le début du volcanisme global.

Or, des nuages subsistent aujourd'hui autour de Vénus. Nous avons calculé qu'une activité volcanique a dû se poursuivre pendant les 30 derniers millions d'années pour alimenter ces nuages. Comme les mécanismes internes qui engendrent le volcanisme se déroulent sur des périodes dépassant plusieurs dizaines de millions d'années, des volcans sont probablement encore actifs aujourd'hui. Cette hypothèse est soutenue par les mesures de la concentration en dioxyde de soufre au sommet des nuages de Vénus : elle a été divisée par plus de dix pendant les cinq premières années de la mission *Pioneer Venus*, de 1978 à 1983. Ces variations, et celles de la concentration en aérosols, résulteraient du volcanisme. Les fluctuations des températures de surface, accélérées par le volcanisme, expliquent aussi la formation naturelle des nombreuses structures géologiques découvertes par *Magellan*.

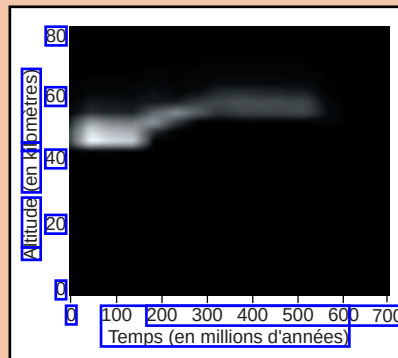
Heureusement, le climat terrestre n'a pas subi de telles variations dans un passé récent. Bien que l'atmosphère terrestre soit aussi perturbée par le volcanisme, elle est riche en oxygène (produit par l'activité biologique et par l'eau), de sorte qu'elle élimine les gaz soufrés. Les nuages d'eau assurent l'équilibre thermique de notre planète. La vapeur d'eau qui les compose résulte

EFFET DE SERRE



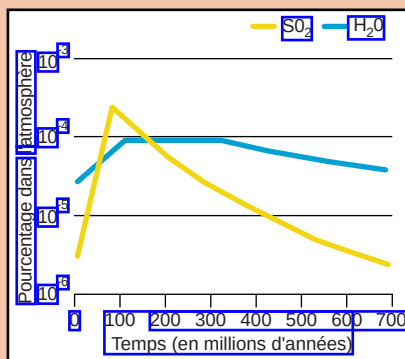
Les gaz à effet de serre laissent la lumière solaire atteindre la surface de Vénus, mais ils bloquent le rayonnement infrarouge réémis par le sol. Le dioxyde de carbone (en rouge), l'eau (en bleu) et le dioxyde de soufre (en jaune) absorbent chacun à des longueurs d'onde différentes. Si ces gaz étaient absents, la température moyenne serait d'environ 30 °C.

COUVERTURE NUAGEUSE



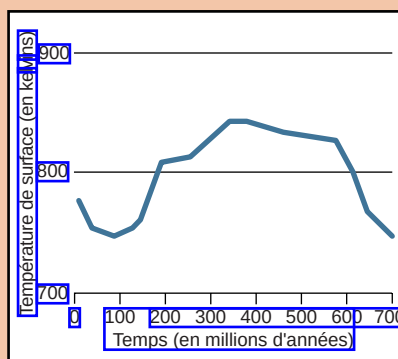
L'épaisseur des nuages, composés d'acide sulfurique, varie après les éruptions volcaniques. D'abord, quand l'eau et le dioxyde de soufre se répandent dans l'air, les nuages s'épaississent. Puis ils se dissipent. Environ 400 millions d'années après le début d'un épisode volcanique global, les nuages acides sont remplacés par de minces nuages d'eau, à haute altitude.

LES GAZ DE L'ATMOSPHERE



L'eau et le dioxyde de soufre s'éliminent de l'atmosphère après avoir été émis par les volcans. Le dioxyde de soufre (en jaune) réagit assez vite avec les carbonates de la surface, tandis que l'eau (en bleu) diffuse vers les couches de haute altitude où elle est lentement dissociée par le rayonnement ultraviolet solaire.

TEMPERATURE



La température de surface dépend de l'importance relative des nuages et de l'effet de serre. Initialement, le volcanisme produit des nuages épais qui refroidissent la surface. Toutefois, comme l'eau disparaît plus lentement de l'atmosphère de la planète que le dioxyde de soufre, la surface est réchauffée par effet de serre.

Pourquoi Vénus est-elle un chaudron infernal?

Les différences frappantes entre les climats actuels de la Terre et de Vénus sont liées à l'histoire de l'eau sur ces deux planètes. Les océans et l'atmosphère terrestres contiennent aujourd'hui 100 000 fois plus d'eau que l'atmosphère de Vénus. L'eau liquide est un intermédiaire dans les réactions du dioxyde de carbone avec les roches de surface : le dioxyde de carbone de l'air terrestre peut ainsi réagir avec le sol et former des minéraux. En outre, l'eau mélangée au manteau sous-jacent est probablement à l'origine de la faible viscosité de la couche sur laquelle glissent les plaques tectoniques terrestres (asthénosphère). La formation de calcaires et leur enfouissement dans le manteau avec les plaques tectoniques évitent l'accumulation excessive de dioxyde de carbone.

Pourtant, selon les modèles de formation des planètes, les quantités d'eau apportées sur les deux planètes par l'impact de corps glacés issus du Système solaire externe devaient être proches. En outre, la sonde *Pioneer Venus*, qui s'est placée en orbite en 1978, a mesuré que l'abondance relative du deutérium (une forme d'hydrogène dont le noyau est composé d'un proton et d'un neutron) et de l'hydrogène (le noyau est réduit à un proton) dans l'eau des nuages vénusiens est 150 fois supérieure à l'abondance terrestre : quand la vapeur d'eau a été dissociée dans l'atmosphère supérieure par le rayonnement ultraviolet solaire, l'hydrogène, plus léger, est parti plus vite vers l'espace que le deutérium, et l'abondance relative du deutérium a augmenté.

Pourquoi ce phénomène s'est-il produit sur Vénus, mais pas sur la Terre ? Si une planète reçoit assez d'énergie solaire, toute l'eau superficielle s'évapore rapidement : l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau dans l'atmosphère déclenche un effet de serre, qui s'emballé, et la majeure partie de l'eau de la planète part dans l'atmosphère supérieure, où elle se dissocie et s'échappe. Selon James Kasting et ses collègues de l'Université de Pennsylvanie, le flux solaire critique nécessaire pour déclencher un effet de serre

qui s'emballé est supérieur d'environ 40 pour cent au flux que reçoit aujourd'hui la Terre. Cette valeur correspond à peu près au flux solaire que recevait Vénus peu après sa formation, quand le Soleil était 30 pour cent moins brillant qu'aujourd'hui. Vénus aurait ainsi perdu l'équivalent d'un océan terrestre pendant les 30 premiers millions d'années de son existence.

Cette description est imparfaite, car si Vénus possédait au début une épaisse atmosphère de dioxyde de carbone, comme c'est le cas maintenant, elle aurait retenu la plupart de son eau. La quantité d'eau perdue dépend de la proportion qui peut monter assez haut pour être décomposée, et cette proportion est inférieure pour une planète qui possède une atmosphère épaisse. En outre, tous les nuages qui se seraient développés au cours du processus auraient renvoyé la lumière solaire vers l'espace et auraient arrêté l'effet de serre.

Selon l'équipe de J. Kasting, si le flux solaire a été un peu inférieur à la valeur critique, Vénus a eu des océans chauds et une stratosphère humide. La dissolution du dioxyde de carbone dans l'océan a maintenu la concentration atmosphérique en ce composé à de faibles valeurs. L'eau a abaissé la viscosité de l'asthénosphère, ce qui a permis une tectonique des plaques. Vénus aurait ainsi possédé des mécanismes stabilisateurs du climat semblables à ceux qui sont actifs sur la Terre aujourd'hui. Ils n'étaient toutefois pas à l'abri de dérèglements : la densité de l'atmosphère, plus faible, n'empêchait pas la diffusion d'eau à haute altitude. En 600 millions d'années, l'équivalent d'un océan aurait ainsi disparu. La tectonique des plaques se serait arrêtée, laissant le volcanisme et la conduction de chaleur comme moyens internes de refroidissement. Ensuite, le dioxyde de carbone s'est accumulé dans l'air.

Ce scénario de serre humide illustre l'interaction étroite du Soleil, du climat et des modifications géologiques. Les phénomènes atmosphériques et superficiels peuvent se renforcer mutuellement et préserver le *statu quo*, ou bien précipiter leur propre destruction.

de l'évaporation des océans, qui dépend elle-même de la température de surface. Un petit accroissement de l'effet de serre accroît l'évaporation de l'eau, ce qui augmente la couverture nuageuse, donc la réflexion du rayonnement solaire, et ce qui diminue la température. Cette rétroaction négative maintient à brève échéance (quelques jours à quelques années) une température de surface modérée. Une rétroaction analogue, le cycle carbonate-silicate, stabilise la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique : en présence d'eau, le calcium des silicates est associé au dioxyde de carbone et forme du calcaire ; si la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone augmente, cette réaction augmente aussi, ce qui piège le dioxyde de carbone. Ce mécanisme, gouverné aussi par la lente tectonique des plaques, opère sur des échelles de temps d'environ un demi-million d'années.

Si ces cycles, associés à la présence de l'eau et de la vie, ont stabilisé le climat de la Terre, les actions humaines

ont des conséquences à des échelles de temps intermédiaires : la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmenté d'un quart depuis 1860. La plupart des climatologues reconnaissent qu'un réchauffement global est en cours, mais ils ne s'accordent pas sur la part de ce réchauffement attribuable à l'homme. Existe-t-il une concentration critique en dioxyde de carbone qui perturberait les cycles de régulation du climat terrestre ? L'étude de Vénus nous apprend en tout

cas que les climats des planètes analogues à la Terre peuvent varier brusquement par l'interaction de phénomènes à l'échelle planétaire. Dans l'avenir, les variations du rayonnement solaire interviendront aussi : en vieillissant, le Soleil devient plus brillant. Dans un milliard d'années environ, les océans s'évaporeront et l'effet de serre augmentera. La Terre et Vénus, presque identiques à leur naissance, se ressembleront à nouveau, avant de mourir ensemble.

Mark BULLOCK et David GRINSPOON sont chercheurs à l'Université de Boulder.

Stephen SAUNDERS, *La surface de Vénus*, in *Pour la Science*, février 1991.

Janet LUHMANN, James POLLACK et Lawrence COLIN, *La mission Pioneer vers Vénus*, in *Pour la Science*, juin 1994.

Mark A. BULLOCK et David H. GRINSPOON, *The Stability of Climate on Venus*, in *Journal of Geophysical Research*, vol. 101, n° E3, pp. 7521-7530, mars 1996.

Venus II : Geology, Geophysics, Atmosphere and Solar Wind Environment, sous la direction de Stephen W. Bougher, Donald M. Hunten et Roger J. Phillips, University of Arizona Press, 1997.

David H. GRINSPOON, *Venus Revealed : A New Look below the Clouds of Our Mysterious Twin Planet*, Perseus Books, 1997.

The New Solar System, quatrième édition, sous la direction de J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Petersen et Andrew Chalkin, Cambridge University Press, 1998.

L'argent de l'ancien Pérou

ALAIN GIODA • CARLOS SERRANO

Entre 1590 et 1600, Potosi produisit plus de 40 pour cent de l'argent mondial ! Un réseau de réservoirs et d'adduction d'eau, construit par les Espagnols, fournissait l'énergie hydraulique nécessaire au traitement du minerai d'argent.

Le Pérou a été l'eldorado, le pays de légende que cherchaient les conquistadors : les colonisateurs y faisaient fortune en quelques semaines. Au début de l'exploitation du gisement de Potosi, en 1545, les filons d'argent pur affleuraient au sommet du Cerro Rico, la montagne d'argent, et les nobles espagnols n'avaient qu'à se baisser pour s'enrichir. Bien évidemment, ils laissaient aux Indiens le soin de collecter et de transporter le minerai.

En moins de 30 ans, le petit chantier andin de Potosi se transforme en une ville-champignon de 120 000 habitants ; la population culmine à 160 000 personnes entre 1611 et 1650. C'est alors la plus grande cité des Amériques, qui rivalise en taille et en opulence avec les capitales européennes. La production d'argent atteint 200 tonnes pendant la seule année 1593 ; la monnaie d'argent espagnole, frappée sur place, est, pendant deux siècles, l'équivalent du dollar américain actuel pour les transactions commerciales de l'Occident.

Aujourd'hui Potosi compte environ 130 000 habitants. Bâtie à 3 980 mètres d'altitude sur les flancs du Cerro Rico (4 890 mètres), le climat y est froid et aride avec 142 jours de gel, une température moyenne de 9 °C et 400 millimètres de pluie seulement par an. Cet héritage de la colonisation espagnole est classé patrimoine de l'humanité par l'Unesco.

En étudiant les archives des colons espagnols et des administrateurs locaux, nous avons reconstitué la grandeur et la décadence des mines de Potosi, à travers les adaptations de l'extraction aux aléas climatiques et économiques,

à la raréfaction du minerai et aux changements d'organisation sociale.

De 1573 à 1650, trois facteurs assurent l'âge d'or, ou plutôt l'âge d'argent, de Potosi : l'utilisation d'un procédé de traitement de l'argent, mis au point en 1555 au Mexique, le régime de travaux forcés imposés aux Indiens (et qui ne fut aboli qu'en 1812), et une énergie hydraulique abondante utilisée jusqu'en 1872, date de l'arrivée de l'électricité et de la vapeur qui alimenteront les usines.

Épuisement du minerai et construction des barrages

Pendant les onze années glorieuses qui suivent la découverte des mines, le minerai d'argent est extrait à ciel ouvert des filons d'argent natif, cinq veines de 10 à 12 mètres d'épaisseur, qui affleurent au sommet de la montagne. Lorsque, en 1556, les filons du sommet s'épuisent, l'exploitation par galeries souterraines commence. Jusque vers 1650, les galeries seront creusées sur 600 mètres de profondeur, sans l'aide d'explosifs. À la fin du XIX^e siècle, plus de 300 entrées de mines sont connues.

Vers 1566, à la fin du premier boum minier, la production commence à baisser. Le vice-roi Francisco Toledo, administrateur des Indes espagnoles de 1569 à 1581, se rend à Potosi en 1572. Il y réunit un groupe de mineurs pour présenter une nouvelle méthode d'extraction de l'argent dans les filons moins riches, méthode qui nécessitait la construction de machines hydrauliques. Quatre entrepreneurs proposent alors de construire, à leurs

frais, une retenue d'eau pour récupérer l'eau de pluie et la stocker (la saison des précipitations ne dure que trois mois, de décembre à février).

Le projet est de tirer parti de la topographie de la région et de réunir tous les lacs naturels en un vaste réseau pour alimenter les usines de traitement du minerai. La construction des barrages commence en 1573 avec celui du lac Chalviri. Cinquante ans plus tard, une vingtaine de lacs aménagés recueillent un volume total de six millions de mètres cubes d'eau. Réparties sur six bassins versants qui couvrent 65 kilomètres carrés, les retenues sont interconnectées pour collecter la totalité des eaux dans un exutoire naturel d'environ 20 kilomètres carrés qui recueille l'écoulement intermittent des vallons de San Ildefonso et de San Sebastian. L'alimentation régulière en énergie hydraulique assure l'apogée des mines coloniales de Potosi, entre 1573 et 1650 : c'est le deuxième boum minier.

À cette époque, les ingénieurs espagnols tirent profit de deux types de lacs naturels : les lacs glaciaires et les retenues d'eau bloquées par une accumulation de moraines. Quand l'écoulement de l'eau est bloqué par un verrou glaciaire, les Espagnols libèrent l'eau du lac naturel en perçant un tunnel dans la barre rocheuse qui ferme la vallée. Les digues naturelles constituées de moraines, plus ou moins étanches selon le degré d'érosion, sont renforcées. Les Espagnols construisent ainsi de grands barrages sur les lacs Huacani et Chalviri, puis, vers 1576, d'autres retenues proches de Potosi, telles celles de San Sebastian et de San Ildefonso. Les grands

travaux d'aménagement des barrages sont achevés en 1621.

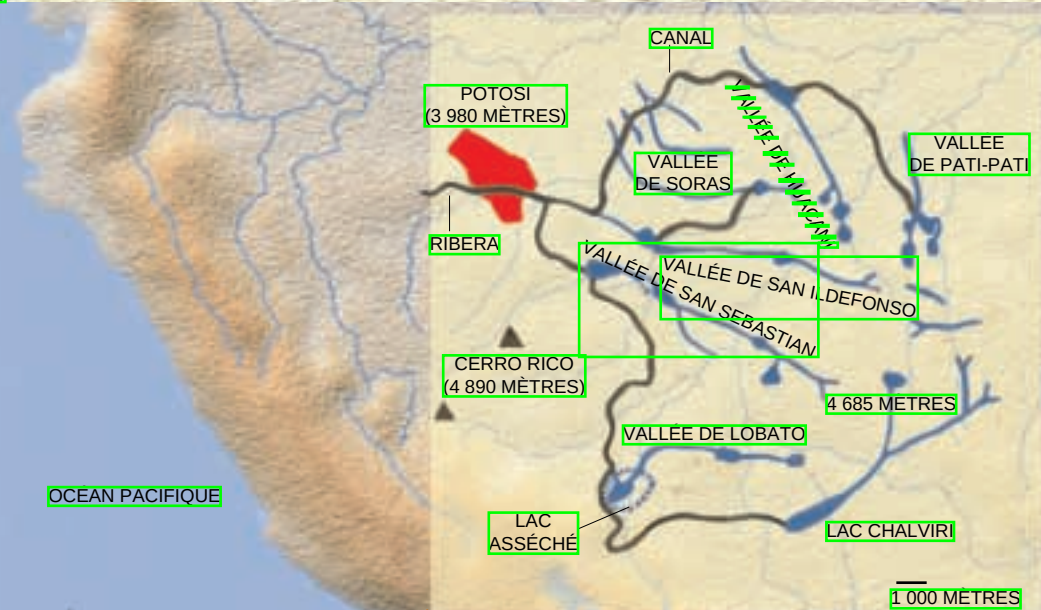
Pendant cette période, la production d'argent augmente proportionnellement au débit d'eau utilisable, jusqu'à ce que l'appauvrissement du minerai diminue fortement la rentabilité et impose la construction de nouveaux réservoirs pour traiter de plus grandes quantités de minerai. Hélas, en dépit des efforts des ingénieurs, la production d'argent sous la colonie ne retrouvera jamais son activité du début du XVII^e siècle.

Avant la construction des réservoirs, les usines sont installées à une dizaine de kilomètres de Potosi, sur la rivière Cayara. Pour éviter de trop longs transports de minerai, les Espagnols construisent des barrages plus près de la ville et creusent le canal collecteur de la Ribera de la Vera Cruz, qui traverse Potosi en suivant le lit d'un cours d'eau intermittent. Les travaux du canal de la Ribera, commencés en décembre 1574, mobilisent 200 officiers espagnols et 4 000 manœuvres indiens. La Ribera est inaugurée en mars 1577, six mois après l'achèvement des premiers réservoirs. Son débit moyen est de l'ordre de 160, voire 250 litres par seconde.

Les barrages, d'environ 200 mètres de longueur et de huit mètres d'épaisseur, sont construits dans des défilés proches de la ville, où les eaux se rassemblent. Les grands lacs de barrage mesurent plus de un kilomètre de circonférence et sont profonds de près de cinq mètres en leur centre. Sous la colonie, la quasi-totalité des eaux des barrages se jettent dans le lac San Sebastian par un système de petits canaux et de cascades. Puis l'eau atteint la Ribera où sont déployées la plupart des usines (sur une quinzaine de kilomètres le long des rives). Au début du XVII^e siècle, l'eau du



Carlos Serrano



1. LES FILONS D'ARGENT MASSIF affleuraient au sommet (4 890 mètres) de la montagne d'argent, le Cerro Rico (à l'arrière-plan, sur la photographie du haut). Pour traiter des quantités plus importantes d'un minerai qui s'appauvissait, les colons espagnols ont conçu un système de réservoirs (en bleu dans le cartouche clair) collectant les eaux venant de la montagne, lesquelles se rassemblaient dans la Ribera. Ce canal traversait la ville de Potosi ; les usines de traitement du minerai, alimentées par l'énergie hydraulique, étaient alignées le long du canal. Cinq périodes de forte production ont marqué l'exploitation des mines d'argent de Potosi : juste après la découverte des mines en 1545, entre 1573 et 1650, entre 1750 et 1800, entre 1840 et 1850 (plutôt une reprise d'activité qu'un véritable boom), entre 1872 et 1895. La production annuelle d'argent a dépassé 200 tonnes vers 1600.



lac San Ildefonso et de quelques sources alimente les 286 fontaines de la ville.

Quand les pluies sont abondantes au cours de la saison humide, les réserves en eau suffisent à l'alimentation des usines de purification du métal pendant six ou sept mois. Nous tenons ces informations de Luis Capoché, un Espagnol natif de Séville et propriétaire de deux usines hydrauliques. En 1583, dans un texte dédié au vice-roi des Indes Torrès y Portugal, il décrit les difficultés de l'exploitation de l'argent et l'installation d'une cinquantaine d'usines hydrauliques le long de la Ribera. Les machines qui concassent les blocs de minerai sont mues par l'énergie des hommes et des chevaux, progressivement remplacée par l'énergie hydraulique. Les machines hydrauliques s'imposent à la fin du XVI^e siècle. En 1633, 81 concasseurs hydrauliques d'une puissance totale de 350 kilowatts fonctionnent sur la Ribera.

Le début de la décadence

Natif de Potosi, Bartolomé Arzáns (1676-1736) était maître d'école. Dès 1705, il retrace l'activité de la ville depuis sa création, en 1545. Cette chronique sera poursuivie par son fils jusqu'en 1737. Arzáns est marqué par la rupture du barrage de San Ildefonso, le 15 mars 1626, où plus de 2 000 habitants de Potosi trouvent la mort (voir l'encadré de la page 46) ; selon le pieux Arzáns, Dieu a puni l'impiété des richissimes habitants de Potosi.

Même si la rupture a marqué son histoire, la ville se remettra vite de cet épisode (quelques années après la catastrophe, il y a plus d'usines sur la Ribera qu'en 1626). D'autres calamités, telles rigueurs climatiques et épidémies, frappent la ville. Au cours de la seconde moitié du XVII^e siècle et de la plus grande partie du XVIII^e siècle, la population de Potosi diminue inexorablement. Environ 160 000 vers 1610, les habitants ne seront plus que 70 000 vers 1700, puis 40 000 après l'épidémie (vraisemblablement de peste) de 1719, qui tue le tiers des citadins, et 24 000 en 1778.

La baisse de l'activité minière et la chute de la population de Potosi à partir de 1650 résultent surtout de la fin de l'approvisionnement régulier en mercure bon marché en provenance du Pérou, car le procédé d'extraction par amalgame nécessite des quantités notables de ce métal (voir l'encadré

ci-dessous). Dès le milieu du XVII^e siècle, le Mexique devient le plus grand producteur d'argent des Indes espagnoles, supplantant définitivement Potosi.

Le Petit Âge glaciaire, une période anormalement froide, commence vers 1500 et perdure jusqu'à vers 1850, presque toute la période coloniale espagnole à Potosi (1545-1825). La période 1560-1641 est plutôt sèche. Dans la région de Potosi, la vie est d'une grande dureté et la sécheresse accompagne la dépression économique. Entre 1705 et 1742, deux années sur trois sont marquées par une sécheresse dévastatrice.

Pedro Vicente Cañete, administrateur assistant du gouverneur de Potosi pendant une trentaine d'années, consigne l'histoire de la région dans

un ouvrage achevé dans les années 1780. Il retrace les réformes du despote éclairé Charles III : pendant son règne (1759-1788), les Bourbons tentent un ultime effort pour restaurer les colonies espagnoles et relancer l'exploitation des mines d'argent.

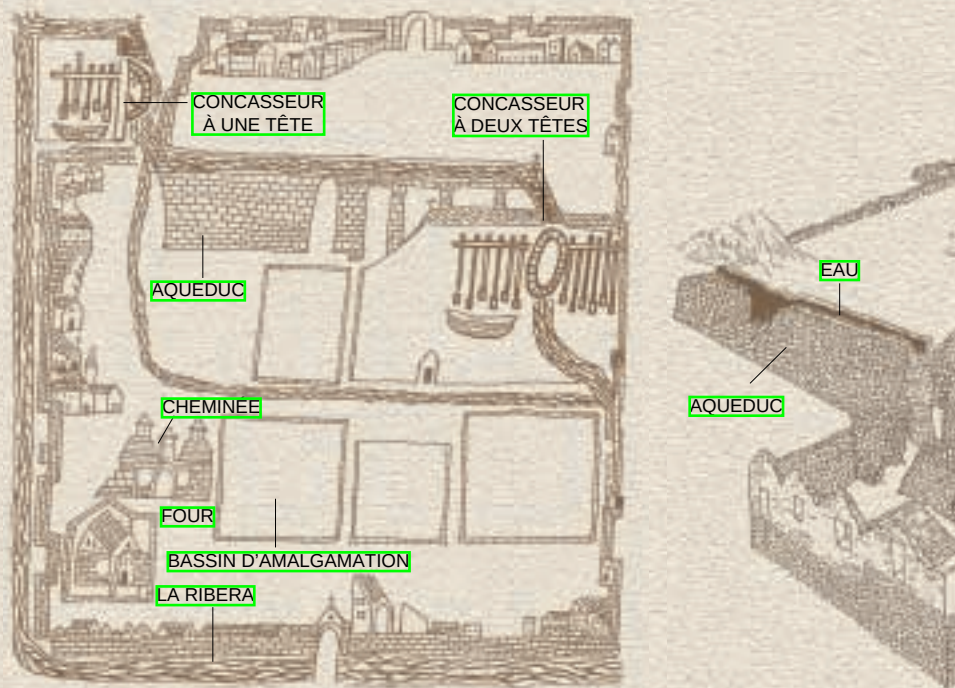
Le nombre des concasseurs installés sur la Ribera et dans la région de Potosi sur d'autres cours d'eau varie selon le degré d'exploitation des mines et la concentration des filons en argent. Dans toute la région de Potosi, on dénombre 96 concasseurs en 1601 et 140 en 1610. Sur la seule Ribera, on passe de cinq concasseurs en 1576, à 49 en 1583 et à 81 en 1633. Ensuite, les têtes ne sont plus que 34 en 1693, année caractéristique de la grande crise qui

Le procédé de purification de l'argent

Au temps de la colonie, le minerai d'argent est transporté de la mine jusqu'à la cour de l'usine, ou patio, dans des sacoches, à dos de lama, d'âne, de mulet et de cheval. Le lama est l'animal le plus utilisé, des dizaines de milliers de bêtes étant réquisitionnées par l'administration espagnole. Le minerai est sous forme de petits blocs d'une dizaine de centimètres de diamètre ; il est déposé dans un coin de la cour et sèche pendant quelques jours. Les concasseurs utilisés à Potosi ressemblent à ceux inventés au début

du XVI^e siècle dans les usines de la Saxe, en Allemagne (où l'on extrayait également l'argent) : ils sont équipés de quatre à six pilons chaussés, à leur extrémité, d'une masse de fer ou de bronze.

Grâce à une série d'engrenages, ces marteaux-pilons se soulèvent les uns après les autres d'une vingtaine de centimètres avant de retomber sur le minerai. L'axe auquel sont reliés les pilons est entraîné par une roue hydraulique, de diamètre compris entre quatre et huit mètres. Les roulements et les arbres



Ce schéma (à gauche) réalisé au XVIII^e siècle par le chroniqueur Arzáns, qui vivait à Potosi, illustre le rôle essentiel de l'eau dans la purification de l'argent. L'eau coulait dans la Ribera, un canal traversant la ville, et des dérivations alimentaient des aqueducs

dura de 1650 à 1750, et atteignent 79 en 1788, lors d'une phase de croissance de la métallurgie de l'argent, le troisième boum minier.

La mita

Les Indiens payèrent un lourd tribut à l'exploitation de l'argent à Potosi. En 1573, au début des grands travaux, quelque 20 000 Indiens, dont certains étaient contraints aux travaux forcés, la *mita*, auraient été mobilisés pour la construction du premier barrage, sur le lac Chalviri. On faisait venir à Potosi des travailleurs qui habitaient à plus de 600 kilomètres de là. Ces travaux forcés frappaient tous les hommes de 18 à 50 ans des communautés indigènes,

du lac Titicaca, au Nord (le Pérou actuel) jusqu'à la région de Tarija (à la frontière actuelle avec l'Argentine), au Sud.

Vers 1750, la population andine, éprouvée par les épidémies et les conditions de travail, particulièrement dures dans les mines et dans les usines, n'était plus que le quart de celle de 1533, date de l'arrivée des Espagnols (les concasseurs dégageaient une épaisse poussière, et les ouvriers manipulaient sans précaution le mercure toxique). Fuyant la *mita* dans la région voisine de Cochabamba, les métis, les petits commerçants et toutes les catégories exemptées des travaux forcés se multiplièrent. Des travailleurs libres étaient également employés dans les mines.

En 1780, les Indiens soumis aux travaux forcés n'étaient plus que 2 880, contre 13 340 appelés en 1573 et 10 460 en 1617. En 1750, le roi d'Espagne reconnaît l'ampleur des pertes humaines depuis le début de la *mita*, en confirmant qu'une vingtaine d'Indiens soumis aux travaux forcés travaillaient comme ouvriers et manœuvres dans chaque usine d'argent, contre une quarantaine au début de l'exploitation hydraulique.

Selon certains historiens, c'est uniquement grâce à l'exploitation accrue de cette main-d'œuvre gratuite qu'aurait eu lieu le troisième boum minier, entre 1780 et 1800 (la *mita* ne sera abolie qu'en 1812). Toutefois, la reprise de l'activité à Potosi est fragile, à la fin du XVIII^e siècle. Certes, l'Espagne envoie des administrateurs, des experts internationaux et des missions scientifiques pour réactiver et moderniser les mines, mais les résistances sont fortes. La technique des barils, qui aurait accéléré la formation de l'amalgame, est rejetée par les entrepreneurs, qui ne veulent pas investir dans de nouvelles installations. Dans la technique des barils, au lieu de laisser l'argent s'amalgame au mercure dans des bassins, le minerai et les réactifs chimiques sont placés dans des barils qui tournent ; cette agitation augmente la vitesse de réaction, qui est achevée en 24 heures tandis qu'il faut une quinzaine de jours avec le procédé des bassins. De surcroît, à la fin du XVIII^e siècle, la main d'œuvre est insuffisante, le mercure manque et l'approvisionnement en énergie hydraulique est déficitaire, à cause d'une sécheresse générale dans les Andes, entre 1780 et 1810.

Le début du XIX^e siècle est marqué par deux crises de production de l'argent. Entre 1800 et 1805, la Ribera tarit souvent, et l'importation du mercure extrait des mines espagnoles est interrompue par les guerres napoléoniennes de sorte que le minerai ne peut plus être traité ; ensuite, la lutte pour l'indépendance des États Sud-américains désorganise les circuits de production. La population de Potosi atteint son minimum historique durant cette période troublée. En 1807, seules 13 700 personnes vivent dans la cité. Lors de la visite du libérateur Simón Bolívar en octobre 1825, Potosi n'est plus qu'une ville-fantôme de 8 000 habitants, soit moins du dixième de la population du début du XVII^e siècle. La plupart des habitants ont fui le site à cause de la longue guerre d'indépendance de la Bolivie qui dure 16 ans

à cames sont en bois et en cuir, puis en fer, et abondamment lubrifiés par de la graisse de lama. Le minerai est broyé en grains de quelques millimètres, et chaque marteau-pilon de concasseur traite 20 tonnes par mois.

Une meule circulaire en pierre, actionnée et refroidie à l'eau, réduit ensuite le minerai en une poudre fine. L'ensemble des deux phases de pulvérisation mécanique – concassage et mouture – est nommé trituration. Le matériel est ensuite passé au crible et classé selon sa granulométrie. Le matériel le plus fin est transporté au centre du patio et placé dans des bassins carrés de deux mètres sur trois environ, contenant entre 20 et 100 caissons placés côte à côte.

L'amalgamation a lieu dans ces caissons. À la poudre de minerai, on ajoute les uns après les autres différents réactifs (notam-

ment du sulfate de cuivre, de l'étain ou du plomb, du chlorure de sodium, de la chaux) et du mercure, dont le rôle est essentiel dans le procédé. Pendant une quinzaine de jours, le mélange reste à réagir dans les caissons, qui sont alors rincés à l'eau. La gangue, plus légère, se déverse dans un canal d'évacuation, tandis que l'amalgame d'argent et de mercure reste au fond des bassins. On le recueille à la pelle. Après égouttage, l'amalgame est pressé dans des moules, puis mis au four et porté à près de 1 000 °C, où le mercure se vaporise. Dans chaque moule, on recueille de l'argent pur à 95 pour cent.

Dans cette chaîne de production, l'eau intervient à toutes les étapes. Pour chaque usine, l'eau de la Ribera est déviée vers un petit aqueduc qui déverse l'eau sur la roue hydraulique et alimente l'usine.



(au centre) qui conduisaient l'eau jusqu'au cœur des usines. L'eau actionnait les concasseurs et elle était également très utilisée au cours du procédé d'amalgamation, qui avait lieu dans des bassins. À droite, un aqueduc restauré et un concasseur (à l'arrière-plan).

La rupture du barrage de San Ildefonso, en 1626

Le barrage de San Ildefonso, achevé en 1576, est l'un des premiers ouvrages réalisés par les colonisateurs. Il est constitué de dépôts morainiques remaniés par l'homme, qui n'ont pas été suffisamment consolidés. Les barrages espagnols sont construits sans déversoir, et le niveau des lacs doit être étroitement surveillé. En cas de trop-plein, des vannes sont ouvertes, et si cela ne suffit pas, les ouvriers pratiquent à la hâte un passage pour les eaux lors de leur montée.

Le dimanche 15 mars 1626, vers 13 heures, après une saison de pluies abondantes, le lac San Ildefonso (à 4 410 mètres d'altitude) est plein. Hélas, l'incurie d'un haut fonctionnaire de la couronne amène la catastrophe. Malgré les avertissements du technicien chargé de la maintenance des lacs, l'incompétent gouverneur de la ville ne se préoccupe pas de la montée des eaux et ne fait pas ouvrir les vannes à temps. Le vent amorce le déversement, une vague déborde et une brèche s'ouvre dans la digue : toute l'eau s'y engouffre. Le barrage se rompt, et le contenu de la réserve d'eau se déverse sur Potosi. Selon certains témoins, sur 122 usines installées à Potosi et à Tarapaya, moins de la moitié résistèrent aux

flots. La moitié de la ville, quelque deux kilomètres en aval du barrage, est sous l'eau, 360 maisons d'Espagnols et 800 maisons d'indigènes sont détruites. Deux facteurs expliquent l'ampleur de la catastrophe : la fragilité des constructions et la surpopulation le long de la Ribera. Les auteurs contemporains ont décrit l'exiguïté et la précarité des maisons, qui s'effondraient par fortes pluies ou averses de grêle. De plus, à l'heure de la catastrophe, tous les habitants sont chez eux. Les roues hydrauliques de trois tonnes, entraînées par le flot, écrasent les fragiles demeures.

La catastrophe, une des plus meurtrières dans l'histoire des barrages, fit plus de 2 000 victimes immédiates. À cela s'ajouta une forte contamination chimique en mercure, en chaux vive, en sulfate de cuivre, qui se déversèrent dans la Ribera.

Après le désastre, les Espagnols reconstruisent et consolident les barrages de San Ildefonso et de San Sebastian. Le barrage de San Ildefonso a été restauré une dernière fois, en 1935-1936 ; il mesure aujourd'hui 500 mètres de longueur et, au point le plus haut, la digue enserrant l'ouvrage atteint une hauteur de huit mètres... La digue de 1626 était sans doute moins haute.

(de 1809 à 1825) et ruine l'activité minière. Potosi est tour à tour pillée, perdue ou reprise par les indépendantistes venus d'Argentine et par les royalistes espagnols.

La vapeur est salvatrice, mais le Gold standard...

En 1825, année de l'indépendance, le Haut-Pérou prend le nom de Bolivie, et c'est le début de la période républicaine de l'exploitation de l'argent. Vers 1840,

la production s'améliore, et c'est le quatrième boum minier de l'histoire de Potosi. Le maximum de la production n'atteint cependant pas la moitié de celle du boum des années 1750-1800. L'arrivée de la vapeur et de l'électricité en 1872 correspond au cinquième boum. La force hydraulique n'est plus l'unique moteur de l'exploitation. Pourtant, le système hydraulique colonial est entretenu pour alimenter en eau la population de la fin du XIX^e siècle. Il subsiste encore quelques petits ateliers sur la

Ribera, où le minerai de contrebande et de faible teneur est concassé, mais l'outillage est obsolète. En 1892, il ne reste que 65 ateliers.

En 1891, tournant pour l'économie bolivienne : les États-Unis adoptent le *Gold Standard*, qui sonne le glas de l'argent dans le système monétaire international. La démonétisation de l'argent marque la fin de la principale demande. Les mineurs et les entrepreneurs boliviens décident alors d'exploiter l'étain, lui-même extrait du Cerro Rico et dont la demande croît jusqu'à la crise mondiale déclenchée par le krach boursier d'octobre 1929. La production record de la même année est 47 100 tonnes. Néanmoins, la demande d'étain se maintient pendant et après la crise économique des années 1930, car le métal est indispensable à la production de bronze. Qui plus est, l'étain sert alors beaucoup à la fabrication des boîtes de conserve. Le prix de l'étain ne s'effondre définitivement qu'en 1985, avec la mise en place de l'industrie du recyclage des métaux dans l'économie occidentale : l'étain recyclé, les revenus liés au métal échappent aux Boliviens.

En 1935-1936, William Rudolph, un ingénieur Nord-américain, restaure, avec 800 ouvriers, le système de barrages en cascade hérité des Espagnols. Il a été engagé par le propriétaire de mines, un Bolivien d'origine allemande, Mauricio Hochschild, l'un des trois magnats de l'étain. En 1929, le groupe Hochschild fournit 10 pour cent de la production bolivienne.



2. L'EAU UTILISÉE POUR LE CONCASSAGE coulait dans un aqueduc et actionnait les roues hydrauliques construites dans la maçonnerie (à gauche). L'axe de la roue était relié au concasseur (la poutre horizontale, sur la photographie de droite), dont les pilons frappaient le minerai. Puis on faisait subir au minerai réduit en poudre par une meule un traitement par le mercure pour récupérer l'argent.

Vers 1930, six lacs alimentent encore Potosi qui compte 35 000 habitants, soit environ le cinquième de la population de la ville, à son apogée. Néanmoins, on décide de restaurer les barrages, parce que les besoins en eau de la population du XX^e siècle sont supérieurs à ceux de la population coloniale. De plus, les sociétés qui exploitent l'étain veulent disposer d'eau durant toute l'année.

La restauration

La restauration des barrages est œuvre difficile. À Potosi, toutes les vannes d'évacuation (à l'exception de deux d'entre elles) sont en très mauvais état. Taillées à l'origine dans un tronc d'arbre, puis fondues en bronze, les vannes sont l'élément fragile de l'ingénierie coloniale. De surcroît, les remblais des barrages ont subi des infiltrations : lorsqu'il est plein, le lac Chalviri perd 80 litres par seconde.

Pour améliorer l'alimentation en eau de Potosi, on construit de nouveaux barrages, qui s'appuient sur les anciennes digues ; les fondations sont enterrées de un mètre dans la roche saine. Le lac Chalviri pose une difficulté particulière, parce qu'il ne peut pas être vidangé : on édifie un nouveau barrage légèrement à l'aval de celui de la colonie, et l'espace entre les deux est comblé par du béton, l'ensemble formant une seule digue de cinq mètres de large. Enfin, les barrages ne sont généralement pas assez élevés pour retenir toute l'eau en cas de fortes pluies : l'eau déborde et s'écoule en cascades qui dégradent les ouvrages. Aussi la crête des barrages sans déversoir est-elle relevée, et les tunnels d'évacuation sont-ils reconstruits.

Toutefois, tout ne peut être restauré et nombre de lacs de la colonie disparaissent à jamais. De plus, la forte sédimentation de certains lacs posait un problème insoluble : le lac San Sebastian, remblayé sur une épaisseur de 95 centimètres, avait perdu 80 000 mètres cubes de capacité de stockage. Les lacs coloniaux, n'ont pas été restaurés depuis 1936 ; ils continuent à alimenter la population et les industries de Potosi. Une trentaine d'usines fonctionnent encore, produisant zinc, plomb, argent et étain.

Aujourd'hui, les machines hydrauliques en bois de Potosi fonctionnent à nouveau, moyennant la substitution des pièces usées et le remplacement de quelques composants par des éléments en fer. Essentiellement conçues à la fin du XVI^e siècle, elles ne sont devenues

L'argent de Potosi et l'économie française

L'argent de Potosi était soit frappé sur place (à partir de 1575), soit expédié en Europe (dès 1545, en passant par Lima). Il apparaît massivement dans les émissions monétaires françaises de 1575, date de la réforme monétaire d'Henri III, et surtout du début du deuxième boom des mines de Potosi, après les améliorations apportées à l'exploitation de l'argent par le vice-roi Toledo. Toutefois, les guerres de religion nuisent à la production de monnaie.

En revanche, au cours de la décennie 1580, grâce à l'afflux d'argent de Potosi quasi pur, la production des pièces frappées dans les hôpitaux de monnaie de la façade atlantique double. Comme en Espagne, le métal précieux en provenance de Potosi s'ajoute au métal circulant et augmente la masse monétaire.



À la fin du XVI^e et au début du XVII^e siècles l'arrivée massive d'argent de Potosi en Europe a eu une influence notable sur l'économie : les émissions monétaires espagnoles décuplent.

En France, l'émission monétaire des ateliers atlantiques baisse à partir de 1590, notamment en raison des guerres de la Ligue. La banqueroute de l'Espagne, en 1596-1597, empêche l'importation d'argent espagnol, ce qui provoque une pénurie dans le Sud de la France et une augmentation du prix du métal. L'avènement d'Henri IV amène une décennie (1600-1610) de paix : les frappes monétaires reprennent.

Pourtant, c'est la fin de la « phase Potosi » en France, et la décrue de la frappe de monnaie avec le métal issu des hautes Andes péruviennes.

obsoletes qu'en 1872, au début de la modernisation de l'industrie minière. Leur grande robustesse et leur réparation aisée furent un obstacle au changement technique, et elles favorisèrent indirectement la décadence de Potosi.

Néanmoins, Potosi reste, dans le cœur de ses habitants et des Espagnols, ainsi qu'aux yeux des historiens, la fabuleuse cité impériale du Nouveau Monde, celle où les chevaux des nobles avaient caparaçon d'argent et harnais couverts d'émeraudes, celle qui fit rêver Cervantès. En 1590, ce dernier rédigea une demande pour être nommé gouverneur de la cité de La Paz, voisine de Potosi. Dans *Don Quichotte*, il cite les mines de Potosi comme le symbole de

la richesse absolue. Au contraire, après l'indépendance des États Sud-américains, Potosi devint pour les Boliviens et pour les Péruviens le symbole de l'exploitation des Indiens, de l'humiliation des colonisés et du pillage des ressources minières par les étrangers. Le travail forcé de générations d'indigènes, de 1573 à 1812, dans les mines et les usines d'argent, reste le noir visage de Potosi. D'ailleurs, les Indiens célébraient leur départ vers la montagne d'argent comme une offrande à la déesse de la Terre, comme un voyage sacrificiel et sans retour. Olympe généreuse pour les colonisateurs, Potosi fut aussi l'enfer, dans les entrailles de la Terre, pour nombre d'Indiens.

Alain GIODA étudie l'histoire du climat des Andes, dans le cadre du programme Neiges et glaciers tropicaux, à l'IRD (Institut de recherche pour le développement) et au SENAMHI (Service national bolivien de météorologie et d'hydrologie), à Cochabamba. Carlos SERRANO, professeur à l'Université autonome Tomas Frias de Potosí, a dirigé le Laboratoire de concentration des minéraux jusqu'en 1998.

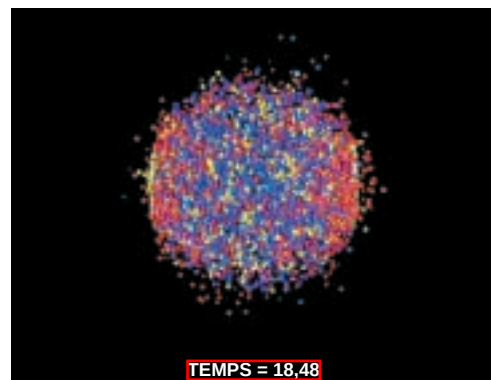
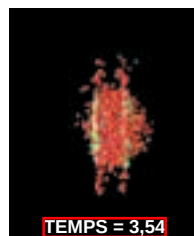
Pedro V. CANETE (1787), *Guía histórica, geográfica, física, civil y legal del gobierno e intendencia de la provincia de Potosí*, sous la direction de A. Alba, Editorial Potosí, 1952.

Luis CAPOCHE (1583), *Relación general de la villa imperial de Potosí*, sous la direction de L. Hanke, tome 122, Atlas, Madrid, 1959.

Bartolomé ARZÁNS (1705-1737), *Historia de la villa imperial de Potosí*, sous la direction de L. Hanke et G. Mendoza, Brown University, Providence, 1965.

Emmanuel LE ROY LADURIE et al., *Sur les traces de l'argent de Potosi*, in *Annales ESC*, n° 2, pp. 483-505, Librairie Armand Colin, mars-avril 1990.

Carlos SERRANO, Julio PELÁEZ, *Potosí y sus lagunas*, in *Revista de Investigaciones Históricas (Potosí)*, pp. 14-130, 1995-1997.



Un Big Bang miniature

MADHUSREE MUKERJEE

Des collisions de noyaux atomiques pourraient créer de la matière aussi dense et chaude que dans l'Univers primordial.

Nous sommes dans le tunnel, là où il se divise en deux branches ; les deux tubes étroits qui contiennent le faisceau s'incurvent, de sorte qu'ils sont bientôt cachés à notre vue. La lumière douce se réfléchit sur le gris du béton, de l'acier et des matériaux d'isolation brillants. Une odeur d'atelier flotte dans l'air frais, et l'on perçoit le cliquetis étouffé d'une machine qui vérifie l'étanchéité au vide des tubes. Nous continuons à marcher. Le tunnel devient rectiligne, et les tubes se rejoignent en un seul, plus large. Nous escaladons un ensemble de tuyaux entrecroisés, et nous débouchons dans un vaste hall, baigné par la lumière jaune de projecteurs au sodium. Sur le sol est peint un cercle noir où est écrit «Point de collision».

Juste au-dessus de ce point, les physiciens créeront, au mois de juin 1999, de la matière aussi chaude et aussi dense qu'à la première microseconde après le Big Bang, l'explosion primordiale qui aurait donné naissance à l'Univers. Le Collisionneur d'ions lourds relativistes (le RHIC), dont la construction vient de s'achever au laboratoire américain de Brookhaven, à Long Island, accélérera des noyaux atomiques dont la masse est comprise entre celle de l'hydrogène (un seul proton), et celle de l'or (197 protons et neutrons). Au repos, un nucléon (un proton ou un neutron) a une énergie d'environ un

gigaélectronvolt (un milliard d'électronvolts). Le RHIC accélérera ces noyaux jusqu'à ce que chaque nucléon ait une énergie 10 à 100 fois supérieure.

Des paquets de noyaux atomiques accélérés circuleront dans des directions opposées, dans les deux tubes, et ils se rencontreront dans les quatre détecteurs répartis sur les 3,8 kilomètres de la circonférence du tunnel. Lorsque deux noyaux lourds entreront en collision, chaque paire de nucléons libérera une énergie de 200 gigaélectronvolts, élevant la température à plus de 10^{12} kelvins (mille milliards de kelvins), soit 100 millions de fois la température de la surface du Soleil.

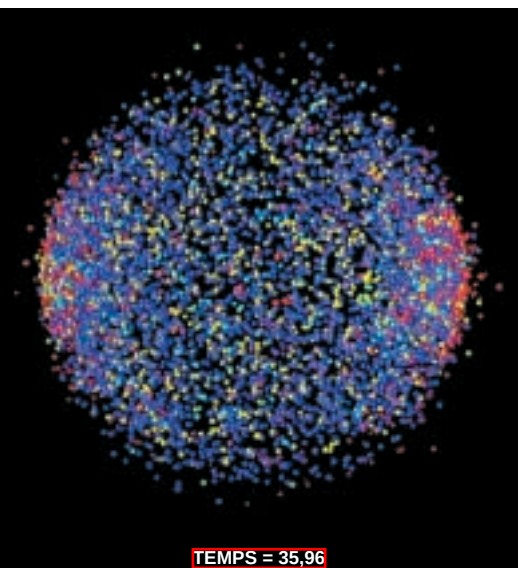
Les physiciens pensent qu'à ces températures les protons et les neutrons devraient se désintégrer et libérer les particules qui les composent : des quarks et des gluons. Un proton est constitué de deux quarks de type «haut» et d'un quark de type «bas», collés par des gluons ; un neutron contient deux quarks bas et un quark haut. Lors de la désintégration, un plasma de quarks et de gluons se formerait dans un volume de 10^{-15} mètre de côté. Ce plasma subsisterait pendant 10^{-23} seconde environ (le temps nécessaire à la lumière pour traverser un noyau atomique) ; il se désintégrerait ensuite en une multitude de particules, qui parcourraient encore mille milliards de fois cette distance avant

d'atteindre les détecteurs. Les physiciens de Brookhaven rechercheront la preuve de l'existence de ce plasma éphémère dans les traces enregistrées par ces détecteurs. Ce sera plus difficile encore que la recherche d'une aiguille dans une botte de foin ; ils devront se contenter de contempler la botte de foin, afin d'en déduire si elle contient ou non une aiguille.

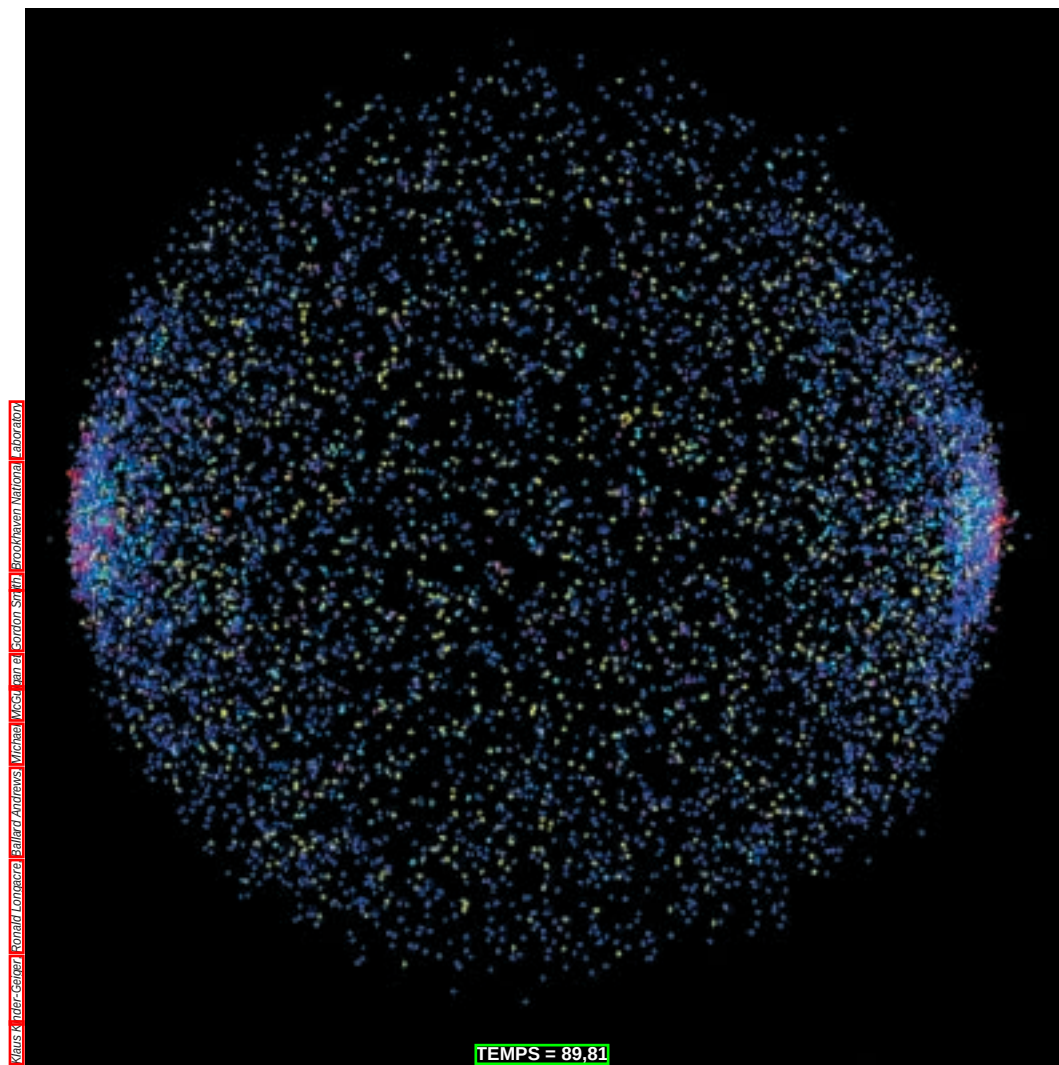
Un problème de couleur

Pis encore, ils ne connaissent même pas la forme de l'aiguille. Comment la matière se comporte-t-elle à ces énergies, où la force dominante est l'interaction forte «de couleur», transportée par les gluons, qui assure la cohésion des nucléons ? La très grande intensité de cette force et les interactions des gluons compliquent considérablement les calculs de la chromodynamique quantique, la théorie de l'interaction forte de couleur.

Aujourd'hui, les physiciens ne savent décrire l'interaction forte que dans quelques cas particuliers, par exemple quand elle est de faible intensité. Paradoxalement, l'interaction forte s'affaiblit quand les quarks et les gluons sont très proches. Tout se passe comme si les gluons, qui lient les quarks entre eux et avec les antiquarks (des particules de même masse, mais dont le nombre baryonique, paramètre



1. LA COLLISION NUCLEAIRE simulée ici est fondée sur le modèle de la « cascade de partons » : c'est celle de deux noyaux d'or, d'abord aplatis comme des crêpes en raison de la contraction des distances pour un observateur fixe, décrites par la théorie de la relativité. Leur collision provoque la dispersion de quelques quarks (*en gris*) et de quelques gluons (*en vert*), mais les noyaux passent l'un au travers de l'autre, laissant derrière eux des quarks et des gluons très énergétiques qui s'associent rapidement en grappes (*en rouge*). Celles-ci se désintègrent ensuite en pions (*en bleu*), en kaons (*en jaune*) et en d'autres particules, qui interagissent et se désintègrent. La boule de feu grossira encore mille milliards de fois avant d'atteindre les détecteurs. L'unité du temps noté en bas à droite des images est le temps que met la lumière pour parcourir 10^{-13} centimètre.



caractéristique, vaut $-1/3$ au lieu de $1/3$, étaient des élastiques : quand une paire quark-antiquark (un méson) est dissociée, l'«élastique» qui les lie (l'interaction forte) exerce une force de rappel constante, et il faudrait une énergie infinie pour séparer la paire (c'est pourquoi l'on n'observe jamais de quark libre). Cependant, lorsque le quark et l'antiquark sont très proches, l'élastique se relâche, et chaque particule se comporte comme si elle était seule. C'est ce cas que l'on espère observer, brièvement, dans les plasmas de quarks et de gluons.

En outre, dans la chromodynamique quantique de basse énergie, le «vide» est mal nommé, parce qu'il n'est vide qu'en apparence : il serait plein de paires quark-antiquark, nommées condensats, qui ne se manifesteraient qu'indirectement. Dans le vide ordinaire, ces condensats respectent la symétrie du vide, et ils associent un quark d'isospin droit à un antiquark

d'isospin gauche, et réciproquement (l'isospin d'une particule est une caractéristique quantique, formellement analogue au spin, ou moment cinétique intrinsèque des particules, mais qui n'a pas d'équivalent en physique classique). Cet appariement est toutefois contraire à une règle mathématique, la symétrie chirale, qui stipule que les quarks et les antiquarks d'isospin gauche sont indépendants des quarks et des antiquarks d'isospin droit. En revanche, à une température ou à une densité assez grandes, les condensats emplissant le vide devraient disparaître, et la symétrie chirale devrait être rétablie.

Le meilleur moyen d'explorer l'interaction forte est de réaliser de gros calculs. À l'aide d'un superordinateur, les théoriciens simulent l'espace-temps par une grille de points sur lesquels ils placent les quarks et les antiquarks, reliés par les gluons. Ces calculs de chromodynamique quantique sur

réseau prévoient que les quarks et les gluons se séparent pour la même valeur de la densité d'énergie que celle qui rétablit la symétrie chirale. Autrement dit, les collisions au RHIC devraient produire un plasma de quarks et de gluons présentant une parfaite symétrie chirale.

Malheureusement, la chromodynamique quantique sur réseau ne révèle pas directement ce qui se passe lors des impacts nucléaires énergétiques. Elle ne décrit que des situations statiques, qui ne s'appliquent qu'aux systèmes à l'équilibre, et non des situations dynamiques. On ne peut pas non plus l'utiliser pour la description de zones où le nombre de quarks est supérieur au nombre d'antiquarks, alors que, les protons et les neutrons contenant des quarks et pas des antiquarks, on s'attend à un excès de quarks quand deux noyaux entrent en collision. Selon Horst Stöcker, de l'Université de Francfort, une théorie n'est réaliste que si

elle combine «la relativité, qui est ardue, à la théorie des champs, qui est ardue, à la dynamique hors équilibre, qui est ardue, à la physique à n corps, qui est ardue». Les théoriciens sont contraints de faire beaucoup d'approximations.

L'un des modèles proposés assimile les quarks à des boules de billard

qui rebondissent les unes sur les autres ; ses règles sont celles de la mécanique quantique, et il utilise la probabilité de créer des particules composées, mesurée expérimentalement. Un autre modèle assimile les noyaux à de petites gouttes liquides et leur applique les lois de l'hydrodynamique,

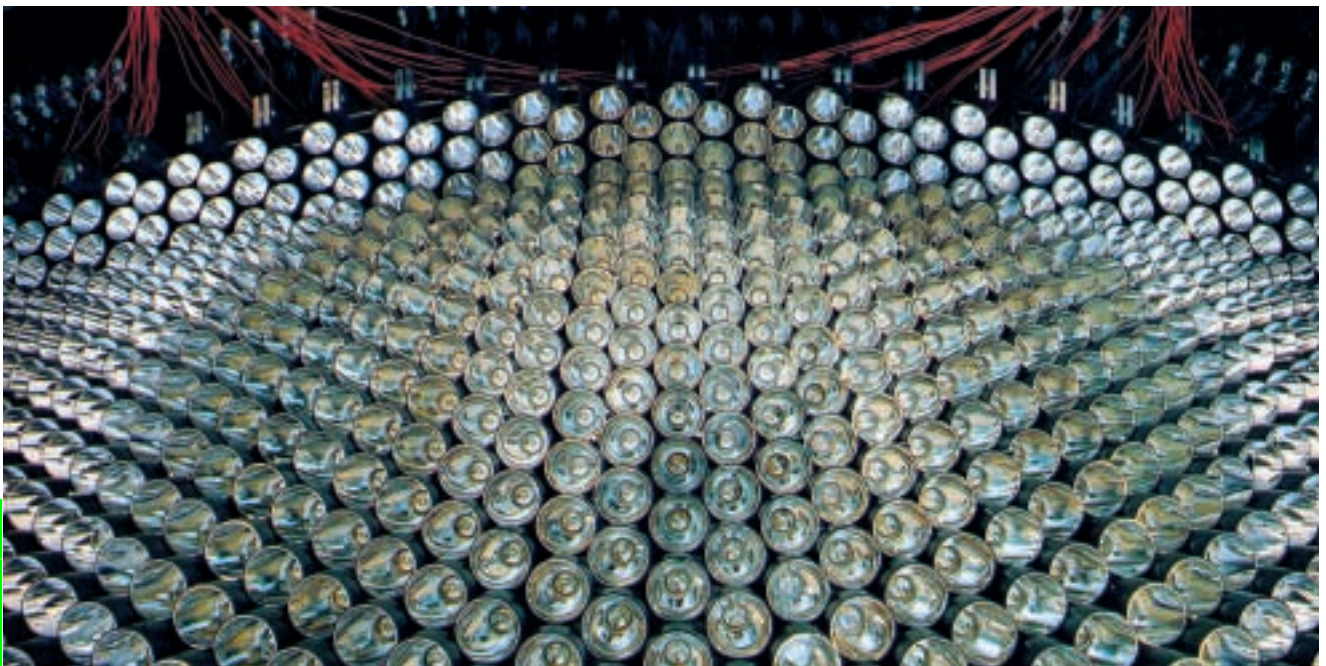
avec des paramètres calculés à l'aide de la chromodynamique quantique sur réseau. De nombreuses combinaisons et améliorations de ces modèles décrivent bien, chacune, l'un des aspects de la collision, mais aucune ne décrit correctement le phénomène dans son ensemble.



Brookhaven National Laboratory

2. LES LIGNES DE FAISCEAU du Collisionneur d'ions lourds relativistes *RHIC* de Brookhaven courberont la trajectoire des noyaux atomiques au moyen de champs magnétiques créés par des aimants supraconducteurs. La périphérie des tubes contient des cryostats,

à l'intérieur desquels circule de l'hélium comprimé froid. Les deux lignes de faisceau accéléreront des grappes de noyaux dans des directions opposées, jusqu'à leur rencontre dans les détecteurs.



Brookhaven National Laboratory

3. CE RESEAU DE PHOTOMULTIPLICATEURS servira à identifier les électrons qui émettront un rayonnement de Cerenkov (rayonnement électromagnétique émis par des particules chargées qui se

déplacent plus vite que la lumière dans le milieu). Cet instrument s'intégrera au détecteur *PHENIX*, qui mesurera surtout les caractéristiques des particules légères issues de la collision.

Les physiciens pensent toutefois connaître les grandes étapes d'une des futures collisions au RHIC. Au moment de l'impact, les deux noyaux se traverseront, et les quarks et les gluons d'un noyau se lieront à ceux de l'autre noyau par des lassos de «glu». À la séparation des noyaux, ces ficelles énergétiques casseront, se noueront ou fusionneront, créant, on l'espère, le plasma. Ce dernier se refroidira rapidement, émettant des électrons, des positons (des particules de même masse que les électrons, mais de charge électrique opposée) et leurs cousins plus lourds, les muons et les antimuons. La plupart des quarks et des gluons s'associeront et formeront des «hadrons», particules composées de deux ou trois quarks ou antiquarks. Certains de ces hadrons se casseront en d'autres particules, dont certaines se désintégreront à leur tour. Ces débris contiendront les éventuelles preuves de l'existence du plasma.

Des preuves indirectes

Quelles seront ces preuves? Les théoriciens ont fourni une longue liste de caractéristiques qui révéleraient la présence transitoire du plasma. Malheureusement, la plupart de ces caractéristiques pourraient aussi être le fruit d'autres phénomènes nucléaires.

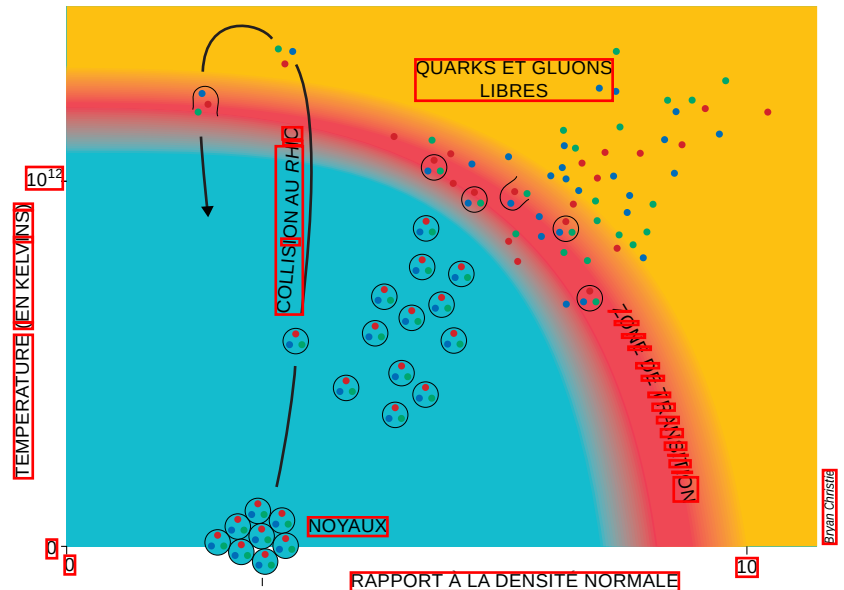
On examinera d'abord les particules éjectées perpendiculairement au faisceau : elles viennent majoritairement de la région de la collision, et leur énergie indiquera si les conditions ont été remplies pour l'existence du plasma. Cette analyse montrera également si la température (calculée à partir de la répartition du moment cinétique entre les particules) est restée constante un bref instant, ce qui pourrait indiquer une transition de phase correspondant à la disparition du plasma, comme l'ébullition de l'eau peut être détectée par le maintien de sa température à 100 °C. Toutefois, selon Miklos Gyulassy, de l'Université de Columbia, l'effet serait trop faible pour être décelable.

Une étude fine des pions (des mésons comprenant des quarks et des antiquarks haut et bas) et de leurs relations fournira la taille du plasma, par un calcul de mécanique quantique mis au point pour la détermination de la taille des étoiles. Cette analyse pourrait même aussi indiquer la vitesse de croissance du plasma : en assimilant

la substance nucléaire à un fluide, M. Gyulassy et d'autres ont calculé que l'expansion du plasma devrait être lente, car la vitesse du son deviendra anormalement petite lors de la désintégration du plasma en hadrons : toute onde de type sonore circulant dans le milieu sera absorbée, son énergie contribuant à la transformation du plasma. Ce ralentissement serait

certainement une preuve déterminante de l'existence du plasma, mais la collecte des données devra se poursuivre pendant plusieurs années avant qu'on ne le mette en évidence.

Enfin, les particules insensibles à l'interaction forte, tels les électrons, les muons et leurs antiparticules, donneront leur lot d'informations sur la collision initiale. Les caractéristiques



4. CE DIAGRAMME DE PHASE NUCLÉAIRE montre comment des noyaux classiques pourraient engendrer un plasma où les quarks et les gluons seraient libres. À très haute température ou à forte densité, les protons et les neutrons du noyau se désintègrent, libérant des quarks et des gluons. Les collisions de noyaux du RHIC devraient, quoique brièvement, produire cet état.



5. LE DÉTECTEUR PHENIX, ici avant son assemblage, comporte des «ailes» coniques conçues pour capturer les muons provenant d'un impact nucléaire. Certaines des plaques d'acier de ces ailes, expédiées de Saint-Petersbourg, sont parmi les plus grandes jamais fondues.

énergétiques et cinétiques de ces particules indiquent si une paire muon-antimuon ou électron-positon est issue de la désintégration d'un méson spécifique tel qu'un ϕ (phi) ou un ρ (rho). Ces mésons, s'ils se sont formés lors

d'une phase de la matière où la symétrie chirale était rétablie, pourraient avoir une masse inférieure à leur masse normale : la masse est due à l'interaction entre les quarks contenus dans les mésons, interaction dont

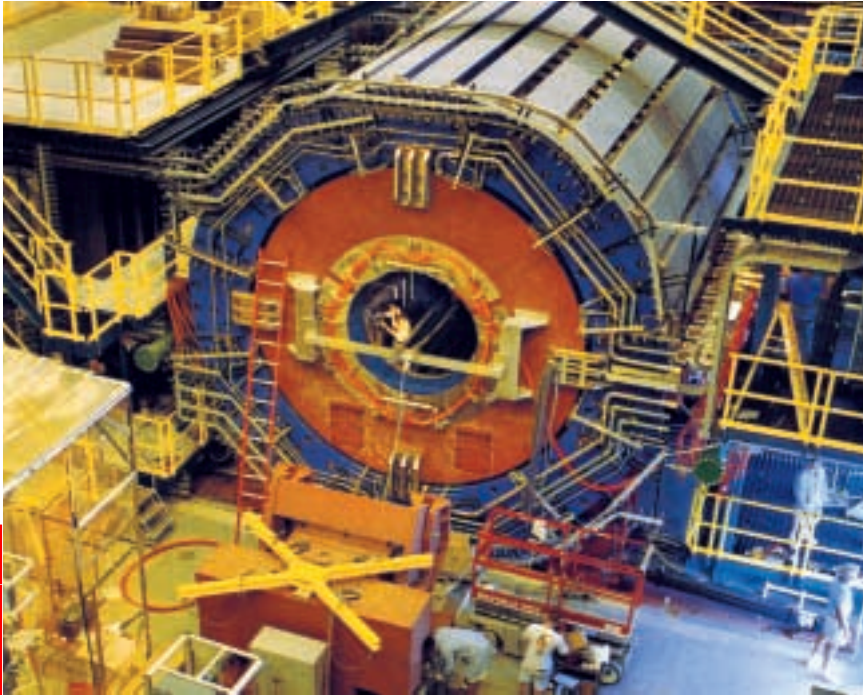
l'intensité diminue lorsque la symétrie chirale est rétablie et qu'il n'y a plus de condensat.

Une autre «signature» probable du plasma de quarks et de gluons est la raréfaction de la création d'un autre méson, nommé J/ψ . Ce méson, composé d'un quark charmé lié à un quark anticharmé, sera très peu produit dans la collision nucléaire. De plus, selon certains, un plasma de quarks et de gluons ne peut pas engendrer ce J/ψ , car le bombardement par les particules environnantes le détruirait. Ainsi la fréquence d'observation de ce méson (à partir de ses produits de désintégration) devrait être inférieure à une limite, que l'on peut calculer. La raréfaction des mésons J/ψ semble avoir été observée au Laboratoire européen de physique des particules de Genève, lors de collisions de noyaux de plomb avec une énergie efficace de 17 gigaelectronvolts par impact nucléon-nucléon. Sa reproduction à Brookhaven sera intéressante, même si divers phénomènes autres que la formation d'un plasma de quarks et de gluons puissent en être la cause.

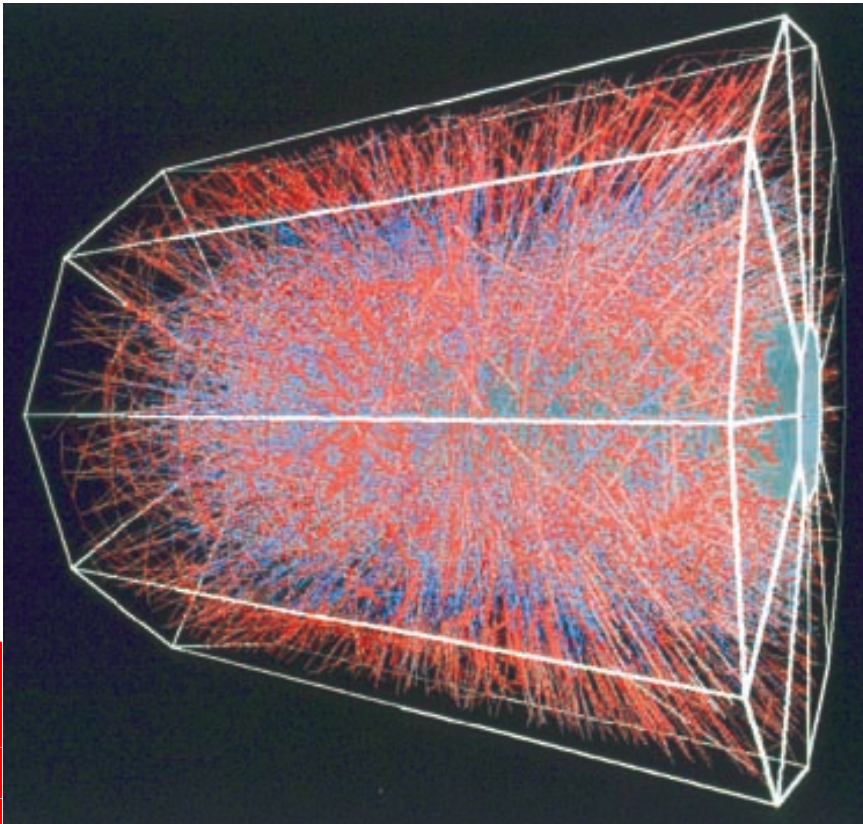
On peut aussi imaginer que le plasma forme un strangelet, c'est-à-dire une gouttelette de quarks «étranges» : les quarks étranges, qui devraient être nombreux dans le plasma de quarks et de gluons, et pourraient s'associer avec des quarks hauts et bas. La détection d'un strangelet est très attendue, mais ces objets subsisteront-ils assez longtemps pour atteindre les détecteurs?

La liste n'est pas close... Les théoriciens incitent les expérimentateurs à chercher des condensats chiraux désorientés (les isospins de tels condensats seraient des vecteurs d'orientations diverses, au lieu d'être simplement des nombres), des violations de conjugaison de charge (une symétrie que devrait présenter l'interaction forte), et d'innombrables autres phénomènes. Certains, même, soutiennent que le plasma de quarks et de gluons n'est pas un gaz du type de ceux que nous connaissons, mais un système où des interactions complexes détermineraient des propriétés analogues à celles de la phase hadronique qui lui succède.

Les expérimentateurs ne se découragent toutefois pas. «Je laisse aux théoriciens les questions qui commencent à ressembler à «Combien d'anges pourraient danser sur une tête d'épingle?»», dit en haussant les épaules Barbara



Brookhaven National Laboratory



MIT - Cornell - STAR et Laboratoire

6. LE DETECTEUR STAR (en haut) localisera les trajectoires de milliers de particules résultant des collisions entre noyaux et enregistrera leur énergie et leur quantité de mouvement. Une simulation (en bas) des traces laissées dans la chambre centrale de «projection temporelle» illustre la complexité du problème.

Jacak, de l'Université de Stony Brook. Bientôt les détecteurs qui commenceront le comptage des particules feront le tri parmi les hypothèses.

Rien n'échappe à STAR

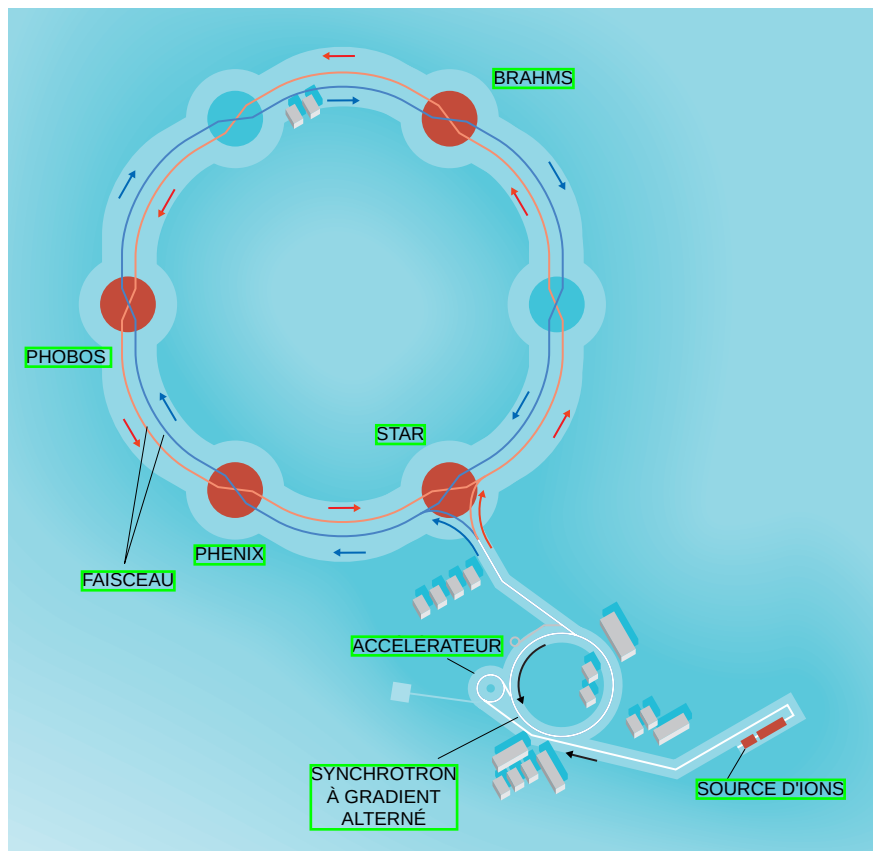
Le tunnel plonge sous plusieurs faisceaux de câbles avant d'arriver à l'énorme détecteur *STAR*, un ensemble de cylindres concentriques, de même axe que le faisceau. L'instrument principal, un dispositif massif aux reflets argentés, couvert de fils métalliques, localisera la trajectoire de chaque particule chargée qui y entrera, et il l'enregistrera assez vite pour suivre 1 000 collisions par seconde. Ce cylindre est entouré de plusieurs autres instruments, dont un calorimètre, qui mesurera l'énergie de chaque particule.

STAR est remarquablement puissant : il mesurera la quantité de mouvement, l'énergie et d'autres caractéristiques pour environ 6 000 des 10 000 particules (surtout des pions) issues de chaque collision qui se propageront dans des directions trop proches de l'axe du faisceau. Ainsi le détecteur donnera accès à des quantités globales, telles la température et la densité d'énergie du plasma.

PHENIX est un autre détecteur, encore plus gros, ainsi nommé parce qu'il est né des cendres de trois autres projets qui n'ont jamais été réalisés, faute d'argent et de personnel. Il s'élève à plus de 12 mètres et il déploie ses ailes le long des lignes de faisceaux afin d'attraper les muons.

La taille de *PHENIX* découle de sa mission : la capture et l'identification des particules légères. La quantité de mouvement d'un électron, par exemple, sera déterminée par la courbure de sa trajectoire dans un champ magnétique intense, et son identité sera déterminée par la pluie de photons caractéristiques qu'il émettra. Plus la distance de propagation est grande, plus la mesure de ces deux paramètres est précise. À terme, *PHENIX* devrait discerner si les électrons et les muons produits trahissent la présence de mésons dont la masse est inférieure à la masse normale, et qui se seraient donc formés dans des conditions où la symétrie chirale était rétablie.

Le collisionneur est équipé de deux autres détecteurs, plus petits. Le détecteur *BRAHMS* comptera la proportion de nucléons qui ne sont que faiblement perturbés par l'impact, et le détecteur



7. LE COLLISIONNEUR D'IONS LOURDS RELATIVISTES RHIC permettra aux expérimentateurs de fusionner, par des collisions, des noyaux se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière, afin d'observer le comportement de la matière à haute température et à forte densité. Les atomes, auxquels on aura enlevé une partie des électrons dans l'ionisateur, entreront dans un petit anneau d'accélération, où ils seront modérément accélérés. Ils seront complètement ionisés à la sortie, puis encore accélérés jusqu'à 10,8 milliards d'électronvolts par proton ou par neutron dans le Synchrotron à gradient alterné, et ils seront ensuite injectés dans le collisionneur. Des paquets de noyaux circuleront en sens contraire dans les deux lignes de faisceau, et ils seront accélérés jusqu'à un maximum de 100 milliards d'électronvolts par proton ou neutron, jusqu'à leur collision dans les détecteurs PHENIX, PHOBOS, BRAHMS et STAR.

PHOBOS piégera les particules émises dans toutes les directions, particulièrement celles dont l'énergie est trop faible pour qu'elles atteignent les gros détecteurs. Des emplacements restent libres pour l'installation de deux détecteurs supplémentaires.

Après le démarrage initial du RHIC en juin 1999, les opérateurs arrêteront la machine pour régler finement les détecteurs et résoudre tous les petits problèmes qui seraient survenus. C'est en novembre que les expériences commenceront pour de bon. La polyvalence du RHIC laisse espérer qu'il permettra d'élucider de nombreux aspects de la collision. Par exemple, on pourra augmenter l'énergie d'un faisceau de noyaux d'or et guetter un changement : une brusque augmentation du nombre de particules émises à partir d'une certaine énergie signalerait un changement du comportement des quarks et des gluons. Dans le

meilleur des cas, le plasma de quarks et de gluons se manifestera par plusieurs phénomènes simultanés.

En outre, on pourra créer des faisceaux de divers noyaux atomiques, tels l'or et le soufre. Si le seuil observé était absent lors des collisions de noyaux de soufre, ce serait une indication supplémentaire que des phénomènes physiques nouveaux se déroulent dans les collisions d'or : le soufre ne serait pas assez lourd pour produire le plasma. Des collisions décentrées donneront aussi d'autres informations que les collisions frontales.

On pourra ainsi étudier des collisions très variées, et pas seulement celles qui devraient engendrer un plasma de quarks et de gluons. Selon H. Stöcker, une multitude de phénomènes fascinants pourraient apparaître. Quelques-uns nous feront-ils mieux comprendre la naissance brûlante de l'Univers?

Le déclenchement de l'accouchement

ROGER SMITH

Le placenta humain sécrète une hormone qui participe au déclenchement de l'accouchement. Les endocrinologues cherchent s'ils pourraient l'utiliser pour éviter les naissances prématurées.

Au cours des 30 dernières années, les pédiatres ont appris à sauver de plus en plus de prématurés, ces bébés qui naissent avant la 37^e semaine de gestation, au lieu des 40 enregistrées en moyenne (aux États-Unis, on considère comme prématurés les bébés nés avant la 38^e semaine de gestation). Quelle que soit la limite admise, ce sont surtout les grands prématurés qui risquent d'avoir des difficultés respiratoires, des troubles du langage ou de la motricité, voire des retards mentaux.

Six à huit pour cent des enfants naissent avant terme, la moitié d'entre eux en raison d'un déclenchement spontané prématuré du travail (l'autre moitié par suite d'un déclenchement volontaire du travail, pour raisons médicales). Si l'on savait bloquer ce travail spontané précoce, on épargnerait un grand nombre de vies et l'on éviterait beaucoup d'invalidités.

Jusqu'à présent, toutes les méthodes préventives ont échoué, notamment parce que les biologistes connaissent mal les mécanismes qui commandent l'accouchement. Grâce aux avancées des dernières années, nous commençons à savoir comment on pourrait éviter un travail prématuré et retarder l'accouchement jusqu'à ce que l'enfant soit assez développé pour naître.

Nous pensons que le mécanisme découvert récemment ne détermine pas seulement le moment de la naissance ; il commanderait aussi les modifications de l'utérus et du col, qui déclenchent le travail. On sait aujourd'hui que, si le travail atteint son paroxysme au moment de

l'accouchement, il commence plusieurs semaines avant.

Si l'on comprend mieux aujourd'hui comment se déclenche l'accouchement, c'est que les connaissances sur la grossesse elle-même ont également progressé. On sait qu'au cours de la majeure partie de la grossesse, l'utérus est une sorte de sac relâché, constitué de cellules de muscle lisse indépendantes les unes des autres ; ce sac est scellé, à son extrémité inférieure, par un anneau hermétiquement fermé (le col) que de solides fibres de collagène rigidifient. Ces caractéristiques structurales sont dues à la progestérone, une hormone de la famille des stéroïdes que le placenta sécrète dans le sang de la mère, au début de la grossesse. Simultanément, le placenta sécrète des estrogènes, des hormones stéroïdes antagonistes de la progestérone, dont on admet qu'elles facilitent la contraction musculaire.

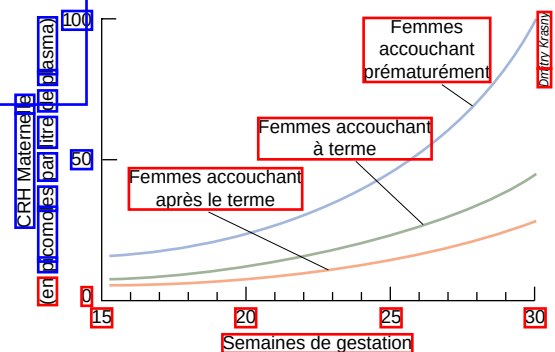
Les concentrations en estrogènes maternels, d'abord assez faibles, augmentent progressivement. Le travail commence quand les estrogènes et les autres forces qui favorisent les contractions de l'utérus l'emportent sur celles qui les inhibent.

Quand les concentrations en estrogènes maternels augmentent au cours de la grossesse, les cellules du muscle utérin (le myomètre) synthétisent une protéine, la connexine. Les molécules de connexine se propagent jusqu'à

la membrane cellulaire et forment des jonctions qui relient (électriquement et chimiquement) les cellules musculaires.

Ainsi reliées, les cellules musculaires peuvent se contracter en phase. Simultanément, sous l'action des estrogènes, les cellules du myomètre produisent de nombreux récepteurs de l'ocytocine, une hormone synthétisée dans le cerveau, qui augmente les contractions utérines.

Tandis que l'utérus se prépare au travail, les membranes fœtales recouvrant le col se mettent à fabriquer des prostaglandines, qui déclenchent la production d'enzymes digérant les fibres de collagène du col ; ce dernier devient une structure malléable, qui se dilate progressivement et finit par s'ouvrir lorsque la tête de l'enfant appuie dessus, pendant le travail.



1. LE MOMENT DE L'ACCOUCHEMENT semble fonction, chez la femme, de la vitesse à laquelle le placenta libère l'hormone CRH dans le sang de la mère et dans celui du fœtus. On a découvert cette « horloge placentaire » en mesurant les concentrations sanguines en CRH chez 500 femmes environ, tout au long de leur grossesse : la plupart des femmes qui avaient des concentrations en CRH élevées vers la seizième semaine de grossesse avaient les horloges les plus rapides et, souvent, elles accouchaient prématurément.

Simultanément, une autre hormone, le cortisol (fabriqué par les glandes surrénales du fœtus), assure la maturation finale des poumons du bébé, pour qu'il puisse respirer. Des concentrations élevées en cortisol entraînent la production de substances qui éliminent l'eau des poumons et leur permettent de se dilater.

Alors qu'ils exploraient le rôle des estrogènes dans le déclenchement de l'accouchement, les biologistes ne réussaient pas à identifier le signal (fœtal ou maternel) qui déclenche la sécrétion des estrogènes placentaires. Pour des raisons pratiques et éthiques, on explore difficilement les modifications biochimiques qui se produisent dans le fœtus, dans le placenta et chez la femme enceinte. Les biologistes ont alors étudié d'autres mammifères, notamment le mouton, et ils ont découvert de nombreuses informations sur la régulation de l'accouchement.

Vers le milieu des années 1980, les premières études avaient révélé le mécanisme de régulation chez le mouton. On sait aujourd'hui qu'il s'applique à certains mammifères. Au milieu de la gestation, l'hypothalamus, dans le cerveau du fœtus, commence à sécréter une hormone, la CRH (d'après l'anglais *Corticotropin-Releasing Hormone*,

l'hormone de libération de la corticotropine), qui déclenche la libération d'ACTH (d'après l'anglais *Adrenocorticotropin Hormone*, hormone corticotropine) par l'hypophyse. L'ACTH circule dans le sang du fœtus et commande à ses glandes surrénales de fabriquer du cortisol. Cette hormone, ensuite, active les enzymes placentaires qui transforment la progestérone en estrogènes. De ce fait, la concentration en progestérone diminue dans le sang de la mère, tandis que la concentration en estrogènes augmente. De surcroît, une concentration fœtale élevée en cortisol facilite la maturation des poumons.

Chez les femmes qui ne sont pas enceintes, le cortisol fait partie d'un système de rétroaction négative : son action sur l'hypothalamus et sur l'hypophyse limite la production d'ACTH et de cortisol, de sorte que sa concentration reste stable, au lieu d'augmenter sans cesse. Au contraire, chez les femmes enceintes, vers la fin de la grossesse, le cortisol fœtal perd cet effet inhibiteur. En étudiant des brebis gravides, on avait montré que les concentrations en ACTH et en cortisol

fœtaux, ainsi que les concentrations en estrogènes maternels, augmentent au cours de la gestation. La concentration en estrogènes finit par être suffisamment élevée et celle en progestérone suffisamment basse pour que le travail commence.

Puis les biologistes découvrirent qu'une des principales étapes n'a pas lieu chez la femme : le cortisol n'a aucun effet sur le déclenchement du travail ou de l'accouchement chez les femmes enceintes (en revanche, il semble faciliter la maturation des poumons puisque l'administration d'analogues du cortisol à une femme dont le travail commence avant terme diminue les difficultés respiratoires chez le nouveau-né).

Une « horloge » placentaire humaine

Dans l'espèce humaine, c'est la CRH qui semble commander la production du cortisol fœtal et la fabrication des estrogènes placentaires – donc le déclenchement de l'accouchement (c'est le cas aussi chez la brebis). Chez



la femme, l'essentiel de la CRH est libérée par le placenta, et non par le cerveau fœtal. De plus, elle ne déclenche pas la sécrétion des estrogènes placentaires de la même façon que chez la brebis ou chez la plupart des mammifères (à l'exception des primates).

Une «horloge» placentaire humaine

L'importance de la CRH placentaire dans le déclenchement de l'accouchement chez la femme est apparue dans les années 1980 : Tamotsu Shibasaki et ses collègues de Tokyo ont d'abord découvert que le placenta humain contient de la CRH. La découverte était surprenante, car on pensait alors que le cerveau en était l'unique source.

Plusieurs équipes montrèrent alors que la CRH placentaire s'accumule dans le sang maternel vers la fin de la grossesse, et qu'elle disparaît ensuite (elle est bien d'origine placentaire).

Enfin, on observa que des femmes qui accouchent prématurément ont, au moment de l'accouchement, des concentrations sanguines en CRH supérieures à celles des femmes testées au même moment de leur grossesse, mais qui n'accouchent pas avant terme.

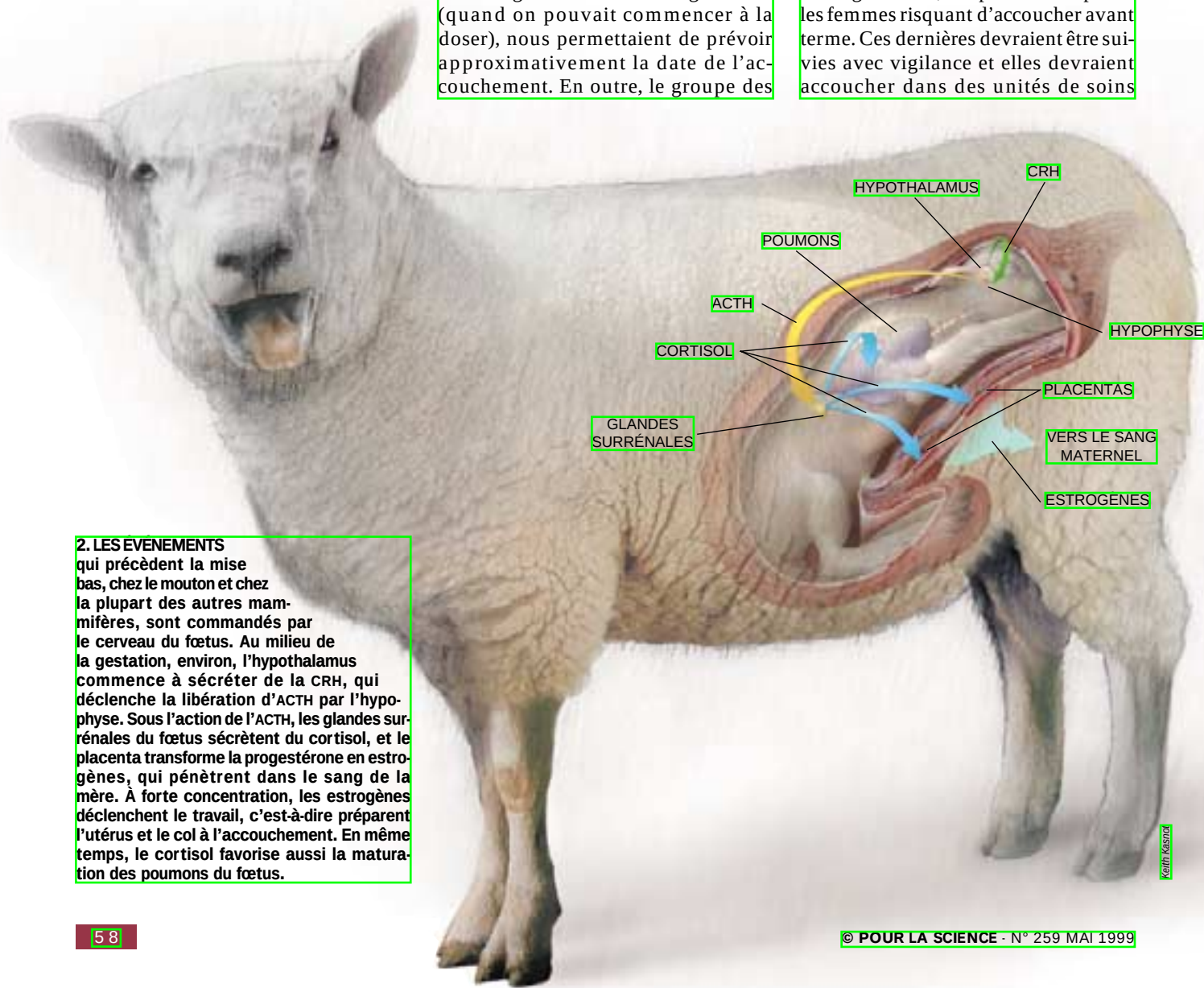
Mon collègue Mark McLean rechercha alors un lien éventuel entre la CRH et le déclenchement de l'accouchement. Il rassembla des prélèvements sanguins de près de 500 femmes, recueillis tout au long de leur grossesse, mesura la concentration en CRH pour savoir si le moment de l'accouchement dépendait de ces concentrations. Ce travail dura plusieurs années, mais l'étude s'acheva au milieu des années 1990.

À première vue, les résultats ne surprennent pas : les concentrations en CRH augmentent dans le sang maternel au cours de la grossesse, et cela de façon exponentielle. Toutefois, en y regardant de plus près, nous observâmes que les concentrations en CRH, entre la seizième et la vingtième semaine de grossesse (quand on pouvait commencer à la doser), nous permettaient de prévoir approximativement la date de l'accouchement. En outre, le groupe des

femmes qui avaient les concentrations les plus élevées était celui où la proportion d'accouchements prématurés était supérieur, tandis que le groupe des femmes à faibles concentrations en CRH était celui où l'accouchement était plus fréquent après le terme.

Autrement dit, M. McLean avait découvert une «horloge», qui se met en place au début de la grossesse et qui en commande la vitesse de progression ; cette horloge est – grossièrement – étalonnée sur la concentration en CRH dans le sang maternel. En fait, on pense aujourd'hui que la synthèse de CRH commande en partie la durée de la grossesse (à l'époque, on croyait que la CRH placentaire n'était qu'un produit dérivé d'un autre mécanisme orchestrant effectivement le travail et l'accouchement).

Les résultats étaient très satisfaisants, d'une part parce qu'ils éclairaient les mécanismes de déclenchement de l'accouchement et, d'autre part, parce que, en dosant la CRH assez tôt au cours de la grossesse, on pourrait dépister les femmes risquant d'accoucher avant terme. Ces dernières devraient être suivies avec vigilance et elles devraient accoucher dans des unités de soins



2. LES ÉVÉNEMENTS qui précèdent la mise bas, chez le mouton et chez la plupart des autres mammifères, sont commandés par le cerveau du fœtus. Au milieu de la gestation, environ, l'hypothalamus commence à sécréter de la CRH, qui déclenche la libération d'ACTH par l'hypophyse. Sous l'action de l'ACTH, les glandes surrénales du fœtus sécrètent du cortisol, et le placenta transforme la progestérone en estrogènes, qui pénètrent dans le sang de la mère. À forte concentration, les estrogènes déclenchent le travail, c'est-à-dire préparent l'utérus et le col à l'accouchement. En même temps, le cortisol favorise aussi la maturation des poumons du fœtus.

intensifs, spécialisées en néonatalogie. En outre, l'identification des femmes à risque permettrait le test de nouveaux traitements préventifs.

Les dosages de la CRH ne sont pas encore pratiqués en routine, notamment parce que l'on n'a pas encore déterminé les meilleures méthodes de dosage et le meilleur moment pour pratiquer le test. De surcroît, on sait que les concentrations en CRH varient notablement d'une femme à une autre, et que des concentrations normales ou faibles ne garantissent pas un accouchement à terme : une infection touchant le bébé, par exemple, déclenche un accouchement prématuré, même quand les concentrations en CRH ne sont pas trop élevées.

Pourtant, certains biologistes pensent aujourd'hui que la CRH placentaire joue un rôle essentiel dans la régulation du déclenchement de l'accouchement chez la femme et qu'elle n'est pas un simple marqueur d'un mécanisme de régulation encore plus complexe. Les résultats obtenus au cours des dix dernières années ont mis en évidence une cascade moléculaire déclenchée par cette hormone, qui fait augmenter la concentration des estrogènes nécessaires au déclenchement du travail.

Quand on eut compris que le déclenchement de l'accouchement chez la femme diffère de celui de la brebis, plusieurs équipes se mirent à étudier les primates. Les expériences sur les grands singes sont plus difficiles que sur les moutons, mais les femelles des espèces de primates sont les seules, avec les femmes, dont le placenta sécrète de la CRH.

CRH et déclenchement du travail

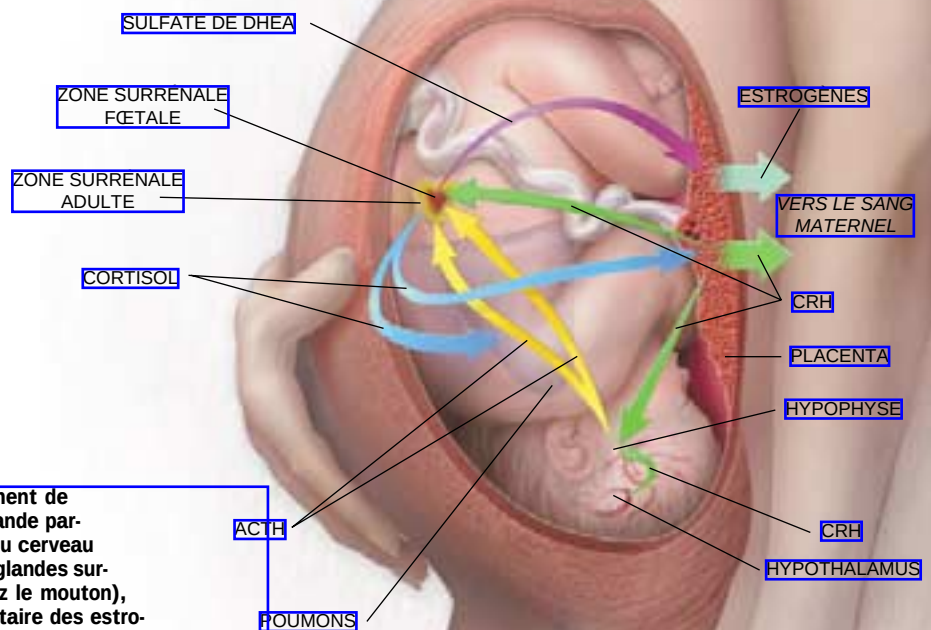
Vers la fin des années 1980, notre équipe et celle de Robin Goland, à l'Université de Columbia, ont commencé l'étude des babouins. Alors que les concentrations en CRH ne cessent d'augmenter chez les femmes enceintes, elles ont des variations différentes chez les femelles

babouins gravides : elles augmentent d'abord rapidement, puis diminuent à des valeurs supérieures à la normale, mais constantes jusqu'à la mise bas. Ce résultat nous laissa perplexes jusqu'à ce que j'assiste, en 1996, à une conférence sur le développement des glandes surrénales chez le fœtus, lors d'un congrès international d'endocrinologie.

Les spécialistes de la reproduction savaient que les glandes surrénales des fœtus de primate diffèrent de celles des fœtus de mouton et de celles des moutons ou des primates adultes : au lieu d'avoir une médulla centrale et un cortex externe qui sécrète le cortisol, les glandes surrénales des fœtus de primate n'ont pas de médulla, mais un cortex en deux parties, dont l'essentiel est constitué de la zone surrénale fœtale interne. La partie la plus petite, la zone externe du cortex, synthétise du cortisol, tandis que la zone surrénale fœtale fabrique une hormone stéroïde, le sulfate de DHEA (de déhydroépiandrosterone).

Contrairement au placenta de brebis, celui des primates est dépourvu des enzymes sensibles au cortisol, nécessaires pour transformer la progestérone en estrogènes ; en revanche, le placenta élabore les estrogènes indispensables au déclenchement de l'accouchement à partir du sulfate de DHEA (cela explique pourquoi, à la fin des grossesses humaines, les concentrations en

3. CHEZ LA FEMME, les mécanismes de déclenchement de l'accouchement diffèrent de ceux du mouton : une grande partie de la CRH provient du placenta, et pas seulement du cerveau du fœtus. La CRH agit sur l'hypophyse du fœtus, et les glandes surrénales fœtales synthétisent du cortisol (comme chez le mouton), mais ce cortisol ne déclenche pas la synthèse placentaire des estrogènes nécessaires à l'accouchement. Il favorise la maturation des poumons du fœtus et entretient la synthèse placentaire de la CRH. Lorsque la CRH placentaire et l'ACTH provenant de l'hypophyse du fœtus stimulent les glandes surrénales fœtales, ces dernières produisent du sulfate de déhydroépiandrosterone (sulfate de DHEA), que le placenta transforme en estrogènes.



progestérone ne diminuent pas comme chez la brebis ; le placenta humain ne consommant pas de progestérone pour fabriquer des estrogènes, la progestérone persiste dans le sang de la mère).

La taille relative de la zone surrénale fœtale par rapport à celle du fœtus lui-même augmente de façon différente selon les espèces : tandis que le rapport est maximal vers la fin de la gestation chez la femme et chez le singe rhésus, celui du babouin est maximal au milieu de la gestation. Ensuite cette zone surrénale fœtale grossit moins

vite, et elle finit par disparaître après l'accouchement.

Pendant que j'assistais ainsi à la conférence qui relatait ces phénomènes, je remarquai un parallèle entre l'évolution de sécrétion du sulfate de DHEA et celle de la concentration en CRH placentaire chez les femelles babouins en cours de gestation. Il me semblait que, chez le babouin, la CRH placentaire réglait (directement ou indirectement) la sécrétion du sulfate de DHEA de la zone surrénale fœtale. En était-il de même chez la femme ? Dans cette hypothèse, on aurait

compris l'augmentation tardive de la sécrétion d'estrogènes par le placenta.

De retour au laboratoire, j'ai testé cette hypothèse, et nous avons effectivement montré que le tissu surrénal du fœtus humain contient des récepteurs de la CRH : il est bien sensible à cette hormone. Puis nous avons montré, *in vitro*, que les cellules de la zone surrénale fœtale humaine fabriquent, sous l'action de la CRH, du sulfate de DHEA, et non du cortisol (elles produisent également du sulfate de DHEA sous l'action de l'ACTH produit par l'hypophyse).

L'accouchement : la CRH et les autres

A la naissance, tous les jeunes mammifères n'ont pas atteint le même achèvement. Dans l'espèce humaine, les nouveau-nés abordent la vie extra-utérine dans un état de relative immaturité et de dépendance ; pourtant leur survie dépend de leur degré de maturation. L'organisme maternel sait-il quand le fœtus est prêt à naître et commande-t-il le moment de l'accouchement ? Le fœtus lui-même émet-il un signal qui déclenche la parturition ? Quel est le rôle du placenta et des membranes qui entourent le fœtus ?

Les mécanismes complexes de la parturition humaine ont, pour le moment, échappé à toute tentative simplificatrice. À l'évidence, de nombreux facteurs génétiques, hormonaux et environnementaux interagissent. C'est pourquoi l'hypothèse de Roger Smith, selon laquelle la CRH placentaire aurait un rôle prédominant dans le déclenchement physiologique de l'accouchement, si elle paraît attrayante, est sans doute réductrice.

Un des arguments en faveur de la notion d'horloge placentaire serait l'action de l'enzyme placentaire 11 bêta-hydroxystéroïde deshydrogénase qui, à partir de la mi-gestation, inactive – de façon croissante à mesure que la grossesse progresse – le cortisol d'origine maternelle en cortisone. En fin de grossesse, la diminution du cortisol placentaire a pour conséquence d'activer l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien (les voies qui relient l'hypothalamus, l'hypophyse et les glandes surrénales) du fœtus et, par là même, la synthèse de cortisol fœtal, dont une des actions serait de stimuler la production de CRH placentaire.

Le placenta humain, partenaire à part entière dans le système mère-fœtus, a une forte autonomie dans le contrôle de ses propres fonctions. Ainsi, la synthèse de CRH placentaire ne serait pas uniquement sous la dépendance du cortisol fœtal, mais serait aussi sous celle de divers facteurs également d'origine placentaire. En effet, cette synthèse est activée par des neurotransmetteurs et des neuropeptides, des cytokines (des facteurs du système immunitaires) ou encore des prostaglandines. En revanche, elle est inhibée par le monoxyde d'azote (qui a divers rôles notamment celui d'un neuromédiateur et d'un vasodilatateur) et la progestérone. De même, si la CRH augmente la sécrétion, par les glandes surrénales fœtales, de sulfate de déhydroépiandrostérone (le précurseur des estrogènes produits par le placenta), d'autres substances d'origine

placentaire interviennent localement pour contrôler cette synthèse.

Les mécanismes de déclenchement de la parturition diffèrent notablement d'une espèce à l'autre ; cette diversité est-elle liée à la diversité structurale et fonctionnelle du placenta, selon les espèces, et à la formidable capacité du trophoblaste (un tissu placentaire) à produire une variété considérable de substances biologiquement actives ? Comme la CRH, certaines de ces substances présentent une étroite homologie avec leurs correspondants de l'axe hypothalamo-hypophysaire ; elles contrôlèrent, dans le placenta, la synthèse et la sécrétion de nombreux facteurs de signalisation qui ont, à des degrés divers, des propriétés «facteurs de croissance», immunomodulatrices et contractiles. Ces signaux placentaires, également produits par les autres types cellulaires de l'interface fœto-maternelle, participeraient au développement de l'unité fœto-placentaire et à l'adaptation de l'organisme maternel, notamment de l'utérus, à l'état gestationnel et à la parturition.

Plusieurs équipes, dont la nôtre, travaillent aujourd'hui sur le contrôle de la synthèse de ces facteurs de signalisation et sur leurs fonctions dans leurs nombreuses cibles fœtales et maternelles. Nous nous attachons également à élucider la séquence d'événements qui conduit l'utérus d'un état de relative quiescence pendant la grossesse à l'état hyperactivé qui caractérise la parturition. Par exemple, nous cherchons à savoir comment s'établit la spécificité de la réponse relaxante ou contracturante, si l'on considère la diversité des signaux (catécholamines, neuropeptides, prostaglandines, hormones stéroïdes, etc.) qui sollicitent l'utérus.

Ainsi, même si les résultats des travaux sur la CRH sont intéressants, les mécanismes de déclenchement de l'accouchement sont vraisemblablement plus complexes. Il est probable que d'autres molécules fœtales et placentaires y participent. On se trouve manifestement en présence de systèmes dynamiques, où interviennent de multiples interactions et boucles de régulation, telles que ces signaux sont capables de s'inhiber ou de se potentialiser les uns les autres. Une approche intégrée de tous ces signaux devrait révéler des propriétés imprévisibles qui ne résultent pas de la simple sommation de leurs propriétés individuelles.

Françoise FERRÉ - INSERM U361

Les autres rôles de la CRH

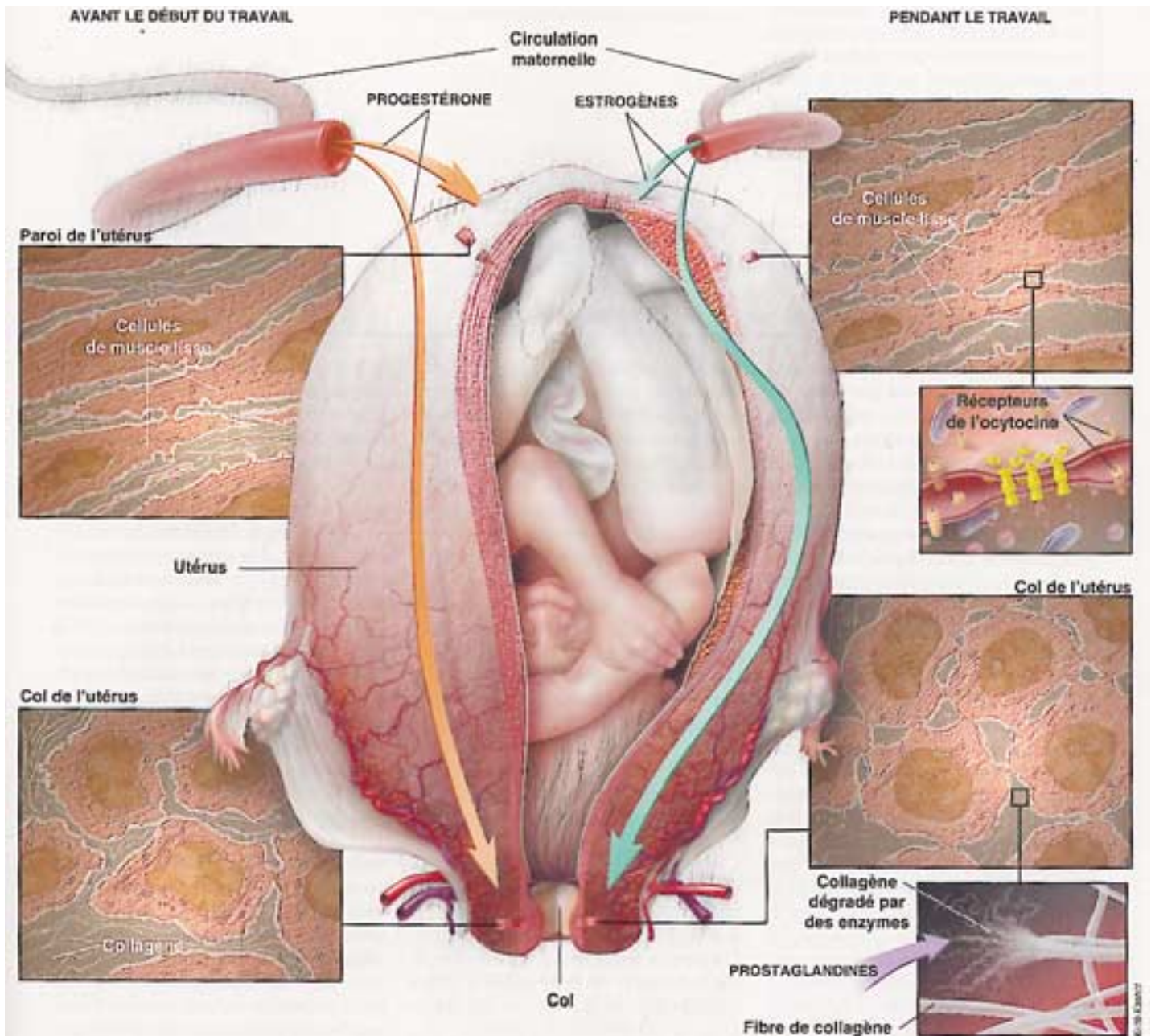
Pour que le travail ne se déclenche qu'au moment où le fœtus est prêt à vivre hors du ventre maternel, le système de déclenchement de l'accouchement doit s'assurer non seulement que les concentrations en estrogènes sont assez élevées, mais aussi que le cortisol a été fabriqué en quantité suffisante pour que la maturation des poumons soit achevée. Apparemment, la CRH placentaire qui

circule dans le sang du fœtus assure les deux tâches : elle stimulerait le relargage d'ACTH par l'hypophyse du fœtus, activant ainsi les glandes surrénales, lesquelles libéreraient alors le cortisol nécessaire à la maturation des poumons. En d'autres termes, la CRH placentaire semble vérifier que le bébé est prêt quand le travail commence.

Selon une autre étude, la CRH ne commande pas seulement la production d'estrogènes par le placenta et la

fabrication de cortisol par les glandes surrénales du fœtus, elle agit aussi directement sur l'utérus et sur le col (d'autres effecteurs interviennent également). Elle amplifierait les modifications déclenchées par les estrogènes et, parfois, compenserait une production insuffisante d'estrogènes.

Ainsi, la CRH maternelle et les estrogènes augmenteraient la concentration en prostaglandines dans le col, ce qui en facilite l'assouplissement. De surcroît,



4. LES ESTROGENES ont plusieurs effets sur l'utérus et sur le col des mammifères en gestation. Dans la plupart des grossesses, la progestérone maternelle permet aux cellules de l'utérus de rester souples, et aux fibres de collagène de sceller hermétiquement le col de l'utérus (voir les détails, à gauche). En fin de grossesse, les concentrations en estrogènes augmentent rapidement, et des récepteurs de l'ocytocine sur les cellules de l'utérus

(l'ocytocine est une hormone qui déclenche la contractions des cellules pendant le travail) (détails en haut, à droite). Les estrogènes déclenchent la libération des connexines, qui relient les cellules, leur permettant de se contracter de façon synchrone pendant le travail. Simultanément, sous l'effet d'autres substances, les prostaglandines, des enzymes qui dégradent le collagène sont produites dans le col, qui se ramollit (détails en bas, à droite).

Crapauds et évolution

A quel moment la CRH est-elle devenue un régulateur du déclenchement de l'accouchement? On l'ignore encore, mais une découverte récente, faite chez les amphibiens, indique que cela fait très longtemps. Le crapaud du désert, *Scaphiopus hammondi*, pond ses œufs dans des mares formées par la pluie. Quand, faute de précipitations, ces mares disparaissent, les têtards se métamorphosent rapidement en crapauds de petite taille (*en haut*). Quand les mares persistent, les têtards se développent plus lentement et grandissent davantage avant de se métamorphoser (*en bas*).

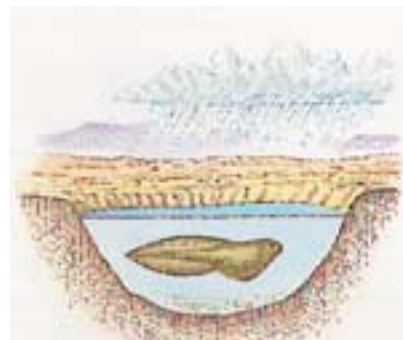
Robert Denver, de l'Université du Michigan, a trouvé que ces effets de l'environnement sont liés à la CRH, produite plus rapidement lorsque l'eau manque. Ainsi, la CRH semble avoir commandé la vitesse de développement avant même l'apparition des mammifères.



Quand les mares s'évaporent...



Quand les mares persistent...



les contractions déclenchées par diverses substances, notamment par une hormone comme l'ocytocine, augmentent quand on ajoute de la CRH à des morceaux de muscle utérin humain.

À l'Université de Warwick, Edward Hillhouse et Dimitri Grammatopoulos ont identifié plusieurs types de récepteurs de la CRH sur les cellules de l'utérus ; leur proportion change au cours de la gestation. Au début de la grossesse, les récepteurs de la CRH déclenchent des réactions intracellulaires qui facilitent normalement la relaxation des cellules musculaires. Ultérieurement, au moment de l'accouchement, les récepteurs de l'utérus favorisent les contractions.

Restent deux questions ouvertes : pourquoi le placenta fabrique-t-il de la CRH, et comment la quantité fabriquée est-elle régulée? On a montré qu'une fois que le placenta commence à libérer de la CRH, le cortisol entretient la sécrétion. Les femmes enceintes qui fabriquent de la CRH en produisent des quantités différentes dès le début de leur grossesse, peut-être en raison de leur alimentation ou des variations génétiques interindividuelles.

Chez la femme, la production placentaire de CRH commence lentement vers la douzième semaine de gestation. Tout d'abord, elle stimule la zone surrénale fœtale et lui fait sécréter de

petites quantités de sulfate de DHEA, que le placenta transforme en estrogènes. Simultanément, la CRH du placenta et, probablement, celle du cerveau fœtal transmettent un signal à une autre région des glandes surrénales, qui se mettent à sécréter un peu de cortisol dans le sang du fœtus. Le cortisol continuerait à stimuler la synthèse placentaire de CRH, formant un système auto-entretenu, où la production de CRH ne cesse jamais ; le circuit fonctionne sans arrêt. Lorsque sont atteints des seuils critiques de concentrations en CRH, en estrogènes, en prostaglandines et, probablement, en divers autres facteurs, l'utérus et le col se modifient, et le travail commence.

L'évolution des systèmes de régulation

Cette description reste incomplète, car on sait, notamment, que le circuit auto-entretenu précédemment décrit n'est pas seul à déclencher l'accouchement. D'autres facteurs, telle la taille du fœtus, interviennent : un bébé arrivé à maturité étire le muscle utérin, ce qui intensifie la sensibilité du muscle aux contractions. L'état nutritionnel du fœtus joue aussi un rôle : on a constaté qu'une brebis privée de nourriture met bas plus rapidement. Le mécanisme en jeu protège le jeune : quand un fœtus est gros et que le placenta vieillit, l'apport nutri-

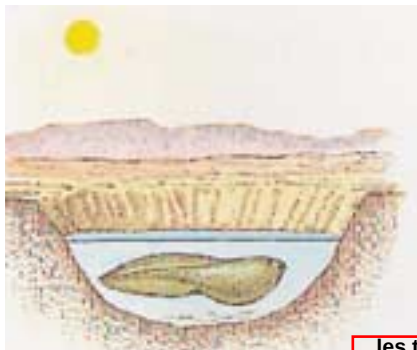
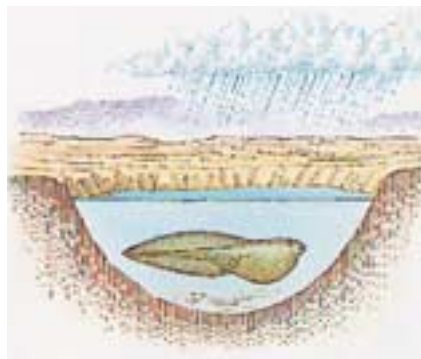
tif peut être insuffisant. Ce même mécanisme se retrouve probablement dans l'espèce humaine, car chez les femmes juives enceintes qui jeûnent le jour de Yom Kippur – et réduisent ainsi l'apport nutritif de leur fœtus –, le nombre d'accouchements est anormalement élevé ce jour-là. L'apport alimentaire insuffisant active-t-il le système de stress du fœtus dont l'hypothalamus se met à fabriquer de la CRH? Cette libération de CRH stimulerait la production d'ACTH et de cortisol, amplifiant l'activité de tout le circuit qui déclenche l'accouchement.

Comme les estrogènes et la CRH augmentent la contractilité de l'utérus, nous pensons que certains mécanismes du système de déclenchement de l'accouchement sont redondants. Ainsi, la CRH pourrait ne jouer qu'un rôle mineur sur l'utérus la plupart du temps, mais devenir primordiale lorsque la fabrication d'estrogènes est insuffisante. Cette redondance serait peut-être beaucoup plus qu'une simple sécurité. Elle permettrait aux systèmes complexes d'évoluer : quand, dans une voie redondante, une modification améliore le fonctionnement d'un organisme, elle est conservée ; au contraire, quand la modification est délétère, une autre voie peut empêcher que cette modification ne devienne fatale.

En collaboration avec d'autres équipes, nous étudions comment le



... les têtards se métamorphosent rapidement.



... les têtards se métamorphosent plus lentement.

système qui commande l'accouchement a évolué : nous essayons notamment de déterminer quand et pourquoi les primates ont des contrôles de la mise bas plus complexes que ceux des autres mammifères.

Nous avons la certitude que la CRH est un élément essentiel du développement depuis très longtemps, sans doute avant même l'apparition des mammifères. Ainsi, Robert Denver, de l'Université du Michigan, a mis en évidence l'influence de la CRH sur la vitesse de développement et de métamorphose des têtards du crapaud du désert, *Scaphiopus hammondi* (voir l'encadré ci-dessus).

La prévention des accouchements prématurés

Aussi fascinantes que soient les questions sur l'évolution de ces systèmes, l'étude du déclenchement de l'accouchement a un objectif primordial : la prévention des accouchements prématurés. Plusieurs options thérapeutiques résultent déjà de l'amélioration de la compréhension des systèmes de régulation de l'accouchement chez la femme.

Avec d'autres équipes nous testons l'efficacité d'inhibiteurs de la CRH afin de prévenir les accouchements prématurés. Nous avons récemment montré qu'un antagoniste de la CRH,

l'antalarmine, retarde la mise bas chez la brebis. Si cet antagoniste est efficace et sans danger chez les primates, on le testera chez des femmes qui risquent d'accoucher avant terme. On teste aujourd'hui des antagonistes de l'ocytocine, et quelques résultats préliminaires semblent montrer l'efficacité des inhibiteurs de la prostaglandine.

On cherche aussi à dépister les femmes à risque. On mesure les concentrations en CRH dans le sang maternel, et on cherche d'autres marqueurs significatifs d'un dysfonctionnement. Nous étudions, par exemple, si une augmentation des enzymes qui dégradent le collagène du col révélerait les femmes enceintes susceptibles d'accoucher avant terme. Nous avons aussi montré que la

concentration en CRH maternelle indiquerait les chances de succès d'un déclenchement artificiel du travail : le déclenchement réussit plus facilement chez les femmes dont les concentrations en CRH sont élevées que chez celles qui ont peu de CRH.

Des tests d'identification des femmes risquant d'accoucher prématurément seront un jour disponibles. Simultanément, on peut chercher des substances qui modifient la production de CRH ou qui ralentissent l'horloge placentaire commandant l'accouchement. Fondamentales ou appliquées, les recherches ont le même objectif : donner à davantage d'enfants la chance de naître sans les handicaps physiques ou mentaux qui sont trop souvent associés à une naissance avant terme.

Roger SMITH est professeur d'endocrinologie à l'Université de Newcastle, en Australie.

Transmettre la vie à l'aube du XXI^e siècle : de la fécondation à la naissance, sous la direction de Françoise Ferré, Dossiers documentaires INSERM-Nathan, 1994.

Mark MCLEAN et al., *A Placental Clock Controlling the Length of Human Pregnancy*, in *Nature Medicine*, vol. 1, n° 5, pp. 460-463, mai 1995.

Stuart KAUFFMAN, *At Home in the Universe : The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*, Penguin Books, 1995.

C.A. MECENAS et al., *Production of Premature Delivery in Pregnant Rhesus Monkeys by Androstenedione Infusion*, in *Nature Medicine*, vol. 2, n° 4, pp. 443-448, avril 1996.

F. FERRÉ, *À quoi servent les hormones de la grossesse ?*, in *Gynécologie internationale*, tome 7, n° 4, pp. 93-96 et n° 5, pp. 137-142, 1998.

La visualisation de l'embryon humain

BRADLEY SMITH

La microscopie par résonance magnétique révèle les secrets de l'embryon au cours de son développement.

Les images d'embryons humains obtenues par microscopie par résonance magnétique sont fascinantes. Ces images, obtenues au Centre de microscopie de l'Université de médecine Duke, permettent de voyager, par ordinateur interposé, à travers tout un organisme humain qui se forme.

Ces images sont précieuses pour les biologistes qui cherchent à comprendre les étapes du développement normal et pathologique, ainsi que les facteurs qui les commandent. Jusqu'à présent, l'embryologie se fondait essentiellement sur des coupes d'embryons d'animaux normaux et d'animaux génétiquement modifiés. Pour améliorer le diagnostic des anomalies congénitales et leur traitement, on doit relier les informations tirées des modèles animaux aux stades correspondants de l'embryon humain.

En 1996, j'ai commencé une collection d'images virtuelles, fabriquées

à partir de la collection d'embryons humains conservée au Musée de la médecine de l'Institut de pathologie des forces armées, à Washington. Elle rassemble des embryons humains à tous les stades du développement : des embryons de un jour, de plusieurs semaines, ou encore des fœtus à des stades précoces (un embryon devient un fœtus à huit semaines). Le plus petit mesure environ 0,2 millimètre, et le plus grand une trentaine de millimètres. Ces embryons, qui proviennent de fausses couches et d'avortements, ont été rassemblés entre 1887 et 1917 par l'embryologiste Franklin Paine Mall. Aujourd'hui, la collection contient aussi des embryons découverts lors d'autopsies pratiquées sur des femmes qui étaient enceintes au moment de leur décès.

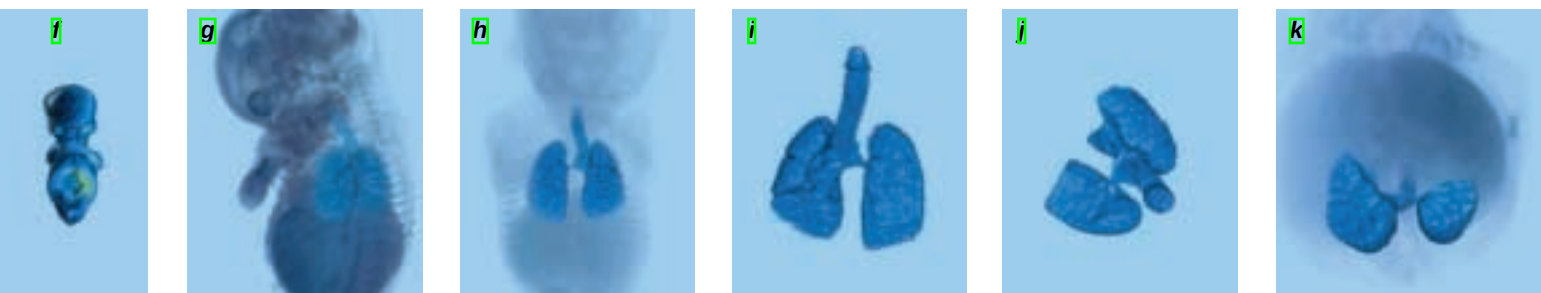
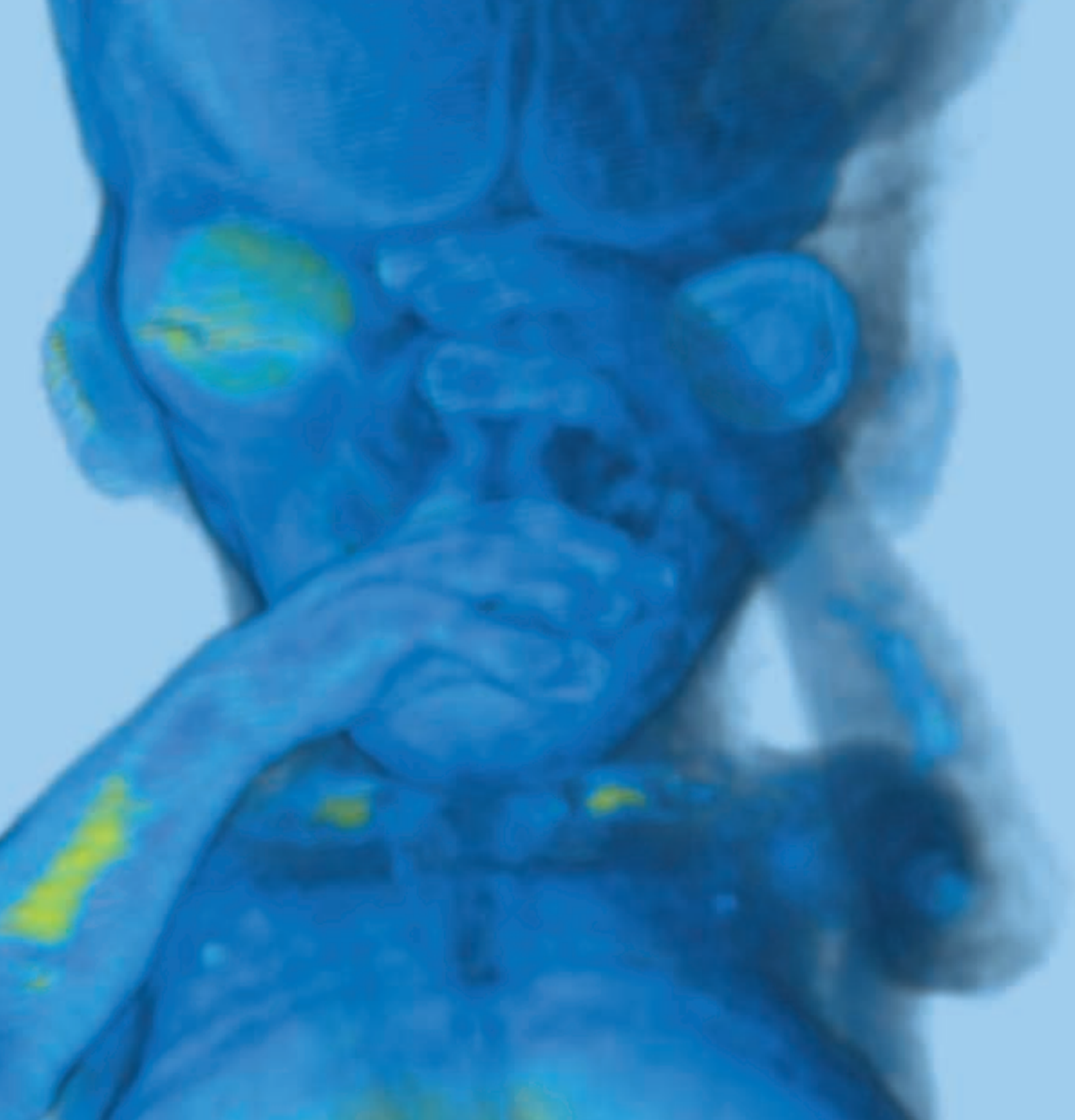
Pour préparer des images par microscopie par résonance magnétique, nous avons utilisé ces embryons,



1. UN FŒTUS HUMAIN DE 64 JOURS a été visualisé par microscopie par résonance magnétique et par microscopie optique classique (petit cartouche ci-dessus). À ce stade, l'embryon mesure environ 30 millimètres. Les techniques de visualisation assistée par ordinateur peuvent rendre certaines régions de l'embryon transparentes, tout en gardant d'autres zones opaques. En réglant ainsi l'opacité, on voit des structures internes à des profondeurs variées, dans leur contexte naturel et sans endommager l'échantillon (a – c). On peut faire des agrandissements, faire tourner l'embryon ou l'éloigner (d – f) ; on peut également utiliser un procédé de segmentation pour visualiser les organes, par exemple les poumons (g – k).



PHOTOGRAPHIES DE BRADLEY SMITH



à partir du 22^e jour après la conception, lorsqu'apparaît le premier arc pharyngé, qui deviendra une partie de la mâchoire, jusqu'à la fin de la neuvième semaine. Les résultats de ce travail seront bientôt à la disposition des embryologistes et des médecins – ainsi que du grand public – sur le site Internet *Multidimensional Human Embryo* (c'est-à-dire l'embryon humain en trois dimensions). Les premières données y sont déjà présentées, le reste le sera vers le mois de juin 2000.

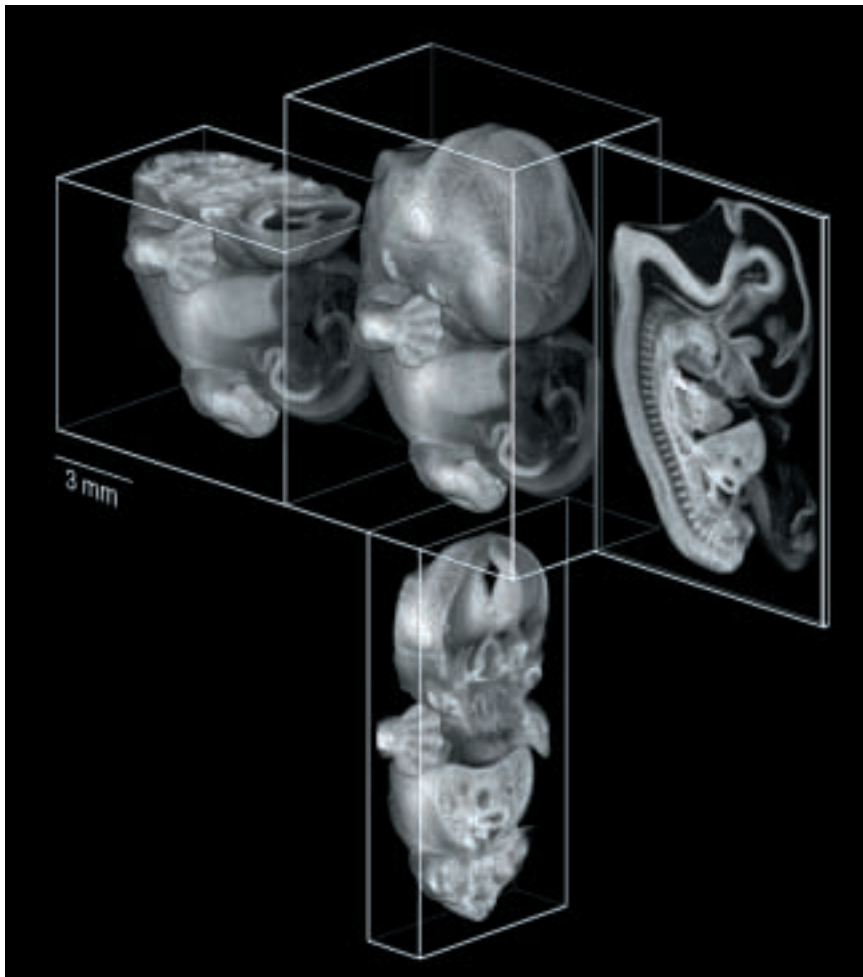
Pour réaliser ces images, j'ai placé les flacons contenant les embryons dans un aimant supraconducteur. L'appareil est analogue à ceux que l'on utilise pour l'imagerie par résonance magnétique (IRM) pratiquée dans de nombreux hôpitaux. Comme l'IRM, la technique de microscopie par résonance magnétique utilise des ondes radio pour exciter les noyaux des atomes d'hydrogène (ou protons) présents dans les molécules d'eau contenues dans les tissus ; les ondes radio réémises par ces protons révèlent leur présence (les aimantations des protons

s'alignent sur le champ magnétique appliqué ; puis on perturbe cet arrangement et l'on enregistre le courant électrique induit dans des bobines par les champs magnétiques des protons qui reviennent à leur état d'équilibre). La microscopie par résonance magnétique montre des détails avec une précision qui serait inutile pour un diagnostic médical : alors que l'imagerie par résonance magnétique donne des images dont la résolution spatiale est égale à un millimètre cube, la microscopie par résonance magnétique détecte des détails un million de fois plus petits. On atteint cette résolution grâce à des aimants plus puissants, qui exercent des gradients de champ magnétique supérieurs, et à des dispositifs d'imagerie adaptés aux échantillons minuscules.

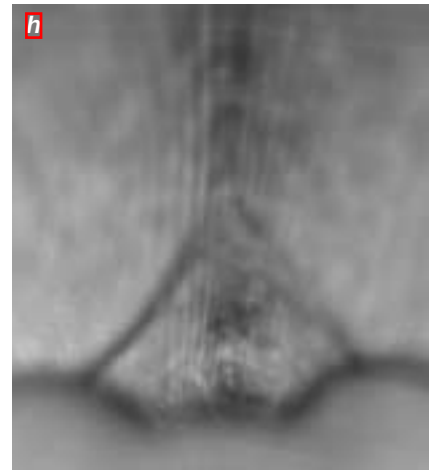
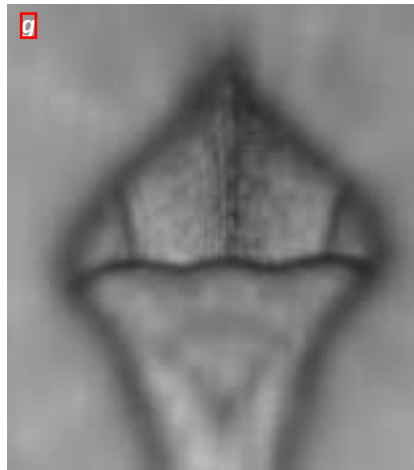
Les techniques de microscopie par résonance magnétique qui ont été mises au point à l'Université Duke n'endommagent absolument pas les embryons (au contraire, avec des microscopes classiques, il aurait fallu découper les échantillons en centaines

de coupes minces). On obtient des images d'embryons en trois dimensions en moins de deux heures, ce qui est sans aucune comparaison avec les centaines d'heures requises pour la reconstruction tridimensionnelle à partir de la microscopie optique.

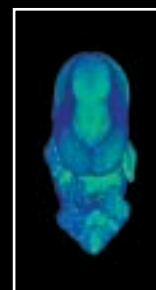
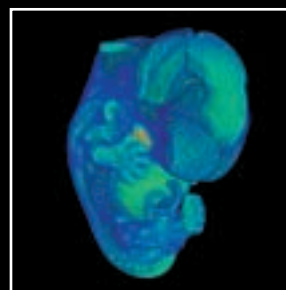
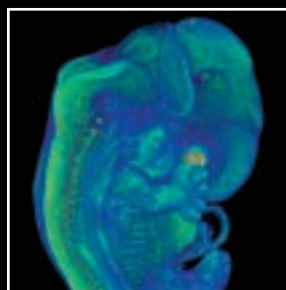
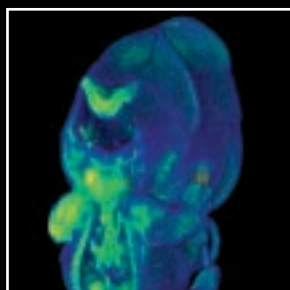
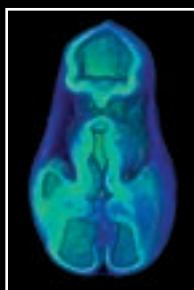
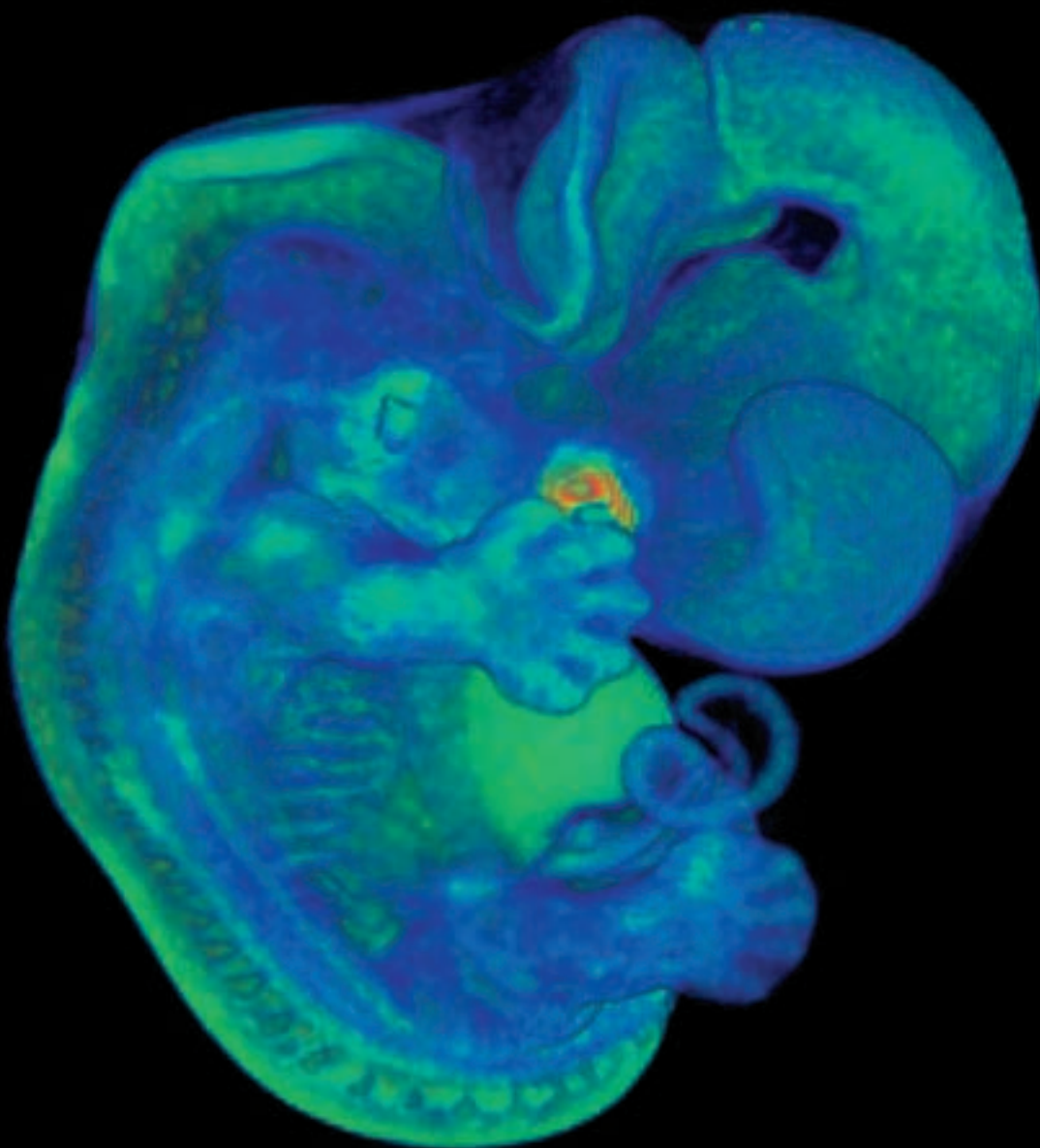
Les informaticiens utilisent des logiciels de reconstruction pour obtenir des images de qualité : nous avons utilisé un logiciel de reconstruction de volume et combiné les images de microscopie par résonance magnétique (128 images contenant 256×256 pixels) ; nous avons formé un réseau cubique de 8,4 millions de voxels (le voxel est l'élément de volume). Chaque voxel représente une minuscule portion de l'embryon. Le logiciel nous permet de faire tourner la matrice des voxels, d'éliminer certaines couches de voxels ou, même, d'ajouter des couleurs ou d'ajuster les intensités. Nous utilisons des algorithmes informatiques pour «éclairer» virtuellement l'embryon de l'arrière vers l'avant : les «rayons lumineux» sont plus ou moins absorbés par les voxels



2. DES COUPES TRIDIMENSIONNELLES révèlent des détails extrêmement fins de l'intérieur d'un embryon humain – ici âgé de 44 jours (*ci-dessus en microscopie optique*). L'embryon, d'une dizaine de millimètres, a encore des doigts et des orteils palmés, mais son cerveau est déjà divisé en deux hémisphères ; les structures qui formeront les vertèbres (*la structure qui ressemble à des pointillés sur la vue de droite*) et divers organes sont présents. La microscopie par résonance magnétique montre des embryons sous différents angles sans les endommager.



3. TUBE NEURAL d'un embryon humain de 47 jours (en haut, à l'extrême gauche, photographié par microscopie optique, dans son sac amniotique). Sur les images numériques, on voit le tube neural qui formera le cerveau et la moelle épinière : on peut faire tourner l'embryon sur lui-même (séquence a-c) et pénétrer dans le tube neural (d) pour un voyage virtuel dans les vésicules céphaliques, qui deviendront les ventricules du cerveau. La séquence se poursuit par le cerveau postérieur, le quatrième ventricule et le cerveau moyen (séquence e-h), avant de quitter le ventricule (séquence i-j) pour atteindre les hémisphères cérébraux.



4. LA COLORATION ARTIFICIELLE des images obtenues par résonance magnétique met en valeur certaines structures, par exemple les organes qui se développent chez l'embryon humain de 47 jours. Sur ces images colorées, la rétine apparaît en jaune orangé ; le

foie, dans l'abdomen, est vert clair et l'ébauche de l'oreille, au-dessus de l'épaule, également. On y voit aussi les côtes cartilagineuses, sous le bras, et une légère diminution des palmes entre les doigts.



5. UN EMBRYON DE 41 JOURS (en haut, à gauche, en microscopie optique, avec son sac vitellin) a des tissus bien différenciés, qui apparaissent de diverses façons sur ces images obtenues par trois techniques différentes de microscopie par résonance magnétique. Selon les tissus, l'eau interagit différemment avec les molécules environnantes : ces trois techniques montrent l'eau à l'intérieur des échantillons, selon la nature de ces interactions. Les méthodes dites de pondération en T1 et en T2 sont deux façons de suivre comment les champs magnétiques des protons de l'eau excités par des ondes radio s'alignent avec un champ magnétique appliqué à l'échantillon. La méthode de pondération en T1 montre surtout les principaux vaisseaux sanguins, les compartiments du cœur et le foie. L'image par la méthode de pondération en T2 révèle les tissus qui ne font pas partie du système cardio-vasculaire, mais on n'observe aucun contraste. L'image obtenue par la méthode de pondération en diffusion est fondée sur le fait que, dans de nombreux tissus, l'eau diffuse mieux dans une direction que dans les autres ; elle est particulièrement utile pour l'étude des structures du système nerveux, notamment du cortex cérébral (les minces liserés blancs, en haut et à droite de l'image inférieure de droite).

qu'ils rencontrent, et ils forment une image contrastée sur l'écran de visualisation de l'ordinateur. Le logiciel nous permet de découper des images virtuelles dans toutes les directions et, même, de rendre les surfaces transparentes et de visualiser les structures internes. Nous pouvons isoler un organe pour l'examiner et le mesurer.

L'embryon virtuel sur le réseau Internet donnera aux chercheurs du monde entier de précieuses informations sur les embryons, et il leur permettra de s'entraîner pour mieux détecter des anomalies du développement par échographie ou par imagerie par résonance magnétique. Il mettra aussi des images de grande qualité à la disposition des biologistes

qui ne sont pas spécialisés en embryologie et des étudiants qui apprennent l'anatomie de l'embryon. Cette technique d'imagerie participera à la sauvegarde d'une collection exceptionnelle d'embryons humains.

Bradley SMITH est professeur dans le département de radiologie de la faculté de médecine Duke, à Durham.

Raymond F. GASSER, *Atlas of Human Embryos*, Harper & Row, 1975.

Ronan O'RAHILLY et Fabiola MÜLLER, *Developmental Stages in Human Embryos : Including a Revision of Stree-ter's Horizons and a Survey of the Car-negie Collection*, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., 1987.

Les éclipses de Soleil

PIERRE GUILLERMIER • SERGE KOUTCHMY

Spectacle naturel extraordinaire, les éclipses restent un moyen unique d'étudier la couronne, l'atmosphère chaude qui ceinture le Soleil.

Le 11 août 1999, vers midi, le Soleil disparaîtra durant deux minutes, révélant la couronne qui entoure le disque solaire. Si la compréhension des mouvements de la Lune et de la Terre a apaisé les peurs ancestrales, nous restons émus lors de ces rares instants où le Soleil prend un aspect insolite et terrifiant. Les éclipses sont des spectacles grandioses qui attirent des milliers de passionnés sur les sites d'observation privilégiés par le passage de l'ombre de la Lune en plein jour.

Les éclipses de Soleil résultent du passage de la Lune entre le Soleil et la Terre. L'ombre de la Lune se projette alors sur la Terre, créant une tache d'ombre qui se déplace à quelques milliers de kilomètres par heure. En un lieu donné de la Terre, il se produit une éclipse totale tous les 370 ans : le spectacle est rare. Une seule fois au cours du XX^e siècle, l'ombre d'une éclipse totale de Soleil a traversé la France : le 15 février 1961 (en 1912, il y eut une éclipse presque totale). L'éclipse du 11 août 1999, la dernière du millénaire, se produira, en France, au milieu de la journée : le Soleil sera donc haut sur l'horizon. Les circonstances de cet événement ont été calculées depuis longtemps à la seconde près et, au sol, au kilomètre près.

Révélatrices de l'extraordinaire précision de la mécanique céleste, les éclipses totales de Soleil dévoilent aussi des parties du Soleil autrement inaccessibles : la chromosphère et la couronne, atmosphères ténues de gaz chauds qui se déversent en permanence dans le milieu interplanétaire (voir la figure 1). Certes, avec les sondes spatiales ou les instruments de radioastronomie, on observe la couronne en continu, mais de nombreux astrophysiciens considèrent encore que les éclipses sont des moments privilégiés : ce sont des instants où les parties de la couronne révélées diffèrent de celles observées par les sondes.

Après avoir examiné les conditions d'une éclipse de Soleil, nous détaillons les phénomènes que l'on observe du sol et, notamment ceux que l'on doit attendre lors de l'éclipse du 11 août prochain. Enfin, nous verrons comment l'étude des éclipses nous renseigne sur les mécanismes de chauffage de la couronne et sur l'élaboration des structures observées.

Les conditions géométriques

L'orbite de la Lune autour de la Terre est une ellipse. Au cours de son mouvement autour de la Terre, la Lune vient se placer à l'opposé du Soleil par rapport à la Terre, et elle est alors entièrement éclairée : c'est la pleine Lune. À l'inverse, lorsque la Lune se trouve entre la Terre et le Soleil, on ne voit plus sa face éclairée : c'est la nouvelle Lune. En éclairant une planète, le Soleil produit un cône d'ombre entouré de pénombre. Lorsque la Terre passe dans le cône d'ombre ou de pénombre de la Lune, il se produit une éclipse de Soleil : de la Terre, on ne voit plus du tout le Soleil (cône d'ombre) ou bien on n'en voit qu'une partie (cône de pénombre). Ainsi, les éclipses de Soleil se produisent au voisinage de la nouvelle Lune, lorsque la Lune est entre la Terre et le Soleil.

Pourquoi n'y a-t-il pas d'éclipse de Soleil à chaque nouvelle Lune, à peu près tous les mois ? Parce que l'orbite lunaire est inclinée de cinq degrés environ par rapport au plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil (l'écliptique). L'orbite de la Lune coupe donc l'écliptique en deux points opposés nommés nœuds. Tantôt la Lune est au-dessous du plan de l'écliptique, tantôt au-dessus : elle n'intercepte alors pas la lumière du Soleil.

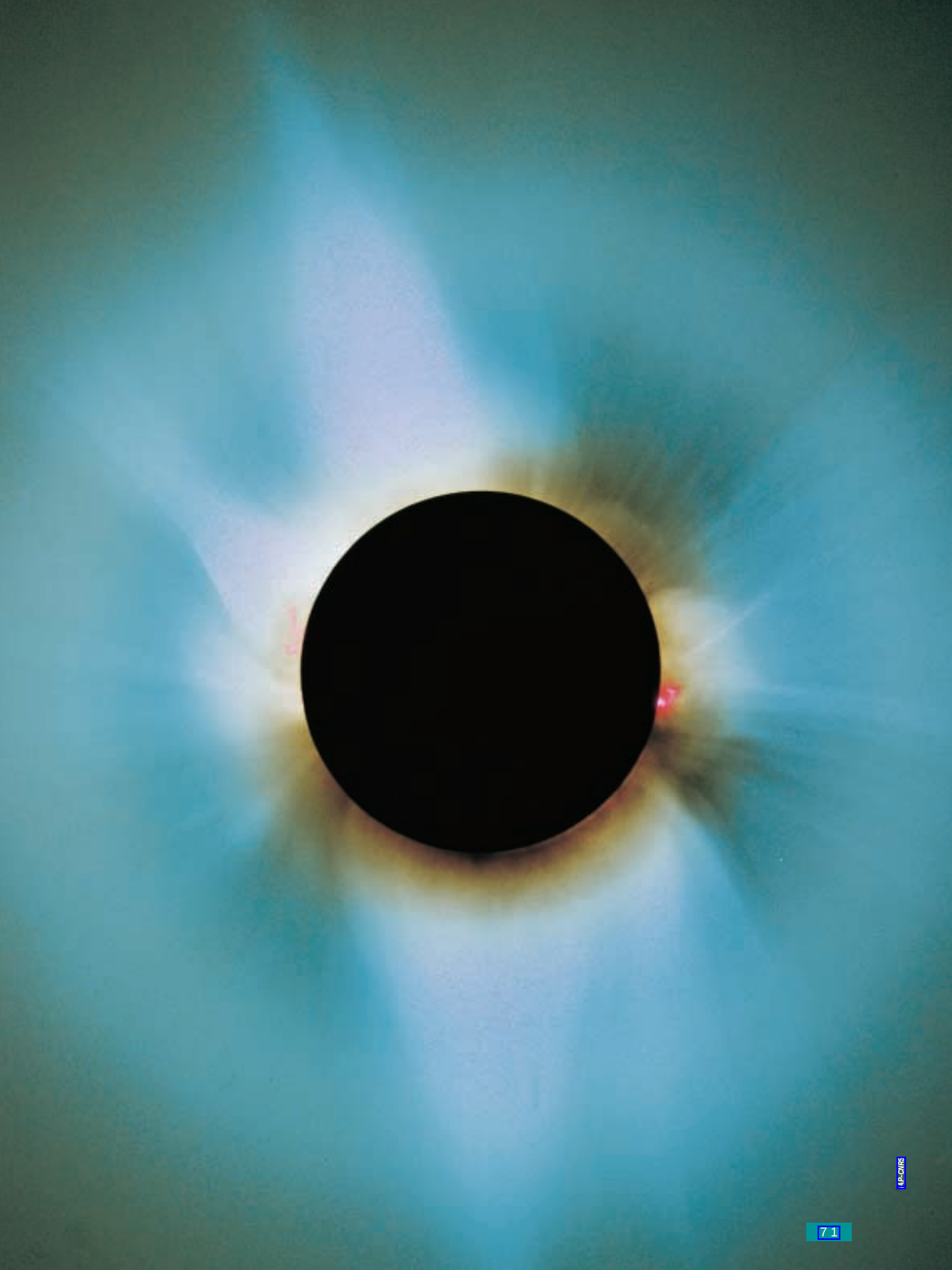
Pour qu'il y ait une éclipse de Soleil, il faut que deux conditions soient réunies : la Lune doit être nouvelle et

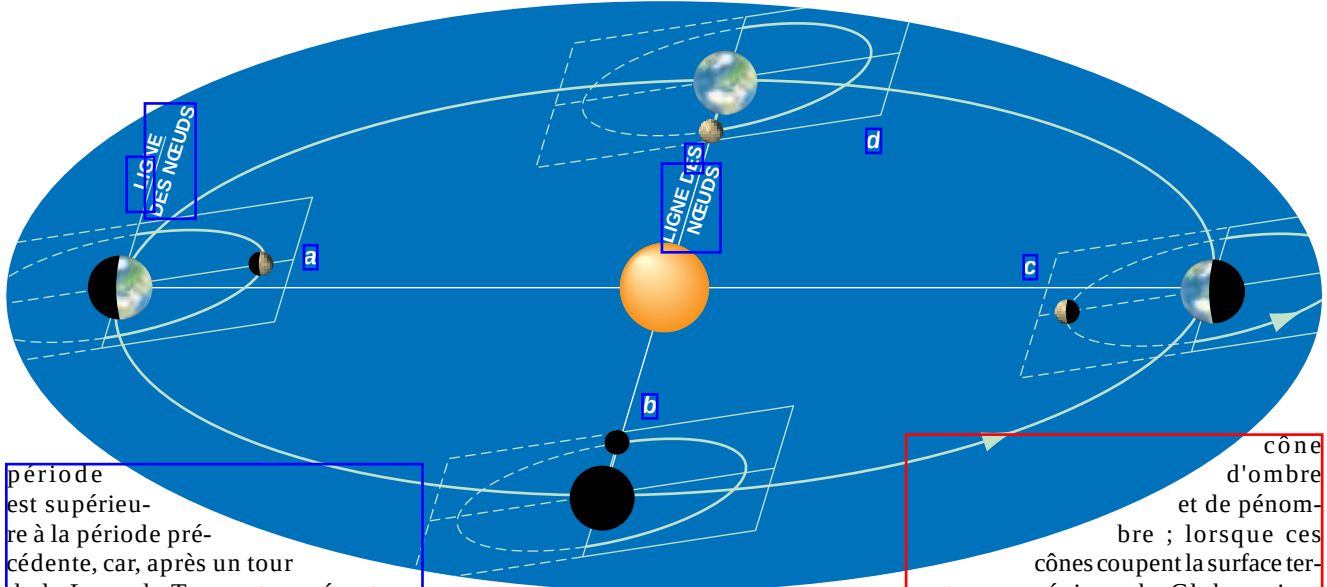
elle doit être au voisinage d'un nœud. Or, la ligne des nœuds est orientée vers le Soleil tous les six mois environ (voir la figure 2). Ainsi, tous les six mois il se produit une éclipse de Soleil, car, à la période de passage du Soleil au voisinage d'un nœud, il y a au moins une nouvelle Lune. Au même passage, on peut même avoir une seconde éclipse, car, à la lunaison suivante, le Soleil ne s'est parfois pas trop éloigné du nœud.

Chaque année, on observe de la Terre au moins quatre éclipses, dont nécessairement deux de Soleil et deux de Lune (les éclipses de Lune se produisent à la pleine Lune, lorsque la Terre est entre la Lune et le Soleil) ; le nombre maximum d'éclipses par an est de sept et, dans ce cas, il y aura encore deux éclipses de Soleil et deux éclipses de Lune ; pour les trois éclipses restantes, toutes les combinaisons sont possibles.

Outre cette périodicité annuelle, on peut calculer la période de retour des mêmes conditions d'une éclipse, c'est-à-dire quand la Lune sera au même nœud de son orbite avec la même phase. C'est la période entre deux éclipses identiques. La période de retour de la Lune au nœud ascendant de son orbite est de 27 jours 5 heures et 5 minutes. La période de lunaison, qui s'écoule entre deux phases identiques de la Lune, est égale à 29 jours 12 heures et 44 minutes, c'est par exemple la période entre deux nouvelles lunes. Cette

1. LE 11 JUILLET 1991, l'ombre de la Lune passe sur le site de l'Observatoire de Hawaï. À l'aide d'un télescope de 20 centimètres de diamètre, les astronomes prennent ce cliché de la couronne solaire. Un filtre neutre d'atténuation radiale absorbe fortement les zones brillantes, les plus proches de la surface solaire, de sorte que les zones faibles de la couronne, les plus lointaines, apparaissent. Celles-ci sont déviées par rapport au plan équatorial (horizontal) en raison des fortes éruptions du Soleil à cette période. Telles des langues de feu, deux protubérances de gaz s'échappent de la surface (en rouge).





période est supérieure à la période précédente, car, après un tour de la Lune, la Terre a tourné autour du Soleil, de sorte qu'environ deux jours supplémentaires sont nécessaires pour que la Lune retrouve sa position par rapport au Soleil. Le retour des mêmes conditions favorables à une éclipse se fera pour un multiple commun à ces périodes : c'est 223 lunaisons, soit 18 ans 10 jours (ou 11 jours si cette période s'étend sur cinq années bissextiles) et 8 heures. Cette période n'est pas un nombre exact de jours, et, la fraction de jour étant d'environ un tiers de jour (8 heures), les mêmes éclipses se reproduisent 18 ans et 10 jours après, mais avec un décalage en longitude d'environ 120 degrés.

Au cours de ce cycle, nommé Saros, on observe en moyenne le même nombre d'éclipses. Toutefois, en raison des irrégularités du mouvement de l'orbite lunaire, la succession du type des éclipses n'est pas conservée. Durant un Saros, il y a en moyenne 84 éclipses (42 de Soleil et 42 de Lune), qui se répartissent, pour les éclipses de Soleil, de la façon suivante : 14 éclipses partielles et 28 éclipses totales. On distingue des Saros pauvres, avec un petit nombre d'éclipses (78 éclipses), et des Saros riches, avec un grand nombre d'éclipses (94 éclipses).

Coïncidence cosmique

Lors d'une éclipse totale, le Soleil, caché derrière la Lune, disparaît. Ce phénomène est dû à une coïncidence : la Lune est 400 fois plus petite que le Soleil, mais elle est également 400 fois plus proche, de sorte que, vu de la Terre, leur diamètre apparent sont voisins. Les variations de diamètre apparent de ces deux astres résultent des variations de distance entre la Terre et le Soleil, ainsi qu'entre la Terre et la Lune (le diamètre apparent du Soleil est compris entre

2. LA LIGNE DES NŒUDS est l'intersection du plan de l'orbite terrestre autour du Soleil et du plan de l'orbite lunaire. Une éclipse ne peut se produire que lorsque la ligne des nœuds est orientée vers le Soleil. Si, vue de la Terre, la Lune passe au-dessus du Soleil (a), il faut attendre trois mois pour qu'elle puisse passer devant le Soleil (b). Trois mois plus tard, la Lune passe au-dessous du Soleil (c) et, trois mois plus tard encore, elle peut de nouveau passer devant le Soleil (d). Ainsi, il faut attendre environ six mois entre deux éclipses.

31' 31" et 32' 35", tandis que celui de la Lune est compris entre 29' 22" et 33' 31").

Dans son mouvement autour de la Terre, la Lune peut donc occulter totalement le Soleil un bref instant. L'éclipse est alors totale. Lorsque le diamètre apparent de la Lune est légèrement inférieur à celui du Soleil, il subsiste un anneau de lumière solaire autour du disque noir de la Lune : l'éclipse est annulaire. Lorsque le disque solaire n'est que partiellement masqué, l'éclipse est partielle.

Cette coïncidence est d'autant plus extraordinaire qu'elle est unique dans l'espace et dans le temps. Unicité spatiale, car la Terre est la seule planète du Système solaire sur laquelle les éclipses totales de Soleil existent. Unicité temporelle, car, en raison de l'éloignement progressif de la Lune dû à la dissipation par les marées, nous vivons les quelques millions d'années de l'histoire de la Terre où la distance Terre-Lune est exactement celle nécessaire au recouvrement total de l'astre du jour par la Lune. Il y a des millions d'années, la Lune, trop proche, cachait la couronne et, dans des millions d'années, trop éloignée, notre satellite ne cachera plus la totalité du disque solaire.

Les éclipses résultent ainsi d'un singulier jeu d'ombre et de lumière. La Lune, éclairée par le Soleil, projette un

cône d'ombre et de pénombre ; lorsque ces cônes coupent la surface terrestre, ces régions du Globe voient une éclipse de Soleil, totale là où passe le cône d'ombre, partielle là où passe la pénombre (voir la figure 3).

Combien de temps une éclipse dure-t-elle ? Cela dépend de l'alignement des astres, de leur distances et de la vitesse de la Lune sur son orbite, laquelle est minimale à l'apogée (lorsque la Lune est au plus loin de la Terre) et maximale au périgée (lorsque la Lune est au plus près). La durée maximale d'une éclipse de Soleil, c'est-à-dire la durée maximale pendant laquelle une partie de la Terre intercepte l'ombre ou la pénombre de la Lune est comprise entre 5h 15 pour une éclipse au périgée et 6h 15 pour une éclipse à l'apogée.

En un lieu donné de la Terre, la durée d'une éclipse totale, c'est-à-dire la durée pendant laquelle le Soleil est complètement masqué, varie selon les positions relatives des astres. Cette durée est longue lorsque la Terre est le plus loin du Soleil (le diamètre apparent du Soleil est alors le plus petit) et que la Lune est au plus près de la Terre (son diamètre apparent est alors le plus grand). Dans ce cas, l'ombre formée est maximale, et la phase de totalité dure 7 minutes et 30 secondes.

La trajectoire de l'ombre et celle de la pénombre lunaire sont des courbes de plusieurs milliers de kilomètres de longueur. La tache d'ombre a, au plus, un diamètre de 262 kilomètres et se déplace à la vitesse de 3 380 kilomètres par heure près des pôles et à la vitesse minimale de 1 706 kilomètres par heure à l'équateur. Le déplacement d'Ouest en Est de la tache résulte du fait que la vitesse de la Lune sur son orbite (3 600 kilomètres par heure), d'Ouest en Est, est bien supérieure à la vitesse de rotation de la Terre sur elle-même, d'Est en Ouest (un point à l'équateur faisant un tour, soit

40 000 kilomètres, en 24 heures, sa vitesse est d'environ 1 600 kilomètres par heure). Ainsi, la tache d'ombre décrit sur le Globe terrestre, une bande dont la ligne médiane est la ligne de centralité. De part et d'autre de la bande d'ombre, la pénombre touche une zone d'environ 3 000 kilomètres de largeur.

Aujourd'hui, la prédiction des éclipses est faite à l'aide de modèles qui décrivent bien les mouvements de la Terre et de la Lune. On prédit très précisément les dates et les lieux des prochaines éclipses (voir la figure 4). Toutefois, de petites irrégularités du mouvement de la Terre empêchent les prédictions des lieux au-delà de plusieurs siècles (voir *Éclipses et chronologie*, par Denis Savoie, page 78).

Le scénario de l'éclipse

Une éclipse totale est marquée par trois périodes. Durant la première période, la Lune masque partiellement le Soleil, puis, durant quelques minutes, c'est la totalité. Enfin, durant la dernière période, la Lune rend au Soleil son aspect circulaire.

Le premier contact, qui marque le début de l'éclipse, est l'instant où l'on distingue une infime fraction de la Lune devant le Soleil. En pratique, à l'aide d'un filtre solaire, on observe une fine échancrure noire sur la bordure du Soleil. Durant une heure environ, la Lune masque de plus en plus le disque

solaire. Ce changement est essentiellement dû au déplacement orbital de la Lune autour de la Terre. Après que 50 pour cent du Soleil a été masqué, la baisse de luminosité devient sensible, mais lente. Avec la diminution de la surface solaire non masquée, les ombres apparaissent plus contrastées, et les reflets du Soleil sur l'eau sont plus étincelants qu'à l'habitude. La baisse de luminosité fait apparaître le ciel d'un bleu intense et profond.

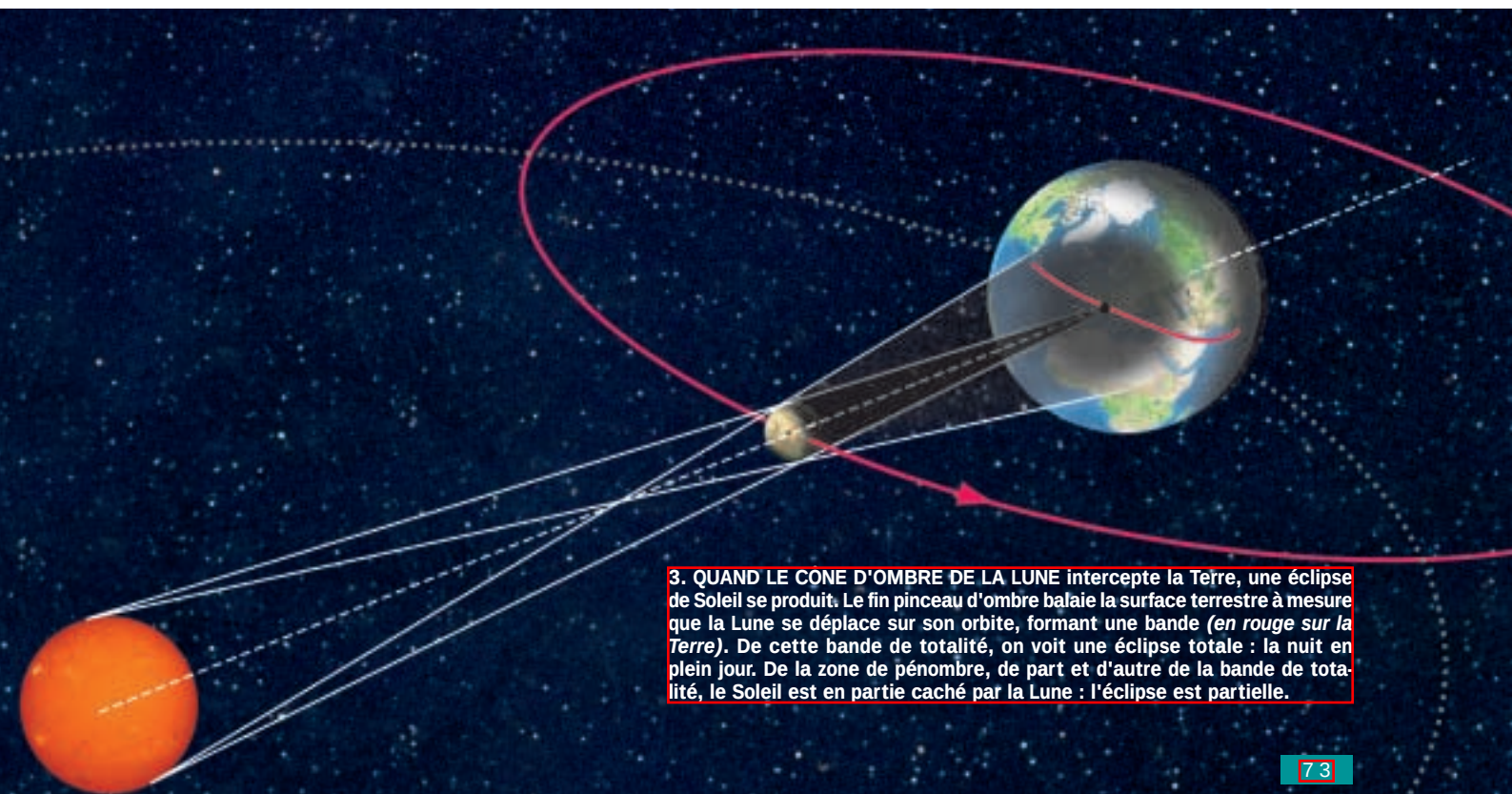
Une à deux minutes avant la totalité, les ombres volantes apparaissent : ce sont des stries sombres et claires qui courent sur le sol (on les distingue mieux sur une grande surface lisse, tel un mur). Ces ombres résultent de la turbulence de la haute atmosphère : lorsque seul un point de Soleil nous éclaire, sa lumière parvient d'une direction bien définie. La direction des rayons lumineux est alors très sensible à la turbulence atmosphérique : le paysage se couvre de moires furtives, analogues aux reflets que l'on perçoit sur le fond d'une piscine agitée par le vent.

Entre 40 et 20 secondes avant la totalité, la lumière émanant du fin croissant solaire est arrêtée par les hauts cratères lunaires, mais de la lumière passe encore à travers les vallées lunaires. Le bord de la Lune ressemble alors à un collier de diamants solaires, nommés grains de Baily, du nom de l'astronome anglais qui décrit le premier ce phénomène, en 1836.

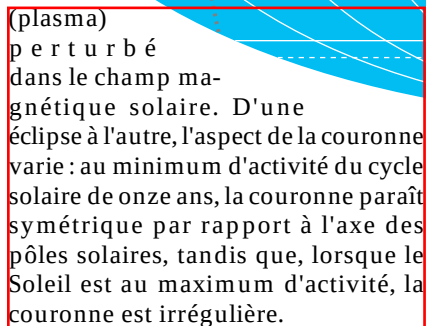
Entre 20 et 10 secondes avant la totalité, venant de l'horizon Ouest, un mur d'obscurité qui s'élève jusqu'au ciel se précipite sur le site d'observation à une vitesse supersonique. L'ombre de la Lune vous enveloppe, c'est l'un des instants les plus spectaculaires d'une éclipse. Cinq à trois secondes avant la totalité, le dernier rayon de lumière fait apparaître un anneau de lumière fantomatique. La chromosphère rose et surtout les protubérances commencent à apparaître. Enfin, la Lune recouvre complètement le disque solaire : c'est le début de la totalité (ou le deuxième contact).

C'est seulement lors de cette phase de totalité qu'il est possible (et même recommandé) de regarder l'éclipse à l'œil nu en toute sécurité, et c'est pendant ces précieux instants que l'on étudie la couronne solaire. Les protubérances, condensations de gaz en mouvement, portées par le champ magnétique solaire, sont alors observables, avec des jumelles par exemple. Ces langues rouges sont souvent visibles juste avant le début et juste après la fin de la totalité, car, au milieu de la totalité, pour des éclipses longues (totalité de plus de cinq minutes), le disque lunaire apparent peut être suffisamment vaste pour masquer la plupart des protubérances.

Dès que la vision est adaptée à la semi-obscurité de la totalité, la couronne apparaît, ressemblant à une fleur aux pétales blancs avec un capitule noir. La couronne est un gaz très chaud



3. QUAND LE CÔNE D'OMBRE DE LA LUNE intercepte la Terre, une éclipse de Soleil se produit. Le fin pinceau d'ombre balaie la surface terrestre à mesure que la Lune se déplace sur son orbite, formant une bande (en rouge sur la Terre). De cette bande de totalité, on voit une éclipse totale : la nuit en plein jour. De la zone de pénombre, de part et d'autre de la bande de totalité, le Soleil est en partie caché par la Lune : l'éclipse est partielle.



Éclipses et physique solaire

4. LES ÉCLIPSES TOTALES DE SOLEIL des 20 prochaines années. Les lignes en pointillés représentent des trajectoires d'éclipses mixtes, totales sur une partie de leur trajectoire et annulaire sur une autre.

Les physiciens ont tiré de précieux enseignements des éclipses totales. Même aujourd'hui, alors que les sondes spatiales et les radioastronomes observent en continu la couronne dans des gammes étendues du spectre électromagnétique, une éclipse totale de Soleil permet un instantané de l'intégralité de la couronne solaire, dans le domaine visible, à un coût bien inférieur à celui des expériences spatiales.

des particules (la couronne est entièrement renouvelée tous les trois jours). Comment la couronne atteint-elle ces températures extrêmes, alors que la surface solaire est à une température de 5 000 kelvins? Quelle est l'origine des structures et de l'émission de particules sous la forme d'un vent qui se propage jusqu'aux confins du Système solaire? Telles sont les grandes questions de la physique solaire.

Depuis longtemps, les astronomes pensent que le chauffage de la couronne résulte de la dissipation d'ondes magnétohydrodynamiques engendrées dans l'atmosphère solaire. Pour comprendre comment ces ondes sont formées, comment elles se propagent et quels sont les mécanismes de dissipation, les astronomes examinent les émissions de la couronne dans le domaine visible.

L'«atmosphère interplanétaire»
gêne l'observation de la couronne. Par
chance, l'émission de la composante F
est très homogène et surtout constante
dans le temps, de sorte que l'on sait aisé-
ment la soustraire. Cette composante
retranchée, la couronne de plasma
apparaît avec ses riches structures et
ses raies peuvent alors être étudiées.

Quand on mesure l'émission d'une raie, on enregistre sa largeur, caractéristique de l'agitation thermique qui règne dans le milieu. À l'aide d'hypothèses sur l'équilibre thermodynamique des ions, on calcule par ailleurs la vitesse d'agitation due à la température. On constate alors que ces raies sont plus larges que ce qu'elles devraient être : autrement dit, une partie de l'agitation des ions de la couronne n'est pas due à l'agitation thermique, mais à un mouvement d'ensemble. Ce mouvement d'ensemble est engendré par des ondes magnétohydrodynamiques qui se déplacent en même temps que le champ magnétique solaire (on nomme ces vitesses «non thermiques»).

Lors d'une éclipse, on étudie les structures formées par ces ondes. La vitesse des ondes magnétohydrodynamiques varie en raison inverse de la densité du gaz où elles se propagent. Aussi, comme la densité de la couronne décroît très rapidement avec l'altitude, la vitesse de ces ondes devrait croître, d'où une augmentation attendue des vitesses non thermiques dans la largeur des raies d'émission. Cette augmentation n'a pas encore été observée, mais, lors de la prochaine éclipse, notre équipe de l'Institut d'astrophysique de Paris tentera de vérifier cette hypothèse.

Comment ces ondes se dissipent-elles? Vraisemblablement en raison de la viscosité magnétique : le plasma

est stratifié en densité, de sorte qu'il y a dissipation par «frottements magnétiques», analogue à la dissipation par frottement mécanique. On ignore encore où le plasma se magnétise, c'est-à-dire quand le rayon des particules qui tournent dans le champ magnétique solaire devient inférieur à la distance moyenne entre deux collisions ; lorsque le plasma est magnétisé, c'est le champ magnétique qui régit le mode de propagation des ondes.

Aucune bonne mesure n'a pu encore être faite lors d'éclipses, et les observations au coronographe de Lyot (à l'Observatoire de Sacramento Peak, au Nouveau-Mexique notamment) ne portent que sur la partie la plus interne de la couronne ; elles indiquent

Eclipse pratique

Le cône d'ombre de la Lune touchera les côtes françaises le 11 août 1999, à 10h 16 en temps universel (pour avoir le temps légal français, ajouter deux heures) et foncera vers l'Allemagne. Seulement dans la bande de centralité vous verrez l'éclipse totale ; partout ailleurs, elle ne sera que partielle.

Si vous décidez d'aller voir l'éclipse, où vous placer? Plus vous serez prêt de la ligne de centralité, c'est-à-dire de la ligne médiane de la bande de centralité, plus l'éclipse totale sera longue. Évitez de vous trouver trop près du bord de la bande de centralité, car vous risqueriez de manquer la totalité : en raison des montagnes sur la Lune, le bord de la bande est mal défini. Ainsi, selon les estimations américaines, la ville de Nancy n'est pas dans la bande de centralité, alors que, selon le Bureau des longitudes, elle y est.

Installé sur le lieu d'observation, attendez l'heure du premier contact à partir duquel vous pourrez observer une éclipse partielle. Une heure durant, la Lune voilera petit à petit le Soleil, puis arrivera la phase de totalité.

Durant ces deux minutes, vous pourrez observer la couronne solaire dans toute sa splendeur. Ensuite, le disque solaire réapparaîtra petit à petit.

Tout cela, si le temps le permet ! Les statistiques météorologiques des régions françaises où passe l'éclipse montrent que les chances d'observer celle-ci dans sa phase de totalité ne sont que de une sur deux. Il est évidemment intéressant d'étudier la météo la veille et de se déplacer en conséquence. Attention tout de même à la circulation traditionnellement importante les jours d'éclipse.

En dehors de la bande de centralité, vous verrez une éclipse d'autant plus partielle que vous serez loin de celle-ci. À Paris, l'éclipse ne sera pas totale : le Soleil sera caché à 99,3 pour cent. Plus au Sud, à Marseille par exemple, il ne sera obscurci qu'à 80,6 pour

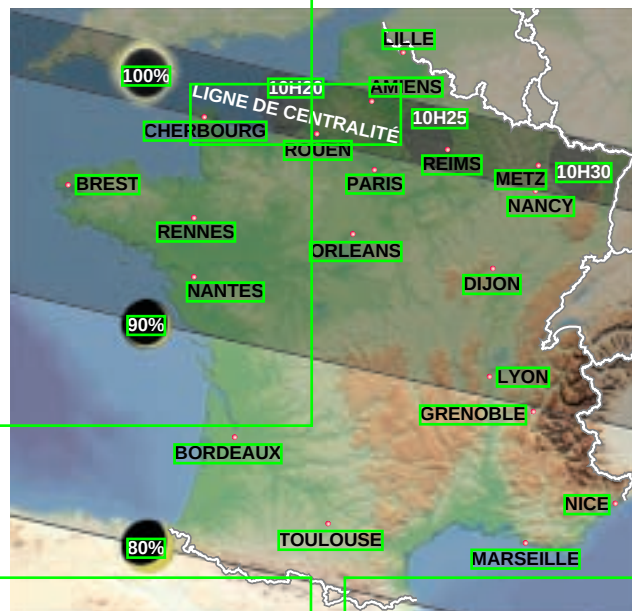
cent (voir la figure). Si, comme la majorité des gens vous observez l'éclipse sans instruments, n'oubliez pas de vous protéger les yeux (voir l'encadré de la page 76).

Pour ceux de nos lecteurs qui veulent immortaliser le spectacle sur une pellicule, quelques précautions s'imposent. L'obscurité sera importante durant la totalité. Aussi tous les réglages seront-ils anticipés. La mise au point devra être placée sur l'infini, le diaphragme sera réglé sur l'ouverture maximale ; le flash est bien entendu inutile.

Avec des objectifs standards, on devra se contenter de photographies d'ambiance. En revanche, avec des téléobjectifs dont la focale varie entre 105 et 800 millimètres, il est possible de réussir de splendides clichés de la couronne solaire. On opérera avec un film de sensibilité comprise entre 200 et 800 ISO, avec un temps de pose compris entre une seconde et un huitième de seconde, suivant l'ouverture de l'objectif. Pour des temps de pose aussi longs, l'appareil photographique devra être fixé sur le sol ou installé sur un trépied ; un déclencheur souple réduira également le «bougé».

Enfin, ceux qui disposent d'un caméscope pourront réaliser une vidéo de l'éclipse. Le caméscope sera placé sur un trépied stable. Durant les phases partielles, on prendra soin de protéger le capteur de la caméra CCD à l'aide d'un filtre placé devant l'objectif (un verre de soudeur, par exemple).

Durant la totalité, les caméscopes dont le seuil de sensibilité est faible (inférieur à deux lux) seront favorisés car le phénomène est faiblement lumineux. Le zoom sera réglé de manière que la couronne solaire apparaisse entièrement dans le champ (entre 8 et 16 fois). On n'oubliera pas d'ôter le filtre !



toutefois que la zone d'observation intéressante est située relativement loin du Soleil (à plus de un rayon solaire de la surface), zone révélée lors des éclipses totales. Ainsi, tout récemment, les données du spectromètre de

diagnostic coronal (CDS) à bord de l'observatoire spatial SOHO ainsi que d'autres expériences, ont montré des comportements différents des types d'ions du plasma (selon leur masse et leur charge).

Structures ultra-fines

Les structures qui apparaissent dans la couronne émanent de la chromosphère et de la région de transition entre la chromosphère et la couronne. À l'aide d'une caméra CCD, lorsque le recouvrement de la chromosphère par la Lune est bon, on distingue la hauteur des structures dans ces régions où la température est intermédiaire entre la faible température de la photosphère et la température élevée de la couronne. Dès la fin des années 1960, on distinguait des structures chromosphériques avec une résolution meilleure que deux secondes d'angle ; on obtient aujourd'hui des résolutions bien supérieures.

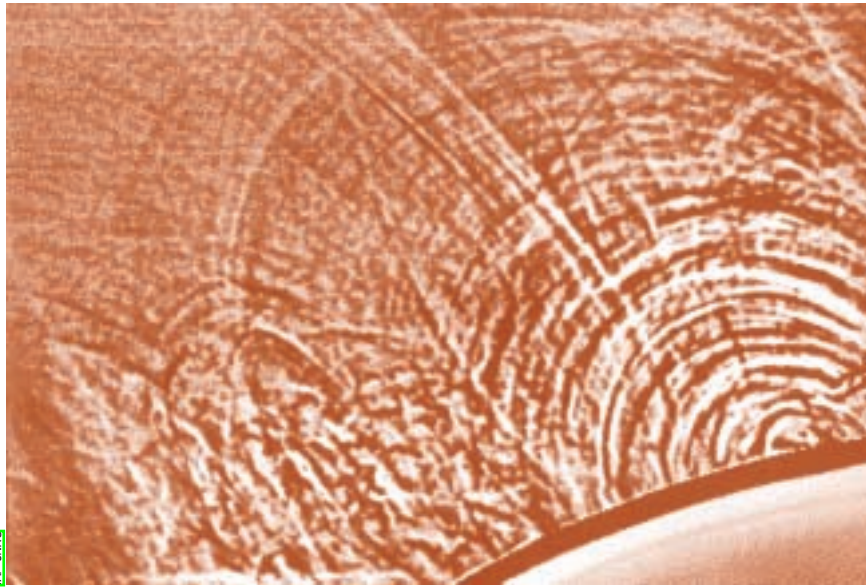
Ainsi, avec un télescope de 20 à 30 centimètres de diamètre équipé d'une petite caméra CCD, nous espérons une coupe de la région de transition entre la chromosphère et la couronne.

Outre l'image observée purement statique, les techniques modernes abordent la dynamique aux petites échelles, comme cela avait été tenté au foyer du télescope CFH de 3,60 mètres de diamètre, à Hawaii, lors de l'éclipse totale de 1991. En superposant plusieurs images, cette observation a révélé dans la couronne un enchevêtrement de structures (voir la figure 5). La plupart des structures ont une forme de boucle.

Lors de la même éclipse, l'observation de raies émanant de l'hydrogène a révélé pour la première fois de petites structures froides, très proches de la surface, au comportement parfois complètement nouveau. La plus petite structure mesurée avait une taille de 0,4 seconde d'angle, et sa durée de vie était de l'ordre d'une quarantaine de secondes seulement. Ces échelles de taille et de temps sont vraisemblablement proches des échelles où la turbulence domine, c'est-à-dire où les vitesses non thermiques sont grandes devant la vitesse propre du vent solaire. Autrement dit, avec quelques progrès dans la résolution, nous serons capables de voir directement la turbulence !

La dynamique à très petite échelle

Peut-on observer des phénomènes encore plus rapides, c'est-à-dire des structures qui varient en moins de 40 secondes ? Le bord Est du Soleil, lors de l'éclipse de 1991 a été observé à l'aide d'un caméra CCD. Nous avons enregistré 6 100 images durant 210 secondes,



5. LA MEILLEURE RESOLUTION jamais obtenue pour une image de la couronne solaire en lumière blanche (la lumière diffusée par les électrons libres de la couronne). On distingue sur cette image un enchevêtrement de structures gazeuses dont la plupart ont la forme de boucles. Environ 400 clichés assez semblables ont été pris lors de l'éclipse de 1991 au foyer du télescope CFH de 3,60 mètres de diamètre, à Hawaii. Le traitement de ces images met en évidence les structures dont l'échelle est voisine de trois secondes d'angle. Des structures plus fines existent, mais elle ne ressortent pas sur cette image. La largeur de l'image correspond à environ 400 000 kilomètres sur le Soleil.

Attention les yeux !

Les éclipses de Soleil sont des spectacles naturels magnifiques dont les conséquences sur les observateurs imprudents peuvent être graves : après chaque éclipse de Soleil qui passe dans des lieux densément peuplés, on recense de nombreuses lésions oculaires, non que le Soleil soit plus dangereux lors des éclipses, mais parce que les gens regardent le Soleil plus longtemps, sans précautions particulières.

Durant toute la phase partielle, le Soleil émet presque autant de rayonnement que s'il n'était pas éclipsé. Sans protection oculaire, le danger est grand. La protection la plus sûre est le « verre de soudeur » de grade 14. Cette petite plaque de verre absorbant, que l'on trouve dans les bonnes quincailleries, vous permettra d'observer sans danger toutes les phases de partialité. Durant les deux minutes de la totalité, enlevez votre verre et admirez le spectacle à l'œil nu. Moins onéreuses, des lunettes filtrantes en polymère noir assureront une sécurité et un confort excellents. À défaut, vous pouvez utiliser du Mylar aluminé, à condition qu'il ne

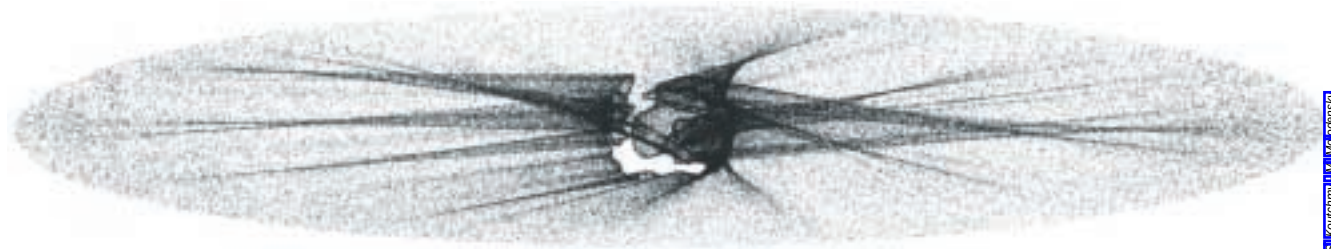
soit pas craquelé ou fendu ; ou bien des filtres solaires spéciaux.

Les protections insuffisantes à proscrire absolument sont : les lunettes de soleil, même plusieurs paires superposées ; le verre noirci à la flamme d'une bougie ; les films couleurs ou les diapositives voilées (en revanche, on peut utiliser une double épaisseur de négatifs noir et blanc, entièrement voilés et développés, à condition que ceux-ci contiennent une émulsion argentique).

Enfin, si vous ne voulez pas regarder le Soleil directement, vous pouvez percer un trou dans un carton et projeter l'image du Soleil à travers le trou sur une feuille de papier.

Dans tous les cas, ne regardez jamais le Soleil partiellement éclipsé avec un instrument (jumelles, télescope) sans vous être assuré que celui-ci est équipé d'un filtre adéquat placé sur l'objectif (et non sur l'oculaire).

Les 500 premiers lecteurs qui nous enverront une enveloppe auto-adressée, affranchie au tarif normal, recevront une paire de lunettes en polymère noir distribuées par la Société astronomique de France.



© P. MARTINEZ - A. MOREL

6. A PARTIR DE MESURES DU CHAMP MAGNETIQUE à la surface du Soleil, on a représenté ici la surface en grisé où la composante radiale du champ magnétique est nulle, là où sont piégées les particules chargées. De plus, en plaçant 400 000 particules dans

cette structure magnétique, on illustre les effets de projection observés sur les images d'éclipses. En raison de la courbure des feuilles de courant, certaines zones apparaissent comme des discontinuités, alors qu'elles sont en réalité repliées.

soit près de 30 images par seconde. La résolution spatiale était de l'ordre de 0,7 seconde d'angle, et un filtre permettait de soustraire les émissions qui émanaient des régions froides.

Sur ces images, nous avons suivi un nuage de particules, un «plasmaïde». Ce petit nuage, dont les dimensions ne dépassent guère trois secondes d'angle, a un comportement complexe, impossible à décrire par une simple trajectoire balistique : il serait soumis à d'importantes forces magnétiques. Lorsque la vitesse de propagation d'une perturbation de pression, telle ce nuage, est supérieure à la vitesse du son (qui dépend de la température locale), un choc se forme et des effets dissipatifs ralentissent le nuage. Or, la vitesse typique du nuage est de l'ordre de 100 kilomètres par seconde, ce qui est sans doute inférieur à la vitesse du son aux températures coronales, mais est du même ordre de grandeur que la vitesse du son à la température présumée du petit nuage. Ainsi, ce nuage devrait être ralenti.

À l'Institut d'astrophysique de Paris, Olivier Bouchard et Cécile Delannée ont analysé le phénomène, mais n'ont pu conclure sur la nature de cette structure : s'agit-il de tourbillons de gaz relativement «froid» (50 000 kelvins) ; d'un nuage de particules qui posséderait son propre champ magnétique, indépendant du champ de la couronne environnante ; d'une onde de propagation ; des éléments d'une boucle coronale «invisible» qui se serait cassée par reconnexion de lignes de champ magnétique ? Toutes les possibilités sont concevables.

La résolution est améliorée par les caméras CCD : avec des temps de pose courts, le traitement des images améliore grandement la résolution, limitée par la turbulence de l'atmosphère terrestre. Ces expériences, qui profitent des progrès de l'imagerie moderne, apporteront des moissons de nouvelles découvertes sur la formation des structures

et sur le chauffage de la couronne, mais l'imagerie permet aussi de progresser sur le vent solaire.

La perte de masse

La masse du Soleil diminue continuellement. Cette perte de masse résulte de particules émises par le Soleil, transportées dans la couronne et éjectées dans le milieu interplanétaire. Ce vent solaire émane des structures coronales. Nous avons vu que la couronne interne est très finement structurée en boucles, mais, à partir de 0,3 à 0,5 rayon solaire de la surface, on distingue des lames coronales ou des feuillettes.

La topologie de ces feuillettes échappe encore à l'observation, et seules les modélisations numériques permettent pour l'instant d'appréhender leur structure tridimensionnelle (voir la figure 6). Lors d'éclipses, il est néanmoins possible de profiter du fait que ces structures coronales tournent de manière quasi rigide (à l'échelle de quelques heures) pour photographier les structures à grande échelle, à une heure trente d'intervalle par exemple (depuis deux points éloignés de la ligne de centralité, comme Hawaï et le Brésil pour l'éclipse de 1991), et visualiser ainsi leur forme.

Au cours des éclipses de 1991 et de 1994, les observateurs ont ainsi vu des feuillettes très minces, avec parfois des plis qui s'expliquent bien par des effets de projection : une structure coronale fine vue par la tranche apparaît mince. C'est peut-être la raison des structures très effilées observées dans la couronne.

Les progrès techniques offrent ainsi de nouvelles possibilités pour l'imagerie. Des films d'excellente résolution et suffisamment sensibles sont aujourd'hui disponibles. La numérisation peu coûteuse des clichés et l'utilisation des ordinateurs de bureau équipés de logiciels de traitement d'image font des merveilles. Ainsi, certains amateurs obtiennent des résultats étonnants,

mais ces travaux demeurent qualitatifs : l'analyse scientifique requiert une bonne calibration de la lumière reçue et de sa polarisation (l'orientation du champ électrique).

Les caméras CCD avec de nombreux pixels ($2\,000 \times 2\,000$) ont été utilisées pour la première fois lors de l'éclipse de 1998, aux Caraïbes, mais leur usage semble pour l'instant plus judicieux pour la spectroscopie des raies coronales que pour l'imagerie, car leurs détecteurs, plus sensibles que les films, sont précieux pour exploiter une observation de la couronne nécessairement courte. Dès l'éclipse de 1999, on devrait néanmoins assister à une confrontation sur l'imagerie entre tenants du film et partisans de la caméra CCD.

Au XIX^e siècle, les premières photographies d'éclipses montrent que les protubérances et la couronne sont d'origine solaire, et non lunaire comme beaucoup d'astronomes de l'époque le pensaient. Au XX^e siècle, les astronomes précisent la nature de la couronne et réalisent l'importance des phénomènes dynamiques. Gageons qu'au XXI^e siècle, ils élucideront les mécanismes de chauffage et d'accélération des particules dans la couronne, grâce notamment aux observations d'éclipses totales de Soleil simultanément du sol et de l'espace.

Pierre GUILLERMIER, physicien nucléaire et astrophotographe amateur, est passionné de physique solaire. Serge KOUTCHMY, spécialiste du Soleil, est directeur de recherche au CNRS (Institut d'astrophysique de Paris).

Les éclipses de Soleil, l'éclipse du 11 août 1999, EDP-Sciences, 1999.

P. MARTINEZ et Ph. MOREL, *Observer l'éclipse*, Adagio, 1999.

P. GUILLERMIER et S. KOUTCHMY, *Éclipses totales*, Masson, 1998.

Sur notre site, de nombreux liens commentés vous emmèneront vers des sites pratiques (cartes, calculs des circonstances pour un lieu donné, etc.) :

<http://www.pourlascience.com>

Éclipses et chronologie

DENIS SAVOIE

La dernière éclipse totale de Soleil du millénaire, le 11 août 1999, sera visible en France. Cet événement céleste majeur est l'occasion de rappeler le rôle des éclipses dans les datations historiques, ainsi que leur utilité dans l'étude des irrégularités de la rotation de la Terre.

L'éclipse de Soleil qui évita à Tintin, au capitaine Haddock et au professeur Tournesol d'être sacrifiés par les Incas dans *Le Temple du Soleil* est connue de tous. On sait moins que la réalité a dépassé la fiction et que Christophe Colomb a tiré avantage d'une semblable situation... pendant une éclipse de Lune.

Lors de son quatrième voyage aux Amériques, Christophe Colomb et son équipage, alors à la Jamaïque, dépendent, pour les vivres, du bon vouloir des Indiens, qui de surcroît menacent de les massacrer. Comme tout navigateur prévoyant, le Génois possède des éphémérides, celles du grand astronome du XV^e siècle, Regiomontanus (1436-1476), qui indiquent entre autres les dates des futures éclipses de Soleil et de Lune.

Une éclipse totale de Lune est justement prévue dans la nuit du jeudi 29 février au vendredi 1^{er} mars 1504. Colomb convoque les caciques et leur tient un discours dans lequel il se fait le porte-parole du mécontentement de son Dieu, qui voit d'un mauvais œil l'attitude, au mieux passive des Indiens. Ces derniers vont mesurer l'ire du Dieu chrétien lors du lever de la Lune, qui apparaîtra enflammée et sanglante, signe précurseur des maux qui vont s'abattre sur eux. La Lune se lève effectivement éclip­sée, d'une couleur rougeâtre : cette vision terrorise les Indiens, qui se précipitent pour chercher et offrir des provisions. Peu de temps avant la fin de l'éclipse totale, Colomb annonce que tout va redevenir normal, à condition que les Indiens traitent les chrétiens comme il

se doit. Ce qui fut fait ! La prévision des éclipses remonte à l'Antiquité : elle est attestée dans la plus grande œuvre astronomique de cette époque, l'*Almageste*, due à Claude Ptolémée, astronome du II^e siècle de notre ère.

Plusieurs siècles auparavant, on savait déjà que les éclipses de Soleil ou de Lune se manifestaient sous deux conditions : que la Lune soit nouvelle pour une éclipse de Soleil (entre le Soleil et la Terre) ou pleine pour une éclipse de Lune (la Terre est alors entre la Lune et le Soleil), et que le Soleil soit proche de l'intersection où l'orbite lunaire coupe celle du Soleil. La prédiction du phénomène nécessitait donc l'élaboration d'une théorie du mouvement du Soleil et de la Lune.

Un miracle prévisible ?

Si, pour l'astre du jour, les calculs sont relativement aisés, il n'en allait pas de même pour la Lune, dont le mouvement est complexe. Ptolémée avait perfectionné la théorie de ces deux astres et, en plus, connaissait les diamètres apparents du Soleil et de la Lune, ainsi que leur variation selon la distance de ces astres à la Terre.

On mesure ici la supériorité de l'astronomie grecque sur l'astronomie babylonienne : même à leur apogée, vers 300 avant notre ère, les astronomes babyloniens n'étaient capables que de prédire la possibilité ou l'impossibilité d'une éclipse, rien de plus. Or, non seulement l'*Almageste* permettait de prédire les dates d'éclipses, mais

également leur visibilité en un certain lieu, leur type (totales ou partielles) et leur durée ! Jusqu'à Johannes Kepler, au XVII^e siècle, la méthode de Ptolémée restera sans amélioration.

L'aspect prodigieux des éclipses, en particulier celles de Soleil, a souvent été mis à profit dans les cultures anciennes pour justifier un miracle ou une défaite. Aussi, lorsqu'un texte ancien mentionne un tel événement, la première vérification à laquelle se livre un astronome est de s'assurer qu'il y a bien eu une éclipse à la date indiquée.

Une éclipse célèbre est celle de la Passion, rapportée dans l'Évangile selon Marc (15, 33) : « Quand ce fut la sixième heure, il y eut des ténèbres sur toute la Terre, jusqu'à la neuvième heure. » Dès le Moyen Âge, l'astronome Sacrobosco écrit un traité, *De Sphaera mundi*, qui sera lu et commenté jusqu'au XVII^e siècle ; il termine son ouvrage en se demandant si l'éclipse de la Passion était naturelle ou miraculeuse, non pas en calculant les dates d'éclipses, comme il aurait pu le faire, mais en objectant qu'une éclipse de Soleil se produit lorsque la Lune est nouvelle. Or, le Christ ayant été crucifié à Pâques, où par définition la Lune est voisine de sa plénitude, il ne peut s'agir que d'un miracle à travers lequel s'est manifestée la puissance divine... Une légende

1. EN 1504, en difficulté lors d'un voyage en Jamaïque, Christophe Colomb prédit la disparition de la Lune. Effrayés par la vision de la Lune rouge, ces derniers aidèrent les Européens jusqu'à l'arrivée des secours.

veut que Denys l'Aréopagite, apprenant la vraie nature de l'éclipse (le miracle) de l'apôtre Paul, se soit converti au christianisme, ait ensuite gagné la France, dont il aurait converti les habitants! Dieu ne pouvait se contredire et restait contraint par les lois de la physique qu'il avait créées : il n'y eut pas d'éclipse de Soleil à cette période.

L'historien Zosime, qui vécut au VI^e siècle de notre ère, auteur d'une *Histoire nouvelle*, relate une bataille entre Eugène, Arbogast et Théodose, dite bataille du Frigidus, qui se déroula le 5 septembre 394 dans les Alpes Juliennes : «Lorsque Eugène marcha à leur rencontre avec l'ensemble de ses troupes et que les armées en vinrent aux mains l'une avec l'autre, il se produisit au moment même du combat une éclipse de Soleil si complète qu'il sembla plutôt faire nuit que jour pendant un laps de temps considérable.» L'indication que l'éclipse dura «un laps de temps considérable» est suspecte : le calcul astronomique montre qu'aucune éclipse de Soleil n'eut lieu le 5 septembre 394! Zosime a sans doute inventé cette éclipse de Soleil pour expliquer la défaite d'Eugène face à Théodose : les hommes d'Eugène auraient été massacrés, exténués par un combat nocturne...

En vérifiant des éclipses anciennes, les astronomes du XVII^e siècle seront

confrontés à une énigme dont les tenants et les aboutissants ne seront totalement compris qu'au début du XX^e siècle. La naissance de la mécanique céleste, après Newton, a permis d'importants progrès dans la théorie du mouvement de la Lune, où les astronomes savaient intégrer les perturbations dues au Soleil. Il apparut cependant que la théorie du mouvement de la Lune s'écarterait de l'observation lorsque l'on calculait des éclipses de Soleil anciennes : il subsistait des décalages inexplicables entre l'heure observée, rapportée par tel ou tel astronome de l'Antiquité, et l'heure calculée à l'aide de la théorie.

Le décalage des éclipses

Au XVIII^e siècle, les astronomes conclurent que, vu, de la Terre, la Lune avait accéléré lentement sur son orbite au cours des siècles d'une quantité égale à environ 20'' par siècle carré. Pierre Simon de Laplace crut expliquer cette accélération séculaire par la variation de l'excentricité de l'orbite terrestre (l'excentricité mesure l'allongement d'une orbite elliptique), causée par les perturbations planétaires. L'effet gravitationnel des planètes modifiant lentement l'excentricité de l'orbite terrestre, l'orbite lunaire en aurait été modifiée. Effectivement, ces calculs

expliquaient une accélération séculaire proche de celle observée.

Toutefois, au milieu du XIX^e siècle, le problème rebondit grâce à John Couch Adams, le codécouvreur de la planète Neptune : en refaisant les calculs avec le Français Charles Delaunay, les astronomes conclurent que la théorie de la gravitation expliquait une accélération séculaire de 12'' par siècle carré, alors que les analyses des observations anciennes indiquaient une accélération deux fois plus grande. Quelle était l'origine de cette accélération supplémentaire?

La réponse fut trouvée au début du XX^e siècle : sous l'effet des frottements dus aux marées dans les océans et dans les différentes couches du manteau terrestre, la Terre ralentit sa rotation. Comme le système Terre-Lune est, en première approximation, isolé dans l'espace, le moment cinétique du système se conserve (le moment cinétique d'un corps en rotation est le produit de la vitesse de chaque masse ponctuelle du corps par la distance de cette masse à l'axe de rotation). La diminution du moment cinétique de la Terre est alors compensée par une augmentation du moment cinétique orbital de la Lune. Ainsi, la distance de la Terre à la Lune augmente et la vitesse orbitale de la Lune diminue (selon la deuxième loi



de Kepler, la vitesse orbitale diminue avec la distance).

Toutefois, de la Terre, les observations du mouvement de la Lune ne permettent pas de distinguer son accélération apparente, imputable au freinage de la rotation terrestre (le fait que nous soyons sur un référentiel qui ralentit fait que la Lune semble accélérer) et la décélération orbitale réelle de la Lune. C'est parce que le premier effet l'emporte sur le second que l'on observe une accélération apparente du mouvement lunaire. Autrement dit, les observations anciennes de la Lune, qui utilisent la rotation de la Terre pour définir l'échelle de temps, mettent en évidence une accélération apparente de notre satellite (de 20'' par siècle carré), dont les deux composantes, le ralentissement de la rotation de la Terre et la décélération séculaire propre de la Lune (dénommé ralentissement séculaire), sont imbriquées.

Le ralentissement séculaire

Aujourd'hui, à l'aide de références extérieures au système Terre-Lune, notamment l'observation d'autres corps du Système solaire, on distingue les deux ralentissements. Le ralentissement propre de la Lune est ainsi connu avec précision, notamment grâce aux observations du «laser-Lune». Les cinq réflecteurs installés sur la Lune, lors des missions *Apollo 11*, en 1969, jusqu'à *Lunakhod 2*, en 1973, réfléchissent les impulsions lumineuses émises par des

lasers terrestres. Ces tirs lasers fournissent la distance Terre-Lune avec une précision de quelques centimètres : c'est la moitié de la durée de l'aller et retour de l'impulsion laser multiplié par la vitesse de la lumière. L'étude des variations de cette distance permet d'améliorer les théories du mouvement de la Lune et de déduire, entre autres, la valeur du ralentissement séculaire de la Lune. On notera cependant que l'étude des anciens passages de Mercure devant le Soleil et des occultations d'étoiles par la Lune avait fourni une valeur du ralentissement séculaire très proche de celle de la méthode laser.

Le ralentissement séculaire de la Lune est dû à deux facteurs : une composante qui résulte des forces d'attraction entre corps rigides sans déformation, connue avec précision, et une composante due aux forces de marées, qui dépend de constantes géophysiques mal connues. Cette méconnaissance de certains paramètres géophysiques reste la principale cause d'incertitude dans la prévision du mouvement de la Lune dès que l'on s'écarte de plus d'un siècle de la période contemporaine.

Le ralentissement séculaire de la Lune dans le calcul d'une éclipse de Soleil ne résout pas la totalité du problème : on doit aussi tenir compte du ralentissement de la rotation de la Terre. Un exemple concret permet de comprendre l'importance du phénomène. Avec le déchiffrement des textes cunéiformes astronomiques babyloniens, à la fin du XIX^e siècle, on a pu découvrir

sur une tablette d'argile, conservée au British Museum, la mention d'une éclipse totale de Soleil visible à Babylone. L'étude de la tablette permet de dater l'éclipse : 15 avril 136 avant notre ère. Supposons, dans un premier temps, que la Terre tourne sur elle-même de façon parfaitement uniforme et calculons où l'éclipse aurait été totale (voir la figure 3a). La zone de totalité, c'est-à-dire la bande dans laquelle l'éclipse est totale, passerait en Europe, à des milliers de kilomètres de Babylone.

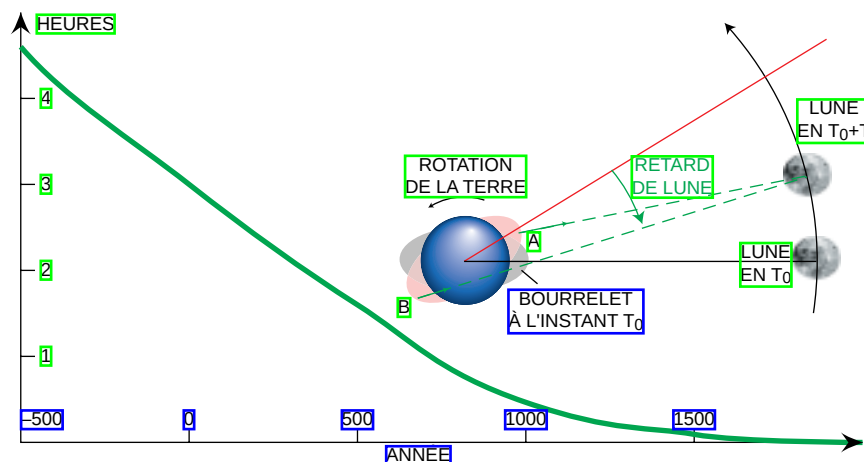
L'horloge terrestre retardée

La question que se pose l'astronome est alors la suivante : de combien de secondes l'«horloge Terre» a-t-elle ralenti par rapport à l'«horloge idéale», – qui suppose une rotation uniforme de la Terre depuis cette époque – pour que l'éclipse soit totale à Babylone ? Il ne peut s'agir que d'une détermination empirique : en prenant une dérive d'horloge de 11 700 secondes, soit 3 heures et 15 minutes, on déplace la ligne de centralité exactement sur Babylone (voir la figure 3b). Bien entendu, la bande de centralité a une certaine largeur et une erreur de quelques minutes dans la dérive d'horloge place encore Babylone dans la zone où l'éclipse est totale.

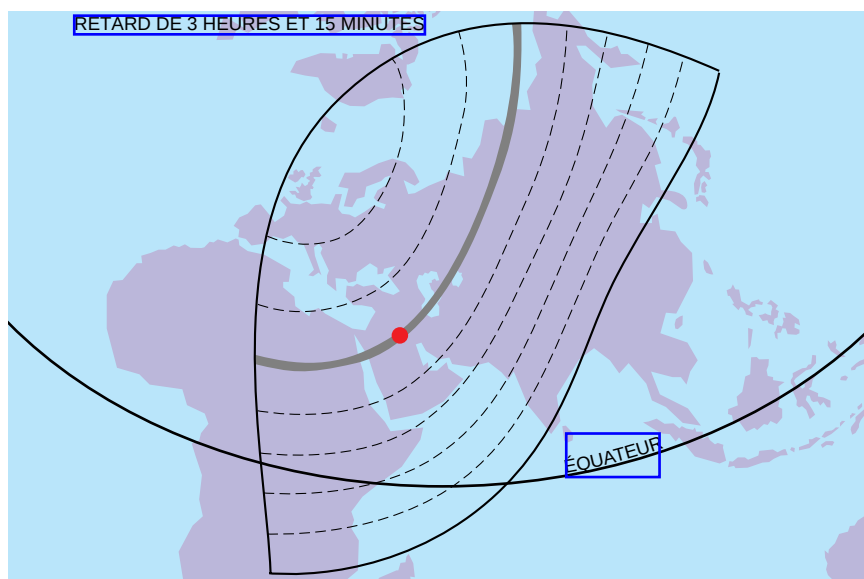
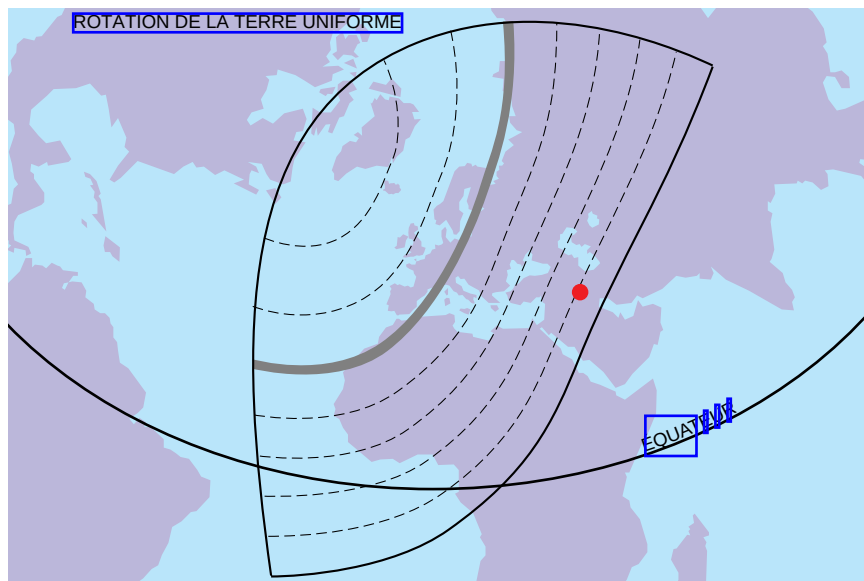
Ce ralentissement de la rotation de la Terre se poursuit évidemment et constitue une limite aux prédictions astronomiques futures. On peut bien sûr prévoir à quelle date aura lieu la prochaine éclipse totale visible en France au XXV^e siècle, par exemple, mais il est impossible de prédire exactement les limites de la bande de totalité. Non seulement la rotation de la Terre ralentit en raison des marées, mais des irrégularités dans son mouvement de rotation empêchent de prévoir de combien de secondes la Terre aura ralenti ou accéléré dans cinq siècles.

Qu'en est-il à très long terme ? Dans des centaines de millions d'années, la période de révolution de la Lune autour de la Terre, qui vaut 27 jours 8 heures, sera de 30 jours. Dans le même temps, la distance Terre-Lune aura augmenté au rythme de trois centimètres par an. Toutefois, ces deux valeurs sont à prendre avec précaution, car il n'est pas certain que le ralentissement séculaire de la Lune reste constant des millions d'années durant.

Pour le spécialiste des irrégularités de la rotation de la Terre, il convient de



2. LA DERIVE DE L'HORLOGE TERRE par rapport à une horloge uniforme augmente à mesure que l'on remonte dans le passé. Cette dérive, exprimée en heure en fonction de l'année, est estimée à l'aide d'observations d'éclipses anciennes. En raison des frottements à l'intérieur de la Terre, les déformations dues aux marées retardent par rapport à la Lune. Entraîné par la rotation de la Terre, le bourrelet des marées est en avance par rapport à la direction Terre-Lune (schéma). La Lune exerce alors un couple sur le bourrelet (la Lune attire plus la partie A que la partie B), qui à ramène l'axe du bourrelet dans la direction Terre-Lune : la rotation de la Terre est freinée.



3. LES DONNÉES SUR LES ÉCLIPSES ANCIENNES permettent d'estimer les variations de la rotation de la Terre. Le 15 avril -135, une éclipse totale de Soleil est signalée à Babylone. Si l'on suppose que la Terre tourne sur elle-même de manière uniforme, on calcule la bande de centralité (*en haut*). L'éclipse totale ne passe alors pas à Babylone (*point rouge*) : dans la bande grisée, dont la largeur ne peut dépasser 270 kilomètres, l'éclipse est totale ; en dehors de cette bande, l'éclipse est partielle. Pour que l'éclipse soit totale à Babylone, il faut que la Terre ait ralenti de 3 heures 15 minutes par rapport à une rotation uniforme (*en bas*).

sélectionner les observations, principalement celles des éclipses de Soleil et de Lune, car toutes ne sont pas exploitables. Les 400 observations utilisées proviennent de quatre civilisations : babylonienne, pour la période comprise entre 700 et 50 avant notre ère ; chinoise, pour la période qui s'étend de 700 avant notre ère à 1500 de notre ère ; européenne, pour la période 500 avant notre ère à 1600 de notre ère ; arabe enfin, pour la période entre les années 800 et 1300 (il n'existe pas de mention utilisable d'observations dues aux Égyptiens, aux Indiens ou aux Mayas).

Les références d'éclipses se trouvent dans les tablettes d'argile, dans des chroniques ou dans des manuscrits. Il faut ensuite les traduire, les dater – ce qui est souvent le plus difficile, en raison du calendrier et de l'ère utilisés –, déterminer pour quel lieu l'éclipse est rapportée, puis en tirer des informations utiles. Toutes ces recherches demandent les compétences de philologues, d'historiens et d'astronomes.

Certaines mentions comportent l'année, le lieu et l'heure de l'éclipse ; ainsi, une éclipse de Lune est décrite par Ptolémée dans l'*Almageste* : « Dans la septième année de Philometor, qui

est la 574^e [de l'ère] de Nabonassar, du 27 au 28 du mois Phamenoth dans le calendrier égyptien, depuis le commencement de la huitième heure jusqu'à la fin de la dixième à Alexandrie, il y eut une éclipse de Lune qui atteignit au maximum sept doigts d'obscurcissement depuis le Nord, le milieu de l'éclipse tombant deux heures et demie temporaires après minuit ». Grâce à ces indications chronologiques, les astronomes fixent l'éclipse dans la nuit du 30 avril au 1^{er} mai 174 avant notre ère à Alexandrie ; l'éclipse fut partielle, car seulement « sept doigts » du diamètre de la Lune sont plongés dans l'ombre. Il faut ensuite convertir l'heure temporaire en heure moderne pour en déduire finalement la dérive de l'horloge Terre.

Toutes les mentions d'éclipses sont loin d'être aussi détaillées ; certaines sont même inutilisables. En l'absence d'éléments horaires, il faut distinguer si l'éclipse a eu lieu au lever ou au coucher. Parfois, celui qui décrit une éclipse mentionne des indications très utiles, telle la présence de planètes visibles durant une éclipse totale de Soleil.

L'un des grands spécialistes mondiaux de l'analyse des éclipses anciennes, Richard Stephenson, de l'Université de Durham, a mis en évidence qu'entre 500 avant notre ère et la période actuelle l'allongement du jour a été en moyenne de 1,7 milliseconde par siècle. Un tel freinage peut paraître insignifiant, mais il a des effets cumulatifs importants : en un siècle, l'horloge Terre perd une minute (1,7 milliseconde multiplié par 365 jours multiplié par 100 ans). Ainsi, au cours des siècles on estime la différence entre une horloge uniforme idéale et l'horloge terrestre (*voir la figure 2*). Tous ces travaux sont extrêmement utiles aux géophysiciens dans la compréhension de la structure de notre planète. Ils trouvent aussi une application pratique dans les logiciels d'astronomie distribués dans le commerce – du moins ceux écrits par des personnes compétentes –, où l'on peut effectuer des recherches d'éclipses passées et futures.

Denis SAVOIE est historien des sciences, associé à l'Observatoire de Paris.

F.R. STEPHENSON, *Historical Eclipses and Earth's Rotation*, Cambridge University Press, 1997.

J.P. VERDET, *Une histoire de l'astronomie*, Seuil, 1990.

Le dragon de Komodo

CLAUDIO CIOFI

Le plus grand lézard du monde, maître incontesté de quelques petites îles de l'archipel indonésien, est menacé par l'homme.



La vie est une lutte. Dans la savane de l'île indonésienne de Komodo, un cervidé d'environ 90 kilogrammes progresse avec précaution à travers les hautes herbes. Ce «sambar de la Sonde» (*Cervus timorensis*) connaît bien le chemin que lui et ses congénères empruntent fréquemment à la recherche de nourriture. Pourtant, aujourd'hui, un danger le menace. Immobile, à quelques mètres de lui, un dragon d'environ 2,5 mètres de longueur, pesant 45 kilogrammes, attend depuis des heures qu'une proie passe à sa portée : un sanglier, une chèvre ou... un cervidé. Le sambar fait trop de bruit ; le dragon le détecte et l'attaque.

Malgré son nom, le dragon de Komodo est un animal bien réel. Il est aussi nommé varan de Komodo, car c'est un lézard de la famille des Varanidae, représentée aujourd'hui par le seul genre *Varanus*. Les habitants de l'île de Komodo le nomment *ora*, et ceux des îles de Rinca et Flores, *buaja darat* (ce qui signifie «le crocodile terrestre», bien que les varans ne soient pas des crocodiles). D'autres encore le nomment

biawak raksasa, soit «varan géant» ; ce nom est judicieux, car c'est le plus gros lézard – et le plus gros varan – connu vivant aujourd'hui. Un varan de Nouvelle-Guinée, *Varanus salvadorii*, est parfois plus long, mais son corps svelte et sa longue queue en font un animal beaucoup plus léger que le varan de Komodo, trapu et puissant. Enfin, pour les zoologistes, le dragon de Komodo est nommé *Varanus komodoensis*.

Une vie de dragon

Le plus gros spécimen authentifié atteignait 3,13 mètres de longueur et pesait 166 kilogrammes (une grande quantité de nourriture non digérée était probablement à l'origine d'une partie de cette masse). Les plus grands varans en liberté pèsent environ 70 kilogrammes, tandis que les animaux en captivité, souvent trop nourris, sont plus gros. Capables de brèves courses à des vitesses de 20 kilomètres à l'heure, le dragon

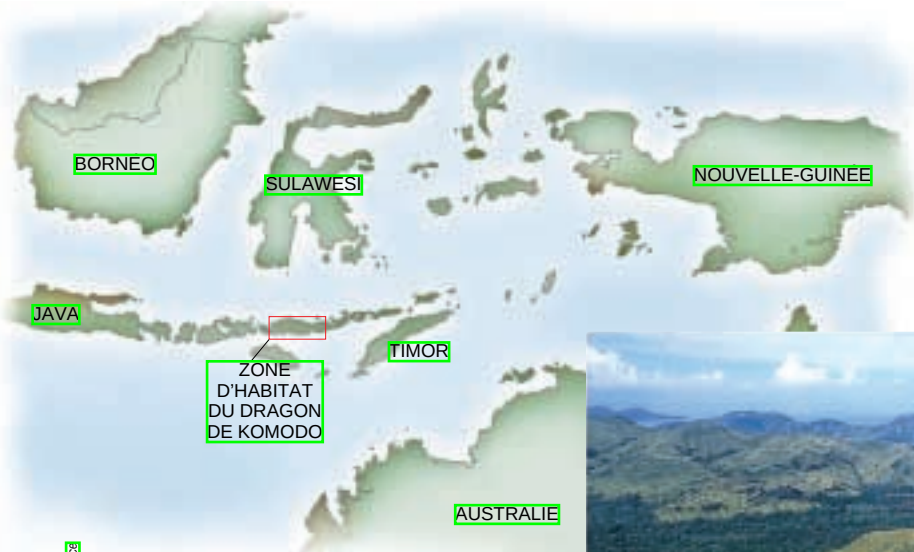
chasse plutôt en utilisant sa puissance, sa discrétion et sa patience.

Les varans détectent des mouvements à 300 mètres de distance, mais ils discernent difficilement les objets immobiles. Leur rétine possède des cônes, des cellules nerveuses sensibles aux couleurs, mais l'absence de cellules en forme de bâtonnets, leur procure une mauvaise vue sous de faibles éclairages.

Leur oreille ne perçoit qu'une gamme sonore restreinte : vraisemblablement des fréquences comprises entre 400 et 2 000 hertz, alors que l'espèce humaine entend les fréquences comprises entre 20 et 20 000 hertz. Cependant, contrairement à ce qui avait été mentionné dans le premier article scientifique révélant leur existence, les varans de Komodo ne sont pas sourds. La composition de leur oreille interne explique leur insensibilité aux sons graves ou aigus.



1. LE DRAGON DE KOMODO goûte l'air à l'aide de sa langue jaune et bifide, longue de 30 centimètres.



2. L'ILE DE KOMODO est une zone vallonnée d'environ 340 kilomètres carrés ; un sommet culmine à 735 mètres. Le varan de Komodo vit le plus souvent aux altitudes inférieures à 500 mètres, mais il ne dédaigne pas l'altitude. D'autres groupes occupent des îles indonésiennes à 900 kilomètres de l'Australie, à 500 kilomètres de Java et à 1 500 kilomètres de la Nouvelle-Guinée.



Alors que les mammifères ont trois osselets – le marteau, l'enclume et l'étrier – pour transmettre et amplifier les vibrations du tympan, les varans ne possèdent qu'un étrier. De plus, leur cochlée, la structure responsable de la perception sonore, contient beaucoup moins de cellules réceptrices que celle des mammifères.

L'olfaction est le sens le plus développé du varan de Komodo. Sa langue jaune, longue et biface «goûte» d'abord l'air en captant les molécules odorantes ; puis les deux extrémités de la langue se placent en contact avec l'organe de Jacobson, un analyseur chimique situé sur le palais. La différence de concentration sur les deux hanches de la langue indique au varan de Komodo la direction de sa proie. Associé à une marche ondulatoire où la tête se balance à droite et à gauche, ce système permet au varan de trouver une charogne distante de quatre kilomètres, lorsque le vent est favorable.

Le varan de Komodo révèle sa présence lorsqu'il se trouve à environ un mètre de sa proie. L'herpétologue Walter Auffenberg, de l'Université de Floride, a comparé le mouvement rapide de ses pieds au «bruit étouffé d'une mitrailleuse» : «Quand ces animaux décident d'attaquer, rien ne peut les arrêter.» W. Auffenberg veut dire par là que rien ne peut interrompre l'assaut, mais celui-ci n'a pas toujours le résultat escompté. La plupart des attaques de prédateurs échouent. Un varan de Komodo suivi pendant 81 jours a tué seulement deux proies.

La stratégie du dragon est simple : coucher la proie au sol, puis la mettre en morceaux. Si la proie est grande, le dragon l'attaque aux membres et la renverse. Si la proie est petite, il l'attaque à la nuque. Ses fortes griffes sont

efficaces, mais ses dents sont son arme la plus redoutable. Elles sont grandes, incurvées et crénelées, et elles déchirent la chair aussi efficacement qu'une charrue creuse des sillons. Après chaque repas, des morceaux de viande restent coincés dans les crénelures.

L'équipe de Putra Sastrawan, de l'Université Udayana, à Bali, et Don Gillespie, du zoo d'El Paso, au Texas, ont découvert dans ces résidus riches en protéines environ 50 souches bactériennes différentes, dont au moins sept sont fortement pathogènes. Aussi les morsures sont-elles fatales : les proies qui s'échappent meurent rapidement d'infections. Leur agresseur, ou un autre varan de Komodo, consommera alors la victime. Pourquoi les varans blessés dans les batailles avec leurs congénères ne sont-ils pas infectés par ces bactéries ? D. Gillespie cherche aujourd'hui des anticorps responsables de cette immunité.

Lorsque la proie ne s'est pas échappée, le varan poursuit le carnage jusqu'à ce qu'elle soit immobilisée ; puis il s'accorde un court repos avant de porter soudain le coup de grâce au ventre. Le sang coule, et le dragon commence son repas.

Grâce à la musculature de ses mâchoires et de sa gorge, ainsi qu'aux nombreuses articulations mobiles, telles que la charnière intramandibulaire qui permet d'ouvrir la mâchoire inférieure de manière exceptionnelle, le varan de

Komodo avale d'énormes morceaux de viande à une vitesse étonnante. W. Auffenberg a observé une femelle de 50 kilogrammes qui a entièrement mangé un sanglier de 31 kilogrammes en 17 minutes. Comme l'estomac s'élargit beaucoup, un adulte avale jusqu'à 80 pour cent de son poids en un seul repas. Peut-être est-ce là l'explication de certaines déclarations exagérées concernant le poids d'animaux capturés.

Les grands mammifères carnivores, tels les lions, ne consomment généralement que 70 à 75 pour cent de leur proie ; ils laissent les intestins, la peau, le squelette et les sabots. Les varans de Komodo ne délaissent que 12 pour cent de leur victime. Ils mangent les os, les sabots, des lambeaux de peau, et les intestins dont ils ont auparavant éliminé les excréments en les agitant vigoureusement. Les jeunes varans de Komodo se roulent souvent dans ces matières fécales ; ils dégagent ainsi une odeur qui les préserve du cannibalisme occasionnel des adultes.

Les mâles sont plus gros que les femelles, mais très semblables. Seule la disposition des écailles juste en avant du cloaque (la cavité située à la base de la queue, où débouchent les voies génitales, digestives et urinaires



différencie extérieure-

ment les deux sexes.

Lorsqu'un groupe, attiré par l'odeur, est rassemblé autour d'une charogne, des opportunités de parade se présentent. La plupart des accouplements ont lieu de mai à août. Au cours des combats de parade, les mâles se dressent sur la queue, luttant avec leurs pattes antérieures pour déséquilibrer l'adversaire. Le sang coule souvent, et le perdant s'enfuit... ou reste étendu.

Le vainqueur commence alors par donner de petits coups de langue sur le museau, puis sur le corps d'une femelle, en particulier sur la tempe et dans le pli situé entre le torse et les pattes postérieures. La stimulation est aussi chimique, grâce aux sécrétions de glandes cutanées. Avant l'accouplement, le mâle libère par son cloaque une paire d'hémipénis. Il rampe ensuite sur le dos de la femelle et insère dans son cloaque l'un des deux hémipénis tumescents, selon sa position par rapport à la queue de la femelle.

La femelle pond en septembre, après les mois les plus chauds de la saison sèche. Ce délai entre le premier accouplement et la ponte offre aux ovules non fécondés ont une seconde chance de fécondation, lors d'un autre accouplement. Les œufs sont déposés dans une cavité creusée à flanc de colline ou dans le nid d'un oiseau mégapode. Ces oiseaux terrestres, de la taille d'un poulet, construisent des monticules de terre mélangée à des brindilles, qui atteignent un mètre de hauteur et trois mètres de diamètre. Les dragons femelles couvent les œufs, mais on ne les a jamais vus s'occuper des jeunes.

Les nouveau-nés pèsent moins de 100 grammes, pour une longueur moyenne de 40 centimètres. Au cours des premières années après leur éclosion, ils sont souvent victimes de prédateurs, y compris de leurs congénères. Ils ont un régime varié composé d'insectes, de serpents et d'oiseaux. À l'âge de cinq ans, pesant 25 kilogrammes et atteignant deux mètres de longueur, ils s'attaquent à des proies plus grosses, tels les rongeurs, les singes, les chèvres, les sangliers, et la nourriture la plus courante du varan de Komodo : les cervidés. Leur lente

3. LES JEUNES VARANS de Komodo passent une grande partie de leur temps dans les arbres, évitant ainsi le cannibalisme occasionnel des adultes, plus gros et moins agiles.

croissance continue tout au long de leur vie, qui peut durer plus de 30 ans. Les plus grands varans de Komodo, trois mètres de longueur et 70 kilogrammes d'os, de dents et de muscles, règnent sur leurs minuscules îles.

Un passé de reptile

Les varans de Komodo sont apparentés aux dinosaures sans en descendre. Les deux groupes ont un ancêtre commun, et ils appartiennent à la sous-classe des

Diapsides, caractérisée par la présence de deux fosses dans la région temporale du crâne. Les plus anciens fossiles de ce groupe datent de la fin du Carbonifère, il y a environ 300 millions d'années.

Deux lignées distinctes sont issues de ces premiers représentants : les Archosaures, parmi lesquels figurent les dinosaures, et les Lépidosauriens primitifs de la fin du Paléozoïque (250 millions d'années), qui sont les ancêtres des varans. Alors que les dinosaures de certaines espèces se sont

redressés, les varans ont conservé une position rampante et des membres antérieurs puissants. Il y a 100 millions d'années, au Crétacé, des espèces apparentées aux varans actuels sont apparues en Asie centrale. Certaines étaient de grands lézards marins qui ont disparu avec les dinosaures, il y a environ 65 millions d'années. D'autres espèces, terrestres, atteignant trois mètres de long, chassaient les petits animaux ou mangeaient les œufs des dinosaures. Pendant l'Éocène, il y a 50 millions d'années, ces espèces ont envahi l'Europe, le Sud de l'Asie et l'Amérique du Nord.

Wolfgang Böhme a identifié la filiation des dragons. Son travail est aujourd'hui prolongé par des analyses de l'ADN et de la structure chromosomique de différentes espèces de varans et de familles apparentées. Ces analyses montrent que le genre est apparu en Asie, il y a 40 à 25 millions d'années.

Environ 20 millions d'années plus tard, lorsque des blocs continentaux de l'Australie et de l'Asie du Sud-Est se sont heurtés, de nombreuses espèces de petits varans ont colonisé l'Australie et occupé plusieurs niches écologiques. Plus de deux millions d'années après, une seconde lignée s'est différenciée dans toute l'Australie et dans l'archipel indonésien, qui, à cette époque, était bien plus proche de l'Australie qu'aujourd'hui, car les plateaux continentaux émergeaient. Appartenant à cette lignée, le dragon de Komodo s'est différencié, il y a environ quatre millions d'années.

Les varans australo-indonésiens ont exploité la faune particulière de leur habitat insulaire. Les îles ont une faune plus limitée que les grands domaines continentaux. Avantage par de moindres besoins énergétiques, un reptile devient plus facilement qu'un mammifère le principal prédateur.

Ces conditions favorisent les reptiles les plus gros, qui sont aussi les prédateurs les plus redoutables. Le varan *Megalania prisca*, éteint il y a environ 25 000 ans – des humains l'ont certainement rencontré! –, atteignait six mètres de longueur et pesait



4. CE VARAN DE KOMODO mange un cervidé (ci-dessus). Ses dents incurvées et crénelées (à droite, sur la mâchoire) déchirent la chair. La viande coincée entre les dents abrite de nombreuses bactéries pathogènes.



600 kilogrammes. Pourquoi l'aire de répartition du varan de Komodo s'est-elle réduite jusqu'à devenir le plus petit domaine de tous les grands prédateurs? Les zoologistes en débattent encore, tout comme ils cherchent à savoir comment les dragons sont arrivés jusqu'aux îles de Komodo, Flores, Rinca, Gili Motang et Gili Dasami.

Les variations du niveau marin au cours des derniers 80 000 ans, et les données bathymétriques recueillies dans l'aire de répartition du dragon montrent que Flores et Rinca étaient reliées jusqu'à il y a 10 000 ans. Par ailleurs, Gili Motang a été rattachée plusieurs fois au territoire formé par Flores et Rinca. L'île de Komodo est restée longtemps isolée, sauf il y a environ 20 000 ans, en plein milieu de la dernière glaciation. Selon mes calculs, la connexion a duré 4 000 ans.

Des fossiles révèlent que les populations de varans de Komodo ont été jadis plus importantes qu'aujourd'hui; elles occupaient jusqu'à l'île de Timor, à l'Est de Flores. De surcroît, les fossiles de deux éléphants nains (*Stegodon*, d'environ 1,5 mètre de haut) découverts sur les îles de Timor et de Flores indiquent que ces deux terres étaient suffisamment proches au cours du Pléistocène pour permettre les migrations.

Le rapetissement des éléphants a peut-être résulté des ressources limitées de l'île. Devenus des proies accessibles, les éléphants nains auraient favorisé l'apparition de varans plus gros, jusqu'au varan de Komodo actuel. Selon W. Auffenberg, le varan de Komodo a pu être «un prédateur très spécialisé des stégodontes nains».

Une histoire de lézard

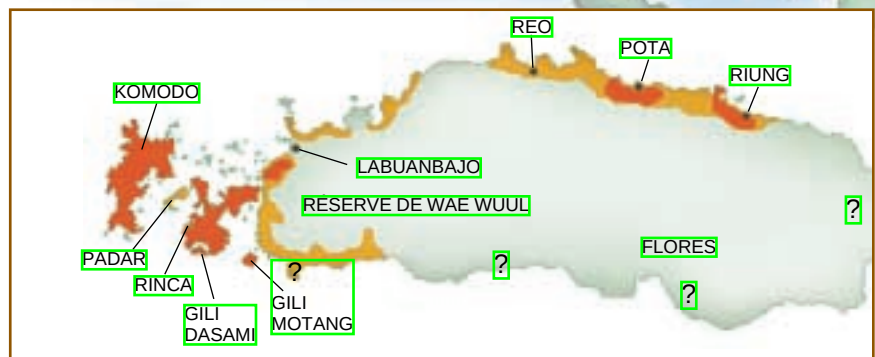
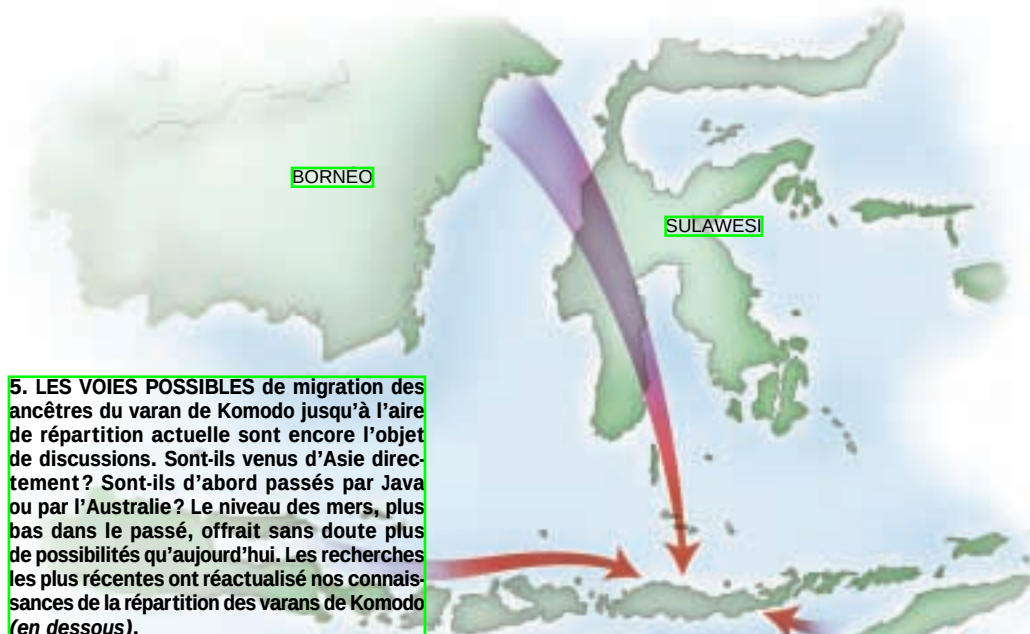
La zoologie eut connaissance du dragon pour la première fois en 1910, quand le lieutenant hollandais van Steyn van Hensbroek entendit des histoires locales à propos d'un «crocodile terrestre». L'équipage d'une flotte perlère hollandaise lui avait également parlé de créatures de six, voire sept mètres de long. Finalement, van Hensbroek découvrit et tua un dragon de Komodo d'une taille plus réaliste

6. L'EAU DOUCE est si rare à Komodo durant la saison sèche, que les varans s'en passent d'avril à décembre. Le reste de l'année, ils boivent souvent l'eau qui s'est accumulée dans les souilles des sangliers.

(2,1 mètres de longueur) dont il envoya des photographies et la peau à Peter Ouwens, directeur du Muséum zoologique de Bogor, à Java.

Ouwens recruta alors un chasseur qui tua deux dragons de Komodo

atteignant respectivement 3,1 et 2,35 mètres de longueur, et qui captura deux jeunes de moins d'un mètre. À l'examen de ces spécimens, le zoologiste identifia des varans. Il fut injuste avec van Hensbroek, puisque,



dans un article publié en 1912, il écrit que van Hensbroek avait seulement «reçu des informations que sur l'île de Komodo vivait un *Varanus* d'une taille inhabituelle». Ouwens termine son article en proposant de baptiser l'animal *Varanus komodoensis*.

Comprenant la rareté du varan de Komodo, les dirigeants locaux et le gouvernement colonial hollandais instaurèrent un plan de protection dès 1915. Après la Première Guerre mondiale, une expédition du Muséum zoologique de Berlin suscita un engouement mondial pour cet animal, et, en 1926, Douglas Burden et ses collègues du Muséum d'histoire naturelle de New York capturèrent 27 varans et décrivent leurs caractères anatomiques, d'après l'examen d'environ 70 individus.

Plus de 15 expéditions ont suivi celle de Burden, mais c'est à W. Auffenberg que l'on doit l'étude la plus exhaustive, du comportement alimentaire à la démographie et aux caractéristiques botaniques de leur territoire. Il a également mis en évidence la rareté des varans de Komodo. Selon de récentes estimations, moins de 3 500 varans vivent dans le Parc

national de Komodo, composé des îles de Komodo (1 700 individus), Rinca (1 300), Gili Motang (100) et d'une trentaine d'autres îlots. En revanche, le dragon a disparu de l'île de Padar depuis la fin des années 1970. Aucun recensement n'a été effectué sur l'île de Gili Dasami. Près de 2 000 autres varans vivaient dans certaines zones de l'île de Flores. Le varan de Komodo est aujourd'hui considéré comme une espèce vulnérable par l'Union internationale pour la conservation de la nature, et il est protégé par la Convention internationale sur le commerce des espèces en danger.

Ces 20 dernières années, dans certaines zones du Parc national de Komodo et sur l'île de Flores, le varan de Komodo a fait face au braconnage de ses proies favorites, les cervidés. La surveillance de cet habitat accidenté et, parfois, inaccessible est difficile. En 1977, deux jours après mon recensement sur l'île, dix cervidés étaient victimes des braconniers. Toutefois, suite à la baisse du braconnage sur l'île de Padar, les autorités étudient un programme de réintroduction.

Avec une superficie de 20 kilomètres carrés seulement, Padar n'abrite pas plus de 600 cervidés, ce qui limite le nombre de varans de Komodo. La diversité génétique, indispensable contre la consanguinité, est souhaitable dans une nouvelle petite population de varans.

Aussi ai-je étudié depuis 1994 le degré de ressemblance génétique à l'intérieur et entre les groupes de varans. J'analyse aujourd'hui l'ADN provenant du sang de 117 varans, prélevés entre 1994 et 1997 (voir l'encadré ci-dessous). Les résultats permettront aux autorités de choisir des populations génétiquement appropriées à la recolonisation de l'île de Padar.

Sur l'île de Flores, les varans sont menacés par l'empiétement des humains sur leur habitat. Les nouveaux arrivants brûlent la forêt, et les varans de Komodo figurent parmi les premières espèces qui disparaissent. Depuis 1971, j'ai observé par biotélémétrie les déplacements et la taille du domaine vital de varans adultes dans des régions à différents degrés de présence humaine, à la fois à l'intérieur et à l'extérieur du Parc

La chasse aux dragons

Ma thèse de doctorat en biologie de la conservation m'imposait d'étudier sur le terrain une espèce rare ou en voie de disparition, mais je voulais aussi effectuer des études de génétique moléculaire. Parmi les reptiles, seules deux espèces se présentaient : la tortue d'Hermann, *Testudo hermanni*, qui vit dans tout le Sud de l'Europe, et le varan de Komodo, qui était très mal connu. Tout le matériel nécessaire fut apporté par bateau ou fabriqué sur place. La construction des pièges pour les varans est difficile et longue. De plus, bien que rares, les attaques des varans de Komodo contre les êtres humains ne sont pas sans précédents. Enfin, il y avait l'odeur repoussante de ces animaux !

Je voulais des pièges mobiles pour immobiliser les varans de Komodo. J'ai donc construit des souricières, mais pour des souris... de trois mètres de longueur. Fabriqué avec du bois local et du grillage métallique, chaque piège mesurait trois mètres de longueur sur cinquante centimètres de hauteur et de largeur, et il comportait une porte. Une chèvre servait d'appât. Les varans de Komodo, attirés par l'odeur, pénétraient tout au fond du piège jusqu'à la viande. Sitôt l'appât touché, un



Un dragon entre dans un piège. Une fois immobilisé, un échantillon sanguin est prélevé. Libéré ensuite, l'animal est quelquefois équipé d'un transmetteur.

mécanisme fermait le piège. On pesait alors l'ensemble, afin de déterminer le poids de l'animal capturé. Puis la porte était ouverte, et l'animal tiré hors du piège. En raison de leur flore bactérienne buccale et de leurs contacts fréquents avec des charognes, les varans de Komodo sentent très mauvais. En outre, ces animaux vomissent ou défèquent quand ils sont menacés, en prévision d'un combat ou d'une fuite.

Enfin, la viande pourrissante de la chèvre ajoutait encore à l'odeur. Les pattes arrière sorties du piège étaient attachées. Le corps était ensuite extrait jusqu'aux pattes antérieures, que nous attachions également. Enfin, après avoir muselé l'animal par du ruban adhésif, nous procédions à un examen physique rapide et nous prélevions du sang.

Lorsque les animaux capturés avaient une longueur supérieure à 2,5 mètres, nous nous contentions de prélever du sang lorsqu'ils étaient dans le piège. Durant cinq mois, en 1994 et 1997, nous avons ainsi prélevé des échantillons sanguins de 117 varans de Komodo. En 1997, j'ai également attaché des transmetteurs à huit varans pour suivre leurs déplacements et déterminer la taille de leur territoire.



S. VILLOTEAU / S. VILLOTEAU

7. KRAKEN est née le 13 septembre 1992 au Zoo de Washington, où elle vit toujours. C'est le premier varan de Komodo né en captivité hors d'Indonésie. Elle mesure aujourd'hui 87 centimètres, du museau à la base de la queue, et pèse 22 kilogrammes. Cinquante-quatre autres varans ont ensuite éclos au zoo, des œufs pondus par la mère de Kraken, offerte par l'Indonésie en 1988. Ces varans vivent désormais dans des zoos aux États-Unis, au Japon, en Allemagne, aux Pays-Bas et à Singapour. En France, le parc de Thoiry héberge depuis peu des dragons de Komodo.

national. J'espère voir ainsi si la présence humaine déplace les varans ou les fait disparaître.

J'étudie également la répartition des populations de varans et le niveau de menace qui pèse sur eux en utilisant des pièges placés sur des sites choisis en fonction de leur habitat et des témoignages d'habitants. Ces 20 dernières années, la destruction de l'habitat a causé la disparition de l'espèce dans une zone de 150 kilomètres, le long de la côte Nord-Ouest de Flores. Les populations des côtes Nord et Ouest sont également menacées par la déforestation et, indirectement, par la chasse aux cervidés.

On ne préservera le varan de Komodo que si l'on préserve aussi tout son environnement naturel, auquel il est inexorablement lié. Par exemple, sachant que les dragons de Komodo attirent déjà 18 000 visiteurs chaque année, les régions Sud et Est de l'île, qui abritent des populations dispersées encore inconnues des zoologistes, pourraient être la base d'un plan de protection fondé sur l'écotourisme.

J'espère aussi favoriser la protection du dragon en modifiant l'usage des ressources naturelles. Les autorités locales se sont montrées intéressées par ce projet. Par exemple, l'agriculture sur brûlis pourrait être abandonnée au profit de cultures qui détruiraient moins d'espèces végétales, mais

économiquement intéressantes. De surcroît, en enseignant aux populations locales à fabriquer et à utiliser des briques, on éviterait qu'elles n'abattent les arbres à bois dur.

Le destin des varans de Komodo est aujourd'hui entre nos mains. Les décisions politiques, motivées par des soucis esthétiques, scientifiques ou économiques, peuvent nous mener vers un monde uniforme, mais elles peuvent aussi préserver le foisonnement de la nature et un peu du mystère que les cartographes du Moyen Âge traduisaient sur leurs cartes par l'avertissement : « Ici, il y a des dragons. »

Claudio CIOFI travaille aujourd'hui à la Société zoologique de Londres.

N. VILOTEAU, *Les dragons de Komodo*, Arthaud, 1992.

L. BROUGHTON, *A Modern Dragon Hunt on Komodo*, in *National Geographic*, vol. 70, pp. 321-331, 1936.

David ATTENBOROUGH, *Zoo Quest for a Dragon*, Lutterworth Press, 1957, réédition par Oxford University Press, 1986.

Walter AUFFENBERG, *The Behavioral Ecology of the Komodo Monitor*, University of Florida-University Presses of Florida, 1981.

Dick LUTZ et J. Marie LUTZ, *Komodo : The Living Dragon*, nouvelle édition, Dimi Press, Oregon, 1996.

La métamorphose d'Andreï Sakharov

GENNADY GORELIK

Andreï Sakharov est le «père» de la bombe à hydrogène soviétique. Pourtant il fut lauréat du prix Nobel de la paix pour son combat en faveur des droits de l'homme. Comment s'est-il ainsi transformé ?

« Le nuage devient gris, quitte rapidement le sol et monte en tournoyant, avec des reflets orangés [...] L'onde de choc me claque dans les oreilles et secoue violemment mon corps. Un bruit sourd, prolongé, menaçant retentit, puis s'atténue peu à peu [...] Le nuage, qui remplit maintenant la moitié du ciel, prend alors une couleur noire sinistre. »

Le 12 août 1953, Andreï Dmitrievitch Sakharov devient ainsi le père de la bombe à hydrogène soviétique. La voiture qu'il conduit dans le secteur de l'explosion s'arrête près d'un aigle qui tente en vain de s'envoler : ses ailes sont gravement brûlées. Sakharov s'émeut, et il écrira dans ses Mémoires : « On m'a dit que des milliers d'oiseaux sont détruits à chaque test ; ils s'envolent au moment de l'éclair, mais retombent ensuite, brûlés et aveuglés. »

Les victimes des tests de ses bombes, de plus en plus efficaces, l'ont tourmenté durant toute sa vie, mais ses nombreuses tentatives infructueuses pour limiter les tests l'ont convaincu du peu de contrôle qu'il exerçait sur les armes qu'il avait créées.

Quel parcours intellectuel a conduit Sakharov à devenir l'avocat acharné des droits de l'homme ? Des documents naguère confidentiels et certains de ses écrits sont aujourd'hui conservés aux Archives Sakharov de Moscou et ils attestent une évolution naturelle, qui s'enracine dans sa participation au programme soviétique d'armement. Pendant des années, Sakharov a jugé que l'Union soviétique devait disposer d'un armement nucléaire et thermonucléaire capable d'éviter une attaque par les

États-Unis. Selon lui, cet équilibre était indispensable pour prévenir une agression de leur part. Sa transformation ne résulte pas de l'émergence d'une idée différente à ce sujet, mais plutôt d'une meilleure connaissance des armes et de la politique militaire.

Un gâteau roulé

Sakharov naît le 21 mai 1921, dans une famille de l'intelligentsia moscovite. Dans son enfance, ses parents donnent l'exemple de la dignité, de l'entraide et du respect du travail. Son père, professeur de physique et auteur de livres de vulgarisation scientifique, est un homme droit et humain. En 1938, à la veille de la guerre contre l'Allemagne, le jeune Andreï entre à l'Université de Moscou. Une faiblesse cardiaque lui évite l'incorporation militaire, mais, désireux de contribuer à l'effort de guerre, il refuse de poursuivre ses études supérieures. C'est donc en tant qu'ingénieur dans une usine de munitions, à Olyanovsk, qu'il invente des systèmes magnétiques pour tester les balles fabriquées. Il rencontre, dans l'usine, Klavdia Vikhireva, une technicienne de laboratoire, qu'il épousera à l'âge de 22 ans.

À cette époque, il résout également quelques problèmes de physique ; son père transmet les solutions à Igor Tamm, le plus influent des physiciens de l'Institut de physique de Moscou, et, au début de l'année 1945, Sakharov est invité à préparer une thèse sous sa direction.

Selon Sakharov lui-même, son destin – et peut-être celui du monde

entier – bascule au cours de la nuit du 6 août 1945, lorsque la première bombe atomique explose sur Hiroshima.

Ses travaux en physique pure sont de premier ordre. Sa théorie sur la propagation des sons dans des liquides contenant des bulles a été très utile pour la mise au point des sonars qui détectent les sous-marins. Il calcule également comment les particules nommées muons catalysent la fusion de deux noyaux atomiques. Les muons remplaceraient les électrons, de sorte que les atomes deviendraient beaucoup plus petits ; on pourrait alors rapprocher davantage les noyaux et, de ce fait, les faire fusionner plus facilement.

Passionné de physique fondamentale, Sakharov refuse deux fois de participer au programme d'armement nucléaire soviétique, mais, un jour de 1948, Tamm et ses collaborateurs, dont Sakharov, reçoivent l'ordre d'étudier la faisabilité d'une bombe à hydrogène.

Dans une bombe atomique, la fission de noyaux lourds, tels que l'uranium 235, en deux fragments, s'accompagne d'une libération d'énergie. À l'inverse, une bombe à hydrogène résulte de la fusion de noyaux légers, le plus souvent du deutérium et du tritium. Ces isotopes de l'hydrogène, dont les noyaux sont respectivement composés de un proton et un neutron, et de un proton et deux neutrons (contre un proton seulement pour l'hydrogène),

1. ANDREI SAKHAROV en 1950. Cette année-là, il est assigné à résidence dans une ville secrète soviétique, où il met au point les bombes à hydrogène.



PHOTO: BOUTIER

libèrent une quantité d'énergie plus grande encore quand ils fusionnent.

La fusion thermonucléaire nécessite le contact de deux noyaux chargés positivement, malgré leur répulsion mutuelle. Yakov Zel'dovich, un brillant physicien qui dirige la recherche théorique pour le programme d'armement nucléaire, propose d'utiliser l'énergie libérée par une réaction de fission pour

provoquer la fusion à l'intérieur d'un tube de deutérium. Ce procédé, surnommé *Truba* (qui signifie «tube» en russe), dérive certainement d'un plan de la «superbombe» américaine transmis aux Soviétiques par le physicien et espion Klaus Fuchs en 1945.

Sakharov utilise ses compétences en physique théorique et en ingénierie pour déceler les inconvénients de

Truba. Il propose un mécanisme radicalement différent, la *Sloika*, du nom d'une pâtisserie russe analogue aux roulés à la confiture : une sphère, composée d'une bombe atomique centrale, est entourée de couches alternées de deutérium et d'éléments lourds, tel l'uranium naturel. Les électrons libérés par l'explosion atomique centrale compriment l'uranium et provoquent la fusion du deutérium. Celle-ci libère des neutrons qui permettent la fission de l'uranium, et ainsi de suite. Les Soviétiques nomment ce processus «sakharisation», littéralement «sucrage» (le mot *sakhar* signifie «sucre», en russe). Vitaly Ginzburg améliore le principe en proposant le deutériure de lithium à la place du deutérium.

Grâce à ces contributions, les Soviétiques rattrapent les Américains, qui ne découvrent les défauts de la «superbombe en tube» qu'en 1950. Stanislaw Ulam et Edward Teller, du Laboratoire de Los Alamos, conçoivent alors, rapidement, un nouveau modèle : la course aux armements thermonucléaires est engagée.

Sakharov, patriote, est fasciné par la physique de la fusion, et il met beaucoup d'ardeur dans ses études de la bombe. Il pense que la «parité stratégique» ou la «dissuasion» empêcheront toute guerre nucléaire. Son investissement émotionnel dans le projet est immense : «La force destructrice monstrueuse, l'échelle de notre entreprise et le prix payé par notre pays pauvre, affamé, déchiré par la guerre [...] tout cela stimulait notre sensibilité et nous incitait à faire un maximum d'efforts pour que les sacrifices – que nous acceptions comme inévitables – ne soient pas vains. Nous étions habités par une véritable psychologie de la guerre.»

Une ville secrète

Toutefois, Sakharov ne perd pas son sens critique : invité à adhérer au Parti communiste, il refuse en raison des crimes commis par le Parti. En mars 1950, Tamm et lui-même sont exclusivement affectés au travail sur la bombe dans une ville secrète où vivent et travaillent les concepteurs d'armes. Ce centre militaire a été construit par des prisonniers de la vieille ville de Sarov, siège d'un célèbre monastère orthodoxe, à environ 500 kilomètres de Moscou. La ville entière, entourée de fils de fer barbelés, est effacée de toutes les cartes. Elle n'est connue que des initiés, notamment sous le nom de



Semen Gorchakov

2. LE VIEUX MONASTÈRE DE SAROV. Sakharov apprit ultérieurement que le centre militaire d'Arzamas-16 avait été construit par des prisonniers de Sarov, une ville renommée pour son monastère orthodoxe, située à environ 500 kilomètres de Moscou.



Viet Museum and Archive

3. LE CENTRE DE RECHERCHES où naquit la bombe à hydrogène soviétique. Toute la ville était entourée de fils de fer barbelés et rayée des cartes. Elle était connue sous divers noms de code, notamment Arzamas-16.

code Arzamas-16. Parfois aussi, elle est surnommée Los Arzamas, en référence à la ville américaine où se déroule le projet Manhattan.

Avec les autres physiciens d'Arzamas, Sakharov passe ses journées à affiner les détails de la bombe, mais il trouve le temps de mettre au point une théorie de confinement des plasmas. Les plasmas sont des sortes de gaz où les électrons sont séparés des atomes. Un plasma détruirait n'importe quel mur fait de matière, mais on peut le confiner dans un champ magnétique. Ce principe, à l'origine du réacteur Tokamak, reste aujourd'hui l'idée la plus prometteuse pour produire de l'énergie à partir de réactions contrôlées de fusion. En russe, *tokamak* désigne une chambre à bobine magnétique ayant la forme d'un tore (voir la figure 6).

En novembre 1952, la première bombe thermonucléaire américaine explose. Neuf mois plus tard, la *Sloika* est prête. Cependant, à la dernière minute, le physicien Viktor Gavrilov, qui connaît la météorologie, envisage la propagation des retombées radioactives de l'explosion et ses conséquences sur les populations voisines. Personne n'a songé à ce problème, mais les physiciens évaluent rapidement la configuration des retombées et concluent qu'il faut évacuer des milliers de personnes. La recommandation est suivie d'effet, bien que, comme Sakharov l'apprend ensuite des autorités, ce type de manœuvre provoque généralement 20 à 30 morts.

Le test de la *Sloika* est un succès : l'énergie libérée est environ 20 fois supérieure à celle de la bombe d'Hiroshima. En quelques mois, Sakharov devient, à l'âge de 32 ans, le plus jeune physicien élu à l'Académie des sciences soviétique, il reçoit le prix Staline et est promu Héros du travail socialiste (il le sera encore à deux reprises). Le gouvernement soviétique nourrit de grands espoirs à l'égard de Sakharov : il est brillant, sans être ni juif (contrairement à Zel'dovich et Ginzburg) ni compromis sur le plan politique (contrairement à Tamm).

Comme le rayon d'action de la *Sloika* ne peut être augmenté indéfiniment, Sakharov et Zel'dovich imaginent un nouveau mécanisme, où des photons engendrés par une réaction de fission initiale compriment un tube et déclenchent ainsi la fusion à l'intérieur de celui-ci. La puissance d'une telle bombe, proche de celle

conçue par Ulam et Teller, est directement fonction de la longueur du tube utilisé.

Les éclats volent

Les physiciens d'Arzamas-16 discutent assez librement de politique, et ils disposent des publications de l'Ouest, tel le *Bulletin of the Atomic Scientist*, qui traite des dimensions sociales de l'énergie nucléaire et qui montre l'influence des chercheurs occidentaux sur la politique de leur pays. Sakharov est alors influencé par Leo Szilard, inventeur de la réaction en chaîne à l'origine de la bombe atomique, mais devenu militant antinucléaire. Les écrits d'Albert Einstein, de Niels Bohr et d'Albert Schweitzer l'influencent également.

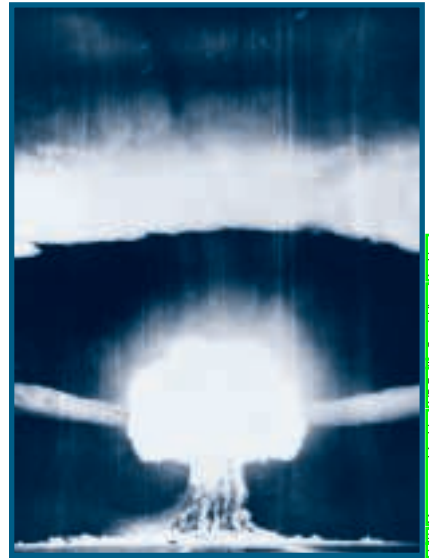
En 1955, le directeur administratif d'Arzamas-16 informe les autorités des opinions politiques dangereuses de Sakharov. Par exemple, il refuse d'être élu au Conseil des députés du peuple, une assemblée législative d'Arzamas. Ce comportement «dangereux» empirera.

En novembre 1955, l'onde de choc de l'explosion d'une des nouvelles bombes à hydrogène tue un soldat dans une tranchée qui s'effondre et un enfant dans une maison qui est soufflée. Sakharov est bouleversé. Lors du banquet de célébration, il déclare : «Que tous nos systèmes explosent avec le succès d'aujourd'hui, mais toujours sur des sites de test, et jamais sur des villes.» Le maréchal Mitrofan Nedelin lui rétorque que les scientifiques doivent se contenter de fabriquer les bombes et laisser les militaires décider de l'endroit où ils les font exploser. Cette remarque ne remet pas Sakharov en place : il apprend alors la génétique, afin de savoir combien de cancers et combien de mutations seront dus aux essais nucléaires.

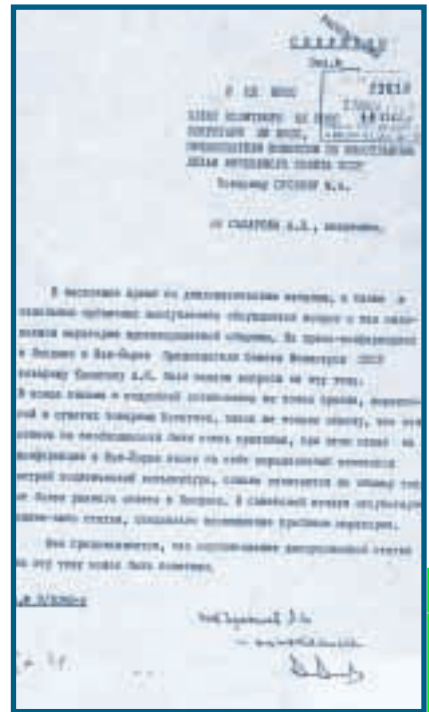
En 1957, la presse américaine annonce la conception d'une bombe «propre», avec peu d'éléments de fission et aucune retombée radioactive. Néanmoins Sakharov calcule qu'une bombe «propre» d'une mégatonne (l'équivalent d'un million de tonnes de TNT) provoquerait dans le monde 6 600 morts par cancer ou par mutation au cours d'une période de 8 000 ans, en raison de l'interaction des neutrons de l'explosion et de l'azote atmosphérique (cette interaction forme du carbone 14 radioactif). En 1958, il écrit, dans le journal soviétique *Energie atomique*, que les essais atmosphériques de toute

bombe à hydrogène – «propre» ou non – sont dangereux.

Le premier secrétaire du Parti communiste soviétique, Nikita Khrouchtchev, cautionne cet article à des fins politiques : en mars 1958, il annonce la suspension des essais nucléaires soviétiques. En revanche, Sakharov ne



4. *SLOIKA*, une bombe à hydrogène fondée sur une idée de Sakharov, fut testée en 1953 à Semipalatinsk, en Sibérie. La photographie montre le champignon atomique et l'onde de choc.



5. DANS CETTE LETTRE, Sakharov demande à son gouvernement (la première page est reproduite) l'autorisation de publier un article où sont décrits les dangers des missiles antibalistiques. L'autorisation lui est refusée, Sakharov écrit alors un essai qui parvient à l'Ouest.

joue pas avec les résultats de ses études ; il se préoccupe sincèrement des victimes qui s'ajoutent à toutes les personnes qui souffrent et meurent déjà dans le monde. L'impunité de ces crimes le contrarie : comment prouver qu'un décès est dû à des radiations ?

Dans son livre intitulé *Sur l'avenir nucléaire*, Teller publie la même année l'évaluation faite par la majorité des experts américains et soviétiques : la dose de radiations émises lors des essais sera environ 100 fois inférieure à celles produites par d'autres sources, tels les rayons cosmiques ou les examens radiographiques médicaux. Selon lui, les radiations dues aux essais diminuent l'espérance de vie d'environ deux jours, tandis qu'un paquet de cigarettes quotidien la réduit 1 000 fois plus. « On a prétendu, conclut-il, qu'il ne faut pas mettre de vie humaine en danger. N'est-il pas plus réaliste, et plus conforme aux idéaux de l'humanisme, de tendre vers une vie meilleure pour toute l'humanité ? » Pour Sakharov, cette affirmation ressemble au proverbe soviétique : « Quand on fend du bois, les éclats volent. » Dès lors, il se sent responsable de toute mort provoquée par les retombées des essais.

Pendant le moratoire soviétique, les Américains et les Britanniques poursuivent leurs essais. Après six mois d'interruption, Khrouchtchev, furieux, ordonne la reprise des essais. Sakharov convainc alors Igor Kurchatov, le responsable scientifique du programme nucléaire, d'expliquer à

Khrouchtchev les avantages des simulations et des expériences à petite échelle : Khrouchtchev rejette le conseil. Quand Sakharov réitère sa demande, en 1961, Khrouchtchev lui répond de laisser la politique à ceux qui y comprennent quelque chose.

En 1962, Sakharov apprend que deux modèles de bombes à hydrogène très similaires vont être testés. Il tente d'éviter un des essais en utilisant toutes ses ressources. En vain. Lorsque la deuxième bombe explose, il pose le front sur son bureau et pleure.

En 1963, en revanche, Sakharov gagne une bataille. À cette époque, Khrouchtchev est affaibli par l'échec de ses réformes agricoles et industrielles, ainsi que par le désaccord avec la Chine. Quand Sakharov propose de renoncer aux essais les plus dangereux – les essais à ciel ouvert –, son idée est acceptée par les autorités. Le Traité d'arrêt limité des essais dans l'atmosphère, les mers et l'espace est signé à Moscou, le 5 août, par les États-Unis, l'URSS et le Royaume-Uni (la France ne le signe pas !). Sakharov est à juste titre fier de sa contribution ; les effets dangereux des essais à ciel ouvert cessent de le tourmenter.

Après ce succès, Sakharov abandonne le programme sur la bombe, mais il considère que son action politique, en matière d'armement, n'est pas inutile. Simultanément, il revient à ses premières amours : la science pure. Par exemple, il identifie les conditions susceptibles d'expliquer l'excès de

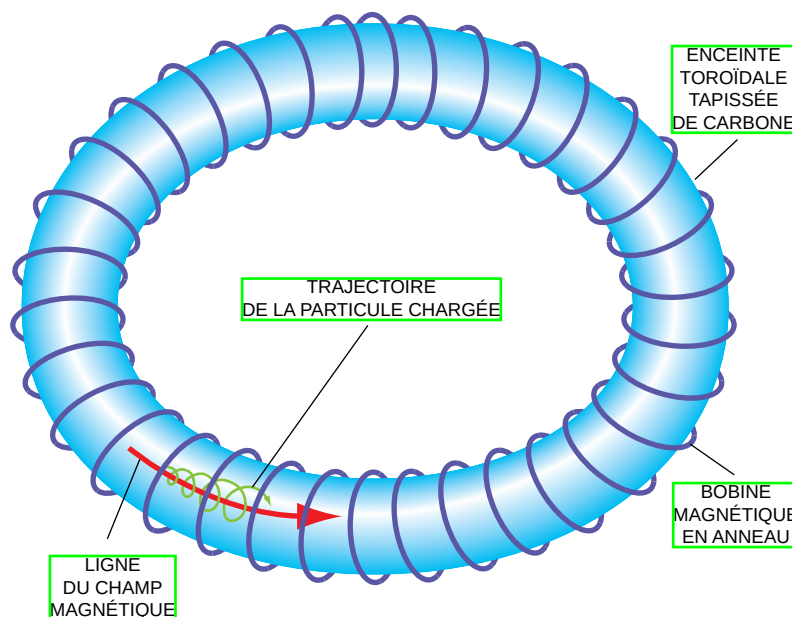
matière par rapport à l'antimatière dans l'Univers (voir *L'asymétrie de la matière*, par Helen Quinn et Michael Witherell, *Pour la Science*, janvier 1999). Vladimir Kartsev, un jeune physicien qui lui demande alors une préface pour un ouvrage de vulgarisation scientifique, se souvient d'un homme très heureux, plein d'énergie et d'idées.

Alea jacta est

En 1966, alors que Leonid Brejnev est au pouvoir depuis deux ans, Sakharov signe une pétition contre une dangereuse tentative de réhabilitation de Staline. En décembre de la même année, il participe à une manifestation en faveur des droits de l'homme. Sa lettre de soutien aux dissidents, adressée au gouvernement, lui vaut une importante diminution de salaire et la perte de l'un de ses postes administratifs.

Sa vision du monde se radicalise. En juillet 1967, il invite par courrier secret le gouvernement à accepter le moratoire sur le système de missiles antibalistiques proposé par les États-Unis parce qu'une course aux armements augmenterait la probabilité d'une guerre nucléaire. Il sollicite également l'autorisation de publier dans un journal soviétique un manuscrit de dix pages pour aider « les scientifiques américains à modérer les plus véhéments d'entre eux ». L'analyse de cet article montre que Sakharov se considère encore comme un expert dévoué aux « intérêts essentiels de la politique de défense soviétique ». Voyant cette autorisation refusée, Sakharov conclut que les autorités soviétiques sont inconscientes du danger qu'elles font courir au monde.

Au début de 1968, Sakharov commence l'écriture de ses *Réflexions sur le progrès, la coexistence pacifique et la liberté intellectuelle*, où il décrit le grave danger d'une guerre thermonucléaire et aborde d'autres sujets, telles la pollution, la surpopulation et la guerre froide. Il défend l'idée que la liberté intellectuelle – et, plus généralement, les droits de l'homme – représente l'unique base de la sécurité internationale, et il appelle à la convergence du socialisme et du capitalisme vers un système qui combinerait les meilleurs aspects des deux systèmes. Sakharov ne cache pas ces idées : ses textes sont dactylographiés par des secrétaires d'Arzamas-16 qui, automatiquement, en font une copie qui est transmise au KGB.



6. PLAN d'un réacteur Tokamak, d'après une idée et un dessin de Sakharov. Le plasma composé des noyaux de deutérium et de tritium est confiné par le champ magnétique toroïdal. Il atteint ainsi une température et une pression suffisantes à la fusion.

À la fin avril, Sakharov transmet cet essai radical au samizdat, le système de presse clandestine ; puis, deux mois plus tard, il l'envoie à Leonid Brejnev (qui en avait déjà connaissance grâce au KGB). En juillet, l'article est diffusé par la BBC et publié dans le *New York Times*. Sakharov se souvient avoir écouté l'émission de la BBC avec satisfaction : «Les jeux étaient faits».

Sakharov est alors assigné à résidence à Moscou et empêché de se rendre à Arzamas-16, où il a pourtant passé 18 ans de sa vie. Il reste un triple Héros du travail socialiste, qui, de surcroît, connaît les secrets les plus sensibles de la nation : il n'est limogé du programme de recherches sur la bombe que l'année suivante. Peu après, sa femme meurt d'un cancer, le laissant avec ses trois enfants, dont le plus jeune a 11 ans. Sakharov fait don de toutes ses économies à un centre anticancéreux et à la Croix-Rouge soviétique.

Il lui reste toutefois 20 ans à vivre, pendant lesquels il rencontre Elena Bonner, dont il tombe éperdument amoureux ; il reçoit le prix Nobel de la paix en 1975, passe sept années en exil à Gorki, et, paradoxalement, est élu au parlement soviétique sept mois avant sa mort.

«Si je me sens libre, affirme-t-il, c'est uniquement parce que seule mon analyse morale concrète fonde mon action.» Au cours des années 1970, l'un de ses collègues, Vladimir Ritus, lui demande pourquoi il s'était tant exposé. Sakharov répond : «Qui d'autre que moi aurait pu le faire?» Son destin et son travail sur la bombe à hydrogène lui avaient imposé des choix, il avait choisi.

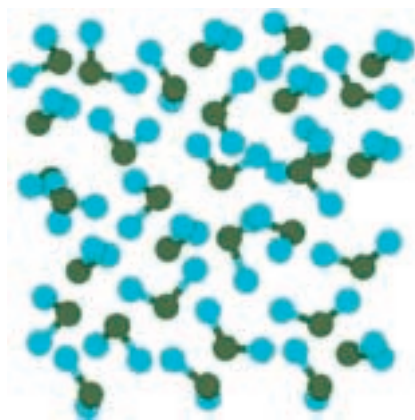
Gennady GORELIK est chercheur au Centre de philosophie et d'histoire des sciences de l'Université de Boston.

S. DRELL et L. OKUN, *Andreï Dmitrievich Sakharov*, in *Physics Today*, vol. 43, pp. 26-36, août 1990.

Alfred A. KNOPE, *Andreï Sakharov : Mémoires*, traduit du russe par Richard Lourie.

Sakharov Remembered : A Tribute by Friends and Colleagues, sous la direction de Sidney D. Drell et Sergei P. Kapitza, American Institute of Physics, 1991.

New Light on Early Soviet Bomb Secrets, numéro spécial de *Physics Today*, vol. 49, n° 11, novembre 1996.



La taille des molécules

ROLAND LEHOUCQ

Les liquides sont peu compressibles, forment des gouttes et s'évaporent. De ces observations, le physicien déduit la taille d'une molécule.

Les gaz sont compressibles, pas les liquides, répète-t-on au collège. Si les liquides sont si peu compressibles, c'est que leurs molécules sont presque jointives : en supposant que les molécules sont des sphères dures, deux molécules sont séparées par une distance environ égale à leur taille. Pour connaître la taille d'une telle molécule, il suffit ainsi de déterminer la distance entre deux molécules voisines.

Nous allons estimer cette distance de façon indirecte en tenant compte du fait que si deux molécules sont jointives, c'est qu'elles s'attirent.

SURFACES MINIMALES

Les molécules d'un liquide s'attirent pour former des gouttes, formes qui résultent de la tension de surface du liquide, dont on observe les effets par une expérience facile à imaginer. Tirons sur un film d'eau étendu dans un cadre métallique dont un côté est mobile (voir la figure 1). À cette traction, qui tend à augmenter la

surface du film, s'oppose la tension superficielle. Pour un cadre de un centimètre de largeur, on équilibre la tension superficielle (T) par un poids dont la masse est égale à 0,145 gramme (dans la pratique, le montage est différent, mais le principe est identique).

Pourquoi les liquides

répugnent-ils à ce que leur surface augmente ? Une molécule située à l'intérieur du liquide est attirée par toutes ses voisines de la même façon, de sorte que la force résultante qui s'exerce sur elle est nulle en moyenne (voir la figure 2a). En revanche, une molécule située en surface est frustrée : elle est attirée par les molécules de l'intérieur, mais comme il n'y a pas de molécules au-dessus de la surface, une force attire cette molécule vers l'intérieur du liquide (voir la figure 2b). Il s'ensuit que l'énergie de liaison d'une molécule de surface est inférieure à celle d'une molécule de l'intérieur. Pour amener une molécule en surface il faut donc dépenser de l'énergie. La création d'une interface requiert ainsi une énergie proportionnelle à l'augmentation de l'aire. Le quotient de l'énergie dépensée par l'aire créée est la tension superficielle (notée T , c'est une énergie par unité de surface ou une force par unité de longueur).

Ainsi, en l'absence de forces extérieures, un volume de liquide adoptera spontanément la forme qui minimisera son énergie, donc sa surface. De ce point de vue, la forme sphérique est la meilleure : à volume constant, c'est celle qui a la surface minimale. C'est la forme que prend le whisky du Capitaine Haddock lorsqu'il se trouve en impesanteur dans la bande dessinée *On a marché sur la Lune* ou celle que prennent des petites gouttes de mercure par exemple, pour lesquelles la gravité est négligeable.

Quelle énergie a-t-on dépensé pour augmenter de un centimètre carré la surface du film d'eau ? Cette énergie, ou travail, est mesurée par la descente du poids qui équilibre la tension superficielle quand la surface augmente de un centimètre carré. Le travail d'une masse m quand on la déplace d'une hauteur h est mgh , où g est l'accélération de la pesanteur. Ici, le travail est égal à 0,145 gramme multiplié par g multiplié par un centimètre, soit $1,42 \times 10^{-5}$ joule par centimètre carré. Attention, nous avons mesuré par cette expérience le double de la tension superficielle, car le film d'eau a deux interfaces avec l'air, il exerce donc une tension superficielle double.

L'ÉVAPORATION

Une dernière observation nous permettra d'évaluer la taille d'une molécule : les liquides s'évaporent. Les molécules d'un liquide s'agitent frénétiquement et la vitesse d'agitation moyenne augmente avec la température du liquide. Les molécules qui ont une énergie cinétique (caractéristique de l'agitation) supérieure à l'énergie qui les lie à leur voisines (énergie de liaison) peuvent s'échapper : le liquide s'évapore et il se transforme en gaz.

Habituellement, pour évaporer un liquide, on le chauffe, ce qui revient à augmenter la vitesse des molécules, donc leur énergie cinétique. On pourrait, par la pensée, séparer les molécules avec un couteau bien affûté : on découperait un volume du liquide en tranches d'épaisseur égale à la distance d entre les molécules. Pour un cube de un centimètre de côté il y a $1/d$ tranches (où d est en centimètre). Pour isoler toutes les molécules, il faut aussi effectuer $1/d$ découpes dans les deux directions perpendiculaires



dessins de Bruno Vautier

à la première, soit au total $3/d$ découpes (voir la figure 3).

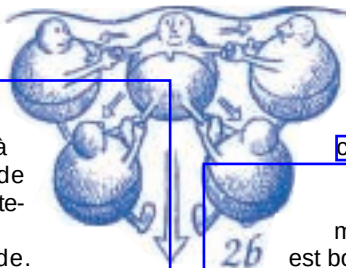
Pour ce travail de séparation, on dépense une énergie E égale à l'énergie de liaison de toutes les molécules contenues dans ce centimètre cube de liquide. Comme chaque découpe crée deux surfaces de un centimètre carré, elle consomme la même énergie que celle que nous avons déployée précédemment pour augmenter de un centimètre carré l'aire de l'interface séparant le liquide et l'air, soit $2T$ (puisque la tension superficielle est une énergie par unité de surface). Ainsi, ces $3/d$ découpes nécessitent une dépense d'énergie égale à $2T \times 3/d$, égale à l'énergie E de liaison d'un centimètre cube. Finalement, la distance d entre les molécules d'un liquide est donc égale à $6T/E$.

L'ÉNERGIE DE LIAISON

Reste à déterminer l'énergie de liaison. Pour cela il suffit d'éloigner les molécules en les évaporant et de calculer l'énergie nécessaire à cette évaporation, c'est-à-dire la variation d'énergie interne entre la température ambiante et l'ébullition. Tout d'abord, il faut amener l'eau à température ambiante (20 °C) jusqu'à la température d'ébullition (100 °C), c'est-à-dire augmenter sa température de 80 °C. La dépense d'énergie requise est alors égale au produit de sa capacité calorifique par l'élévation de température, soit 4,18 joules par centimètre cube et par degré que multiplie 80 °C.

Puis, l'évaporation requiert une énergie supplémentaire, égale la chaleur latente d'évaporation, soit 2 260 joules par centimètre cube. Toutefois, pour calculer l'énergie de liaison, il faudrait soustraire le travail fourni par la détente de la vapeur d'eau sur l'air ambiant, mais sa valeur relative est faible : l'essentiel de la variation d'énergie interne est due à l'évaporation.

Ainsi, le changement d'état du liquide au gaz requiert une grande quantité d'énergie. C'est pour cette raison que le refroidissement par évaporation est si efficace. Par exemple, quand on veut refroidir un objet qui est à une température supérieure à 100 °C, il suffit d'y verser de l'eau : en s'évaporant, l'eau pompe de



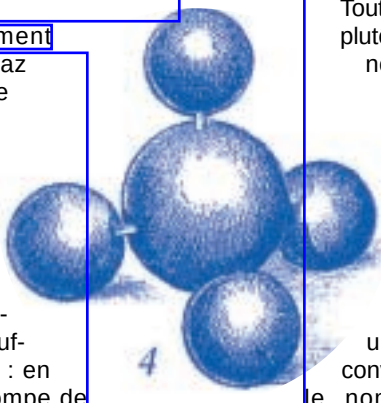
l'énergie à l'objet qui est refroidi efficacement. Finalement, l'énergie de liaison est égale à 2 420 joules par centimètre cube.

Pour l'eau, la valeur de $6T/E$ donne 0,18 nanomètre. L'ordre de grandeur est bon, mais la valeur est inférieure à la valeur expérimentale de 0,32 nanomètre. Pourquoi cette différence ? Parce que la molécule d'eau n'est pas une sphère (ses deux atomes d'hydrogène reliés à l'oxygène forment un angle de 104,5 degrés) et que des liaisons hydrogène imposent une orientation aux molécules d'eau, de sorte que les molécules sont plus écartées que si elles étaient des sphères (l'assemblage des molécules dans l'eau liquide est représenté dans le cartouche, à côté du titre de l'article).

Examinons une molécule plus proche d'une sphère, telle le tétrachlorure de carbone (CCl_4). Dans cette molécule, les atomes de chlore sont disposés au sommet d'un tétraèdre, symétriquement autour de l'atome central de carbone (voir la figure 4). Notre calcul donne $2T = 5,4 \times 10^{-6}$ joule par centimètre carré, et $E = 280$ joules par centimètre cube. La distance calculée est alors égale à 0,58 nanomètre alors que la valeur expérimentale est de 0,54 nanomètre.

Remarquons que l'on peut déduire cette distance à partir de la densité d'un liquide et du nombre d'Avogadro (le nombre de molécules dans une mole, soit $6,02 \times 10^{23}$) : la distance entre deux atomes est la racine cubique du quotient du volume occupé par une mole de molécules par le nombre d'Avogadro. La densité de l'eau liquide étant de un gramme par centimètre cube et sa masse molaire de 18 grammes par mole, la distance intermoléculaire trouvée est égale à 0,31 nanomètre.

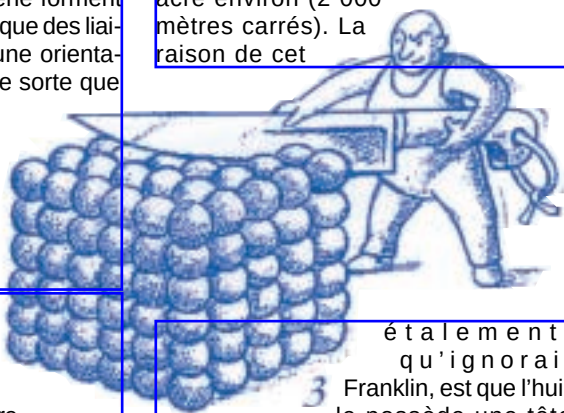
Toutefois, cette méthode est plutôt un moyen d'estimer le nombre d'Avogadro : on mesure la taille des molécules et, avec le volume molaire, on déduit le nombre d'Avogadro. En 1913, dans son livre *Les atomes*, le physicien français Jean Perrin avait d'ailleurs donné une dizaine de méthodes convergentes pour calculer le nombre d'Avogadro et



convaincre ses contemporains de la réalité des atomes et des molécules.

FILM MONOMOLÉCULAIRE

Finalement, mentionnons une observation due à Benjamin Franklin, le père du paratonnerre, qui visait à mettre en évidence l'existence d'un film monomoléculaire. En 1762, lors d'un voyage à Londres, Franklin avait remarqué qu'en versant une cuillère à café d'huile à la surface d'un étang, celle-ci s'étalait sur l'eau d'une surface d'un demi-acre environ (2 000 mètres carrés). La raison de cet



étalement, qu'ignorait Franklin, est que l'huile possède une tête hydrophile, qui pénètre dans l'eau, et une chaîne hydrophobe qui reste dans l'air : l'huile forme un film dont l'épaisseur est égale à la taille d'une molécule. Dans ce cas, le volume versé est le produit de la surface d'huile par l'épaisseur du film.

A partir des observations de Franklin, on déduit que la taille d'une molécule d'huile est de 2,4 nanomètres, un ordre de grandeur inférieur à la valeur réelle. La principale erreur réside dans la supposition que la couche formée est unique : en fait l'huile s'étale en plusieurs couches monomoléculaires superposées. Des expériences fondées sur le même principe permettent des mesures de la taille de molécules organiques variées. Ainsi, l'évaluation de la taille des molécules n'est qu'une question d'observations.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

J. PERRIN, *Les atomes*, Flammarion, 1991 (réédition de 1913).

W.F. WEISSKOPF, *Search for Simplicity*, in *American Journal of Physics*, vol. 53, p. 19, 1985.

P.-G. DE GENNES, *Comment s'étale une goutte ?*, in *Pour la Science*, p. 88, mai 1984.

J. BIGELOW (éditeur), *The Complete Quorks of Benjamin Franklin*, vol. V, J.P. Putnam's Sons, New York, 1887, p. 253.



La conjecture de Kepler démontrée

CHRISTOPH POPPE

La meilleure manière d'empiler des sphères identiques de manière aussi dense que possible est la plus simple.

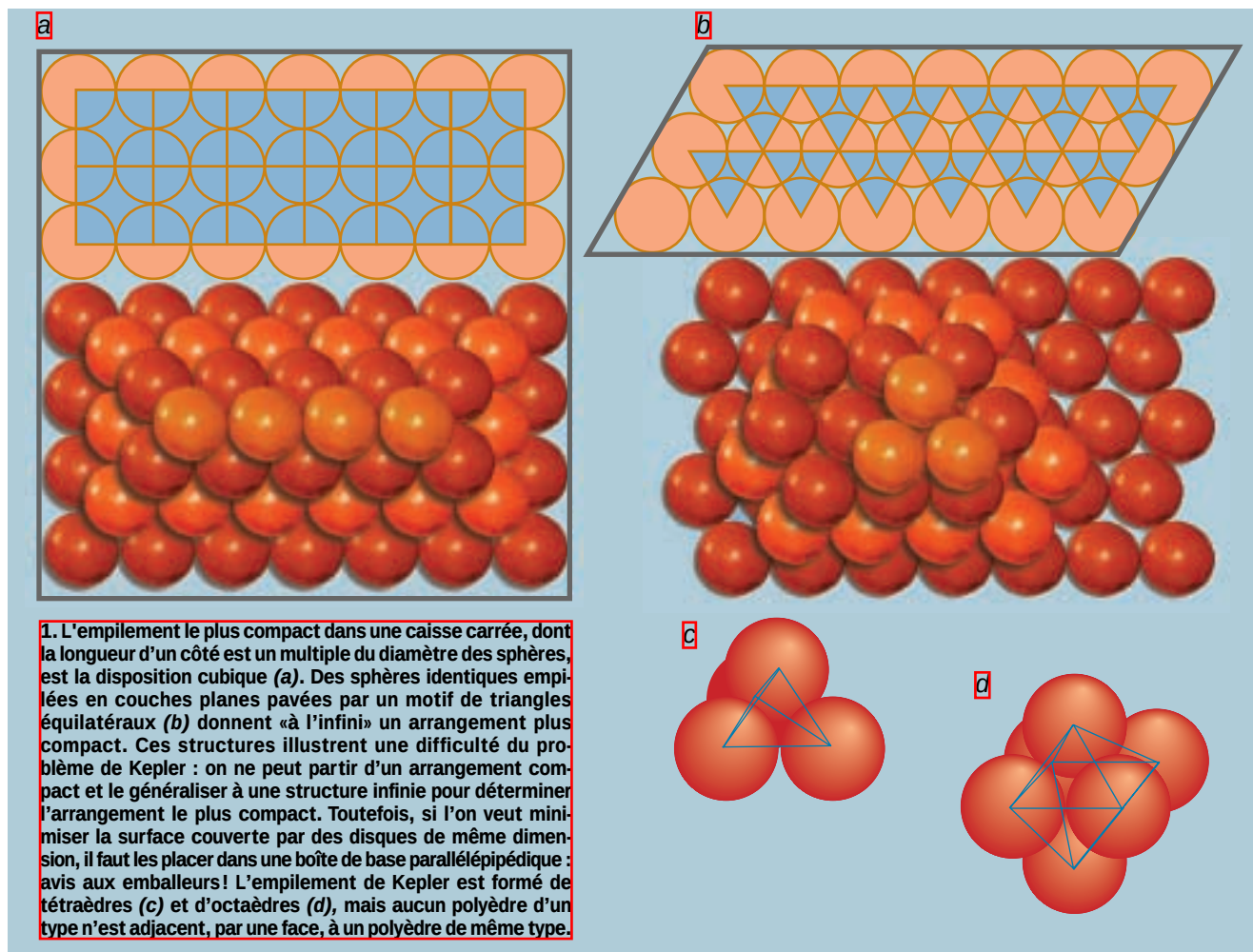
Les marchands de fruits résolvent tous les jours le problème posé par Kepler, il y a près de quatre siècles : comment placer des sphères identiques pour que la configuration obtenue soit la plus compacte possible ?

Prenons une grande quantité de sphères de même taille, des oranges par exemple, et posons-les une à une sur une table. Pour économiser de la place,

nous disposons chaque nouvelle sphère au contact de deux sphères déjà placées. Nous continuons ainsi à placer des oranges pour paver la totalité de la surface de la table. Les centres de tout ensemble de trois sphères en contact forment un triangle équilatéral, et c'est avec cet arrangement que nous plaçons le plus de sphères sur la surface de la table. Cette optimisation n'a rien d'étonnant, puisque nous pouvons paver un plan

avec des triangles équilatéraux sans laisser d'interstices. Donc, si nous voulons placer des disques sur un plan en laissant le moins de vides possible, la solution est connue.

Sur cette première couche, nous empilons de la même façon une seconde couche, dont les sphères se placent «d'elles-mêmes» dans les réceptacles que les groupes de trois sphères jointives de la première couche ont laissés. Un obser-



vateur attentif remarque qu'un trou sur deux reste vide : dans un triangle sur deux (bleu sur la figure 1b) est posée une sphère de la deuxième couche ; dans un triangle sur deux (vide), il n'y a pas de sphère. Dans les espaces «vides» de la seconde couche, nous déposons les sphères pour former la troisième couche, et ainsi de suite. Comme à chaque couche, nous sommes libres de choisir, soit les espaces correspondant aux triangles bleus, soit les autres, nous pouvons construire ainsi une infinité d'arrangements de sphères, dont les densités seront égales.

Bien entendu, un empilement de sphères de même taille ne remplira jamais l'espace aussi complètement qu'un empilement de cubes, car, entre les surfaces courbes des sphères, il subsiste nécessairement des vides. Le volume occupé par les sphères représente, dans le cas de l'arrangement des oranges, $\pi/\sqrt{18}$, soit 74,048 pour cent du volume total.

L'arrangement minimise-t-il les volumes vides ? La question paraît résolue et donc évidente, car nous ne pouvons imaginer un entassement plus dense. Le mathématicien et astronome Johannes Kepler, plus connu pour ses trois lois régissant le mouvement des planètes, avait déjà conjecturé, en 1609, qu'il était impossible d'obtenir mieux, c'est-à-dire qu'il était impossible d'inventer un empilement laissant moins d'espaces vides. Le problème est de formulation simple, la démonstration est étonnamment difficile.

Ainsi, l'histoire se répète : un génie, style Kepler, Fermat ou Goldbach, lance une hypothèse, et les scientifiques mettent des siècles à la prouver. Le problème

de Kepler résista aux efforts des spécialistes un peu plus longtemps que la conjecture, beaucoup plus célèbre, de Fermat. La conjecture de Kepler était néanmoins assez importante pour que, en 1901, David Hilbert la mentionne dans la série de problèmes que les mathématiciens avaient à résoudre au xx^e siècle.

Durant l'été 1998, Thomas Hales, de l'Université du Michigan à Ann Harbor, avança avec circonspection une démonstration de la conjecture de Kepler qu'il soumit à la vérification de ses collègues. Thomas Hales était prudent : la démonstration de la conjecture, comme d'ailleurs celle de Fermat, avait, par le passé, suscité nombre de déconvenues.

Toutes les prétendues démonstrations précédentes, et elles furent légion, étaient fausses. Ainsi, la démonstration de Wu-Yi Hsiang, mathématicien à l'Université de Californie, a fait couler beaucoup d'encre ; Wu-Yi Hsiang est à présent le seul à considérer que sa démonstration est exacte, contre l'avis de la communauté mathématique, laquelle le condamne «faute de preuve». Quant à la conjecture de Goldbach, elle résiste encore.

CE QUI EST PATENT... N'EST PAS ÉVIDENT

A l'opposé d'Andrew Wiles, qui a démontré la conjecture de Fermat après dix ans de travail dans le plus grand secret, Thomas Hales n'a jamais fait mystère de ses travaux. Son œuvre est à la disposition de tous sur le site Internet <http://www.math.lsa.umich.edu/~hales/countdown/kephistory.html>.



2. Kepler (1571-1630) vécut, à la fin de sa vie, dans cette maison de Linz, en Autriche.

Où la difficulté réside-t-elle ? Pourquoi est-il si difficile de démontrer selon les strictes règles de l'art mathématique un fait patent qui semble relever de la géométrie élémentaire ?

Premièrement, il est difficile d'imaginer des solutions meilleures que la plus évidente... parce qu'il n'en existe pas. Il y a également une inhibition : on a spon-

FORMULATION DE LA CONJECTURE PAR KEPLER

En général, des globules égaux, rassemblés dans un récipient quelconque, s'ordonnent de deux manières, selon les deux modes de leur disposition dans un plan quelconque.

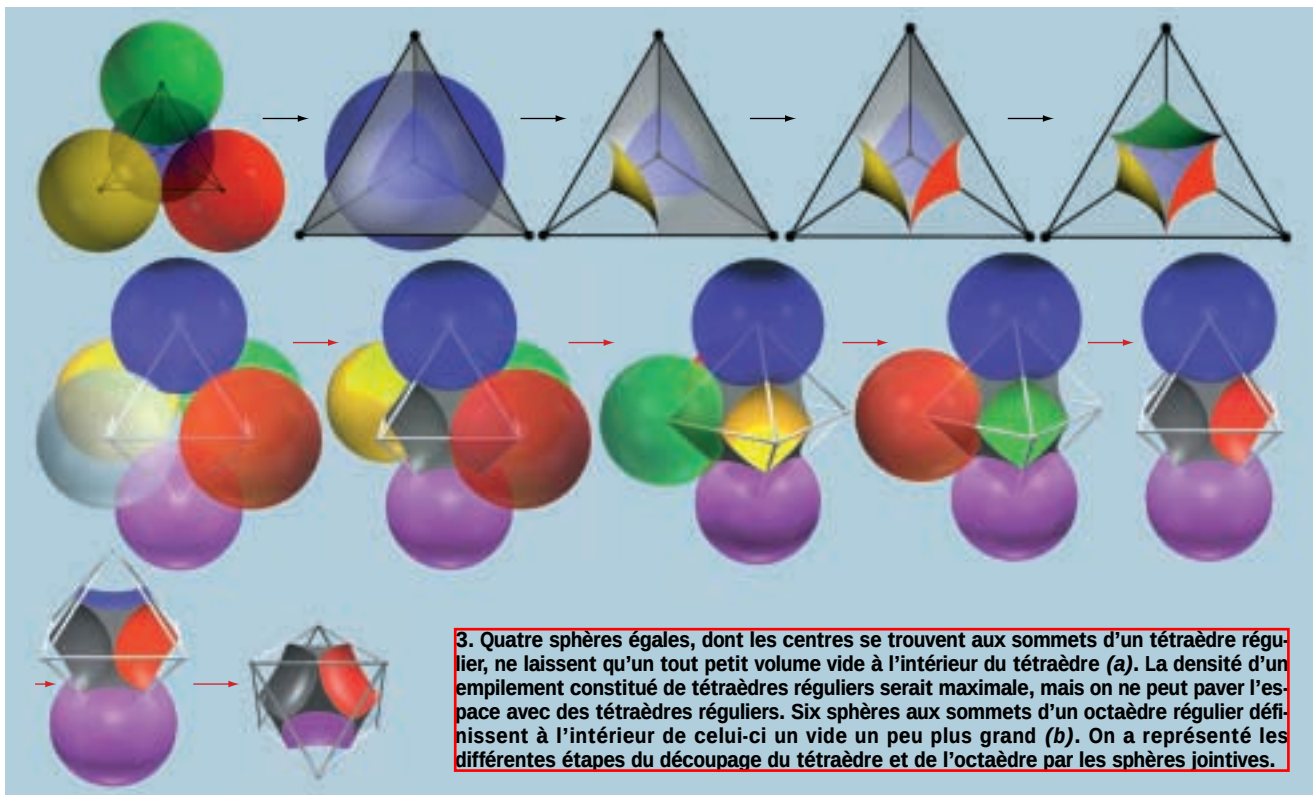
En effet, si vous réunissez à l'étroit des globules égaux errant sur un même plan horizontal, de sorte qu'ils se touchent réciproquement, ils s'unissent ou bien en forme triangulaire ou bien en forme carrée. Dans le premier cas, six globules en entourent un, dans l'autre cas, il y en a quatre. La proportion du contact est la même pour tous les globules, sauf les derniers. L'égalité ne peut être gardée par la forme pentagonale, l'hexagone se résout en triangles, de telle sorte que les deux ordres précités sont les seuls.

Si l'on en arrive à la construction solide la plus serrée qui puisse se faire, et qu'on superpose les uns aux autres les rangs d'abord ajustés en plan, ils seront ou bien en carré A ou en triangle B. S'ils sont en carré, ou bien un globe de l'ordre supérieur sera au-dessus d'un globe de l'ordre inférieur ou, au contraire, chaque globe du rang supérieur sera touché par les quatre qui l'entourent dans le même plan, par un au-dessus de lui et par un en dessous, et ainsi au total par six autres. L'ordre sera cubique et, après compression, on obtiendra des cubes, mais ce ne sera pas la disposition la plus

serrée. Dans la seconde manière, chaque globe est en contact, non seulement avec les quatre globes qui l'entourent dans le même plan, mais aussi avec quatre en dessous de lui, avec quatre au-dessus de lui et ainsi au total avec 12 : par compression, ces globes donneront des rhombiques. On rapprochera plutôt cet ordre-ci de l'octaèdre et de la pyramide. L'assemblage sera très serré, de sorte qu'ensuite aucune disposition ne permettra d'entasser un plus grand nombre de globules dans le même récipient.

D'autre part, si les dispositions construites en plan sont triangulaires, alors dans la construction solide, ou bien chaque globe de la couche supérieure se superpose à un globe de la couche inférieure dans une adaptation de nouveau lâche, ou bien chaque globe de la couche supérieure se trouve entre trois de l'ordre inférieur. De la première manière, chaque globe est touché par six qui l'entourent dans le même plan, par un au-dessus et par un en dessous, c'est-à-dire au total par huit autres. Cet ordre sera assimilé au prisme, et, par compression, on obtiendra, à la place des globules, des colonnes de six côtés quadrilatères avec deux bases hexagonales. De la deuxième manière, on obtiendra la même chose que plus haut, dans la deuxième possibilité de l'ordre carré.»

(L'Étrenne, traduction de Robert Halleux)



3. Quatre sphères égales, dont les centres se trouvent aux sommets d'un tétraèdre régulier, ne laissent qu'un tout petit volume vide à l'intérieur du tétraèdre (a). La densité d'un empilement constitué de tétraèdres réguliers serait maximale, mais on ne peut paver l'espace avec des tétraèdres réguliers. Six sphères aux sommets d'un octaèdre régulier définissent à l'intérieur de celui-ci un vide un peu plus grand (b). On a représenté les différentes étapes du découpage du tétraèdre et de l'octaèdre par les sphères jointives.

tanément tendance à déposer d'abord, comme nous l'avons fait, les sphères sur une surface plane, ce qui n'est pas une obligation.

Si l'on se limite ainsi aux empilements où les sphères sont disposées aussi régulièrement que les atomes dans un cristal, alors il est démontré que l'empilement que nous avons décrit est la meilleure solution. Les éventuels candidats pour un compactage encore plus dense doivent donc, s'ils existent, être moins ordonnés. Ils sont plus difficiles à imaginer et à construire, puis à répertorier.

Deuxièmement, on considère, dans le problème posé par Kepler, l'empilement

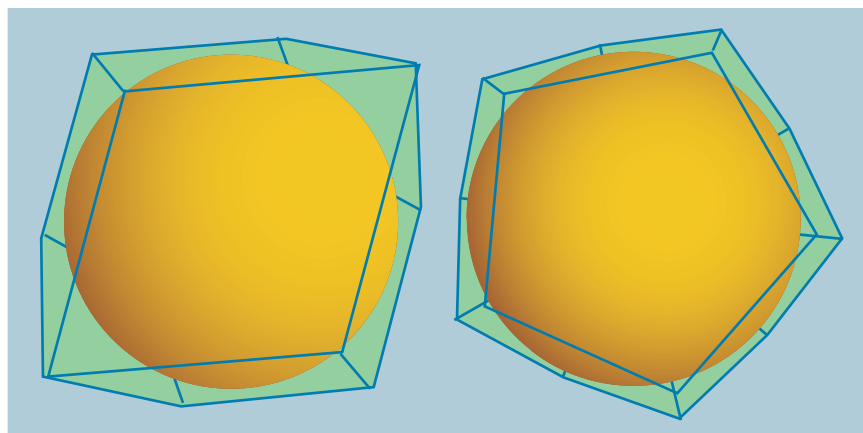
le plus compact pour un nombre infini de sphères. Le compactage avec un nombre fini de sphères est un problème qui semble proche, car on pourrait penser le prolonger à l'infini, mais tel n'est pas le cas. Ainsi, la tâche consistant à ranger un maximum d'oranges dans une caisse dépend de façon déterminante de la forme de la caisse, surtout pour les caisses de petite taille.

En fait, le passage du cas fini au cas infini est délicat : il y a, dans le cas infini, un nombre infini de variables, les coordonnées des centres des sphères. En dépit de ce grand nombre de choix d'arrangements, il n'y a pas, semble-t-il, de densité d'empilement plus grande (qu'il

convient d'ailleurs de définir par une valeur limite, puisque l'on tend vers le cas infini) que celle que l'on connaît. C'est ce qu'il fallait démontrer. Divers mathématiciens ont établi des bornes supérieures de la densité des différents compactages de sphères, qui s'approchent, sans l'atteindre, de la limite 0,74048...

Troisièmement, et c'est la difficulté principale, il existe des empilements de sphères plus denses que celui de Kepler, mais uniquement quand les sphères sont confinées dans un tout petit volume. Trois sphères disposées en triangle et une quatrième posée par-dessus ne laissent que très peu d'espace entre elles, moins que celui qui subsiste dans l'empilement régulier. Les centres des sphères forment un tétraèdre régulier (l'un des cinq solides platoniciens), et les sphères occupent le tétraèdre à 77,9636 pour cent. Avec un empilement constitué entièrement, ou du moins en majorité, de tels arrangements en tétraèdres, la densité limite de Kepler serait dépassée.

La partie fastidieuse des travaux de T. Hales est de démontrer que de tels empilements n'existent pas. Dans une disposition en tétraèdres, les sphères « se gênent » : on ne peut remplir un volume de tétraèdres réguliers sans laisser d'espaces. De plus, le gain local en densité de l'arrangement en tétraèdres disparaît déjà pour un nombre limité de sphères. Dès que l'on assemble plus de 53 sphères, n'importe quel arrangement tétraédrique est moins dense que celui des oranges.



4. L'antichambre d'une sphère dans l'empilement de Kepler est un solide limité par 12 losanges (rhombododécaèdre, à gauche). Plus réduite serait un antichambre en forme de dodécaèdre régulier, le solide platonicien formé de 12 pentagones réguliers (à droite). Toutefois le dodécaèdre régulier ne pave pas l'espace.

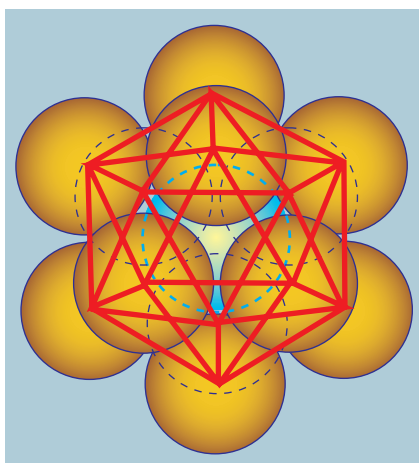
LA SOLUTION

L. Fejes-Toth a démontré, en 1940, que l'empilement hexagonal de disques était le plus compact possible : le problème plan était résolu. En 1953, ce mathématicien réduisit le problème de Kepler infini à un nombre fini, mais encore trop grand, de possibilités. Il imagina déjà que le problème pouvait être résolu par ordinateur. T. Hales a ramené le problème à l'analyse de 5 000 types d'empilements. L'ordinateur devint alors l'outil incontournable, quoique l'informatique joue, dans ce cas, un rôle moins fondamental que dans la fameuse démonstration du théorème des quatre couleurs. Ici, seule la comptabilisation et un certain nombre de calculs accessoires ont été délégués à la machine.

Dans l'empilement de Kepler, les tétraèdres réguliers sont toujours contigus, par une face, à des octaèdres réguliers (des solides platoniciens à huit côtés égaux) ; à chaque sommet se touchent huit tétraèdres et six octaèdres. L'arrangement de sphères correspondant est constitué de quatre sphères disposées en un carré, une sphère étant posée dans l'espace central par-dessus et une autre par dessous. À l'intérieur d'un octaèdre, il reste plus d'espace libre que dans le tétraèdre : la densité n'y est plus que de 0,720903...

Toujours est-il que l'on peut paver un volume avec des tétraèdres et des octaèdres sans espace vide, mais deux solides de même type ne se touchent jamais par une face. C'est le pavage qui correspond à l'empilement de Kepler.

T. Hales a réalisé le bilan du volume occupé par les sphères à l'aide d'une double «comptabilité». L'analyse des 5 000



5. On ne peut placer au maximum que 12 sphères égales en contact avec une sphère de même taille. Ces sphères ne sont pas jointives. La densité «de la cellule de Voronoï» est maximale pour cette configuration où les centres des sphères sont au sommet d'un icosaèdre.

cas individuels vise à montrer qu'aucun arrangement de sphères ne peut faire mieux qu'en accolant huit tétraèdres à un octaèdre, comme dans l'empilement de Kepler.

Pour établir un premier bilan comptable, il faut relier les centres des sphères voisines par des arêtes et étudier les polyèdres que forment ces arêtes. On est ainsi amené à considérer comme voisines des sphères qui sont proches, mais qui ne se touchent pas. Toutefois, le pavage de l'espace par des polyèdres n'est plus unique et naturel, comme il l'était dans le cas de Kepler ; rien n'empêche, en effet, de diviser un octaèdre par plusieurs plans perpendiculaires en quatre tétraèdres (non réguliers), sans introduire de nouveaux sommets. C'est là que cette méthode de comptabilité atteint ses limites.

Dans la seconde manière d'établir le bilan, les polyèdres enveloppent les sphères. À chaque sphère est associée une sorte d'antichambre (le nom officiel est «cellule de Voronoï»), ensemble de tous les points qui sont plus proches du centre de la sphère considérée que du centre de toute autre sphère. L'antichambre d'une sphère dans l'empilement de Kepler est un rhombododécaèdre (figure 4a). On peut paver l'espace avec ces rhombododécaèdres sans laisser de vide.

Plus l'antichambre est petite, meilleure est la densité d'empilement. Quelle est la plus petite antichambre possible ? Une sphère peut avoir au maximum 12 sphères voisines qui la touchent, comme on le sait depuis le siècle dernier. Comme d'habitude, le volume minimal de l'antichambre est atteint pour l'arrangement présentant la symétrie maximale : les 12 sphères contiguës sont placées aux sommets d'un icosaèdre régulier. L'antichambre est alors un dodécaèdre et la densité d'empilement est égale à 0,754737... ; malheureusement on ne peut pas empiler des dodécaèdres sans laisser d'espaces vides.

En combinant habilement ces deux méthodes de comptabilisation (constructions de polyèdres liant les centres des sphères et examen de cellules de Voronoï), T. Hales réussit à régler le sort des 5 000 empilements. Un seul cas était notablement plus difficile que tous les autres. L'élève de T. Hales, Samuel Ferguson, a écrit une thèse sur ce sujet ; dans ce cas, les sphères sont placées aux sommets d'un prisme ayant pour base un pentagone régulier et des parois carrées, que l'on peut coiffer en haut et en bas d'un couvercle plat de cinq triangles équilatéraux.

Finalement, toutes ces réflexions et bien d'autres encore mènent à des problèmes de minimisation. Les



SCIENCE

6. De nombreux mathématiciens ont établi des limites supérieures de la densité de compactage : 0,828 (Rankin, 1947), 0,7797 (Rogers, 1958), 0,77844 (Lindsey, 1987), 0,77836 (Muder, 1988), 0,7731 (Muder, 1993), jusqu'à ce que Thomas Hales (ci-dessus) démontre que la limite était celle déterminée par Kepler : 0,74048...

12 sphères tangentes à la sphère centrale ne sont pas tangentes entre elles, mais mobiles ; en fonction de leur position, le volume de l'antichambre varie. Il existe toujours un continuum d'arrangements possibles, que l'on n'arrive à maîtriser que si l'on trouve, parmi tous les arrangements d'une catégorie, le plus favorable et que l'on vérifie ensuite que même celui-là n'est pas meilleur que l'arrangement de Kepler. Il faut donc minimiser, dans de nombreux cas individuels, une fonction non linéaire de plusieurs variables.

Kepler a laissé son nom au problème, mais il ne l'a pas inventé : en 1600, le mathématicien anglais Thomas Harriot formula la question de l'empilement compact de sphères. Tenant de l'atomisme, il considérait les atomes comme des sphères et pensait avoir déterminé la densité maximale d'un solide.

Les considérations sur le problème de l'empilement des sphères ont des applications en codage : si, dans un espace à n -dimensions, le centre de chaque sphère représente un nombre binaire, il faut s'assurer que les autres nombres sont également distants deux à deux pour qu'une erreur ait le moins de chances possibles de transformer un nombre en un autre. Donc le problème est moins futile qu'il ne le paraît aux bécotins, et, comme toujours, les mathématiques triomphent.

Christoph PÖPPE est rédacteur à la revue *Spektrum der Wissenschaft*, édition en langue allemande de *Scientific American*.



Chœurs lumineux

IAN STEWART

Comment les lucioles synchronisent leurs émissions de lumière.

Peu après le coucher du soleil, en Asie du Sud-Est, la vie offre à ceux qui savent aller l'admirer l'un des plus remarquables spectacles : des nuées de lucioles clignotent en chœur. Dans les années 1930, le biologiste Hugh Smith décrit le phénomène : « Imaginez un arbre de près de 15 mètres de haut et dont, semble-t-il, chaque feuille porte une luciole. Toutes ces lucioles clignotent à l'unisson, environ trois fois par deux secondes. Entre chaque émission de lumière, l'arbre s'obscurcit complètement. Imaginez une dizaine de kilomètres de bord de rivière, avec une file ininterrompue d'arbres qui portent tous des lucioles ; tous les arbres s'éclairent ensemble, et tous s'éteignent ensemble ! »

Pourquoi les émissions sont-elles synchrones ? Une théorie propose que l'évolution a présidé à l'apparition de ce curieux

phénomène : seuls les mâles émettent de la lumière, afin d'attirer les femelles ; or, des flashes simultanés se voient de plus loin, surtout dans les zones où la végétation est dense.

Il existe une autre explication, mathématique. Les lucioles émettent de la lumière grâce à un composé qui réagit chimiquement. Elles ont une réserve de ce composé, qu'elles libèrent par bouffées, selon un cycle. Tout se passe comme si les lucioles comptaient régulièrement de 0 à 100, libérant le composé à 100, tandis qu'elles remettent alors le compteur à 0. L'état de la luciole est ainsi déterminé par la valeur du compteur interne. C'est la « phase » de leur cycle.

Un tel cycle est un oscillateur, c'est-à-dire un système dont la dynamique naturelle est périodique. Les oscillateurs sont nombreux, dans le monde vivant :

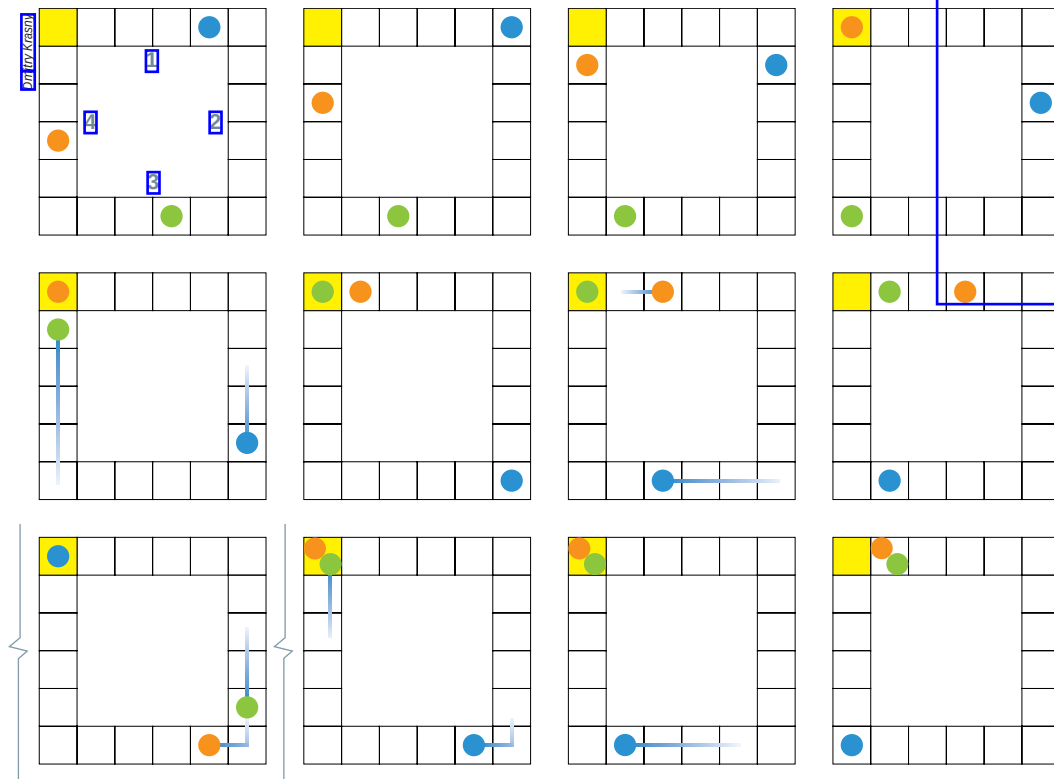
ils font battre le cœur ou gonfler les poumons.

Pourquoi des systèmes oscillent-ils ? Parce que c'est le comportement le plus simple après l'immobilité complète. Pensez au tigre captif qui parcourt cycliquement sa cage ou, en physique, aux vibrations d'une corde de violon. La corde ne peut rester immobile, quand elle est perturbée par l'archet ; elle ne peut faire n'importe quel mouvement, parce que ses extrémités sont fixes. De ce fait, elle vibre périodiquement.

Dans le cas des lucioles, les oscillations sont créées par un mécanisme d'accumulation et de décharge : ce mécanisme s'observe chaque fois qu'une quantité d'un composé augmente jusqu'à un seuil. Une fois le seuil atteint, le système « décharge » (pour les lucioles, c'est le flash), et la quantité de composé stocké s'annule, avant de recommencer à croître.

Comment expliquer le synchronisme des lucioles ? Les observations des entomologistes, dans la nature ou en laboratoire, ont montré que certaines lucioles qui perçoivent un flash d'un congénère sont excitées, et leur phase est alors avancée vers le seuil de décharge.

Leurs oscillateurs sont « couplés » : chacun d'eux modifie l'état des autres. Le mathématicien hollandais Christiaan Huygens étudia de tels oscillateurs alors qu'il mettait au point des pendules dont la période ne dépend pas de l'amplitude de l'oscillation : il vit que deux pendules accrochés à une même étagère se calaient progressivement. Ce phénomène de synchronisation est courant, mais l'élucidation du mécanisme de synchronisation est parfois difficile (attention : la synchronisation des oscillateurs n'a pas toujours lieu ; ainsi chaque membre



Le jeu de flash solitaire reproduit le comportement des lucioles. Cette série de positions se lit de gauche à droite et de haut en bas. Trois lucioles (points de couleur) se déplacent dans le sens des aiguilles d'une montre. Quand une luciole atteint la case flash (en jaune), elle émet un flash qui fait avancer les autres lucioles (lignes bleues) d'un nombre de cases égal au numéro de la rangée sur laquelle les lucioles se trouvent. Les étapes omises sont signalées par une ligne grise.

d'un animal est associé à un oscillateur, mais tous ces oscillateurs ne sont pas en phase).

Le physiologiste Charles Peskin fut un des pionniers des couplages d'oscillateurs. En 1975, il étudia la synchronisation des fibres musculaires du cœur et il proposa un modèle détaillé des systèmes à accumulation et décharge. Il proposa notamment une équation qui décrivait l'accumulation en fonction de la phase ; cette même équation décrit le comportement lumineux des lucioles. Dans le modèle de Ch. Peskin, le couplage n'est assuré que par les décharges : un oscillateur qui atteint son seuil de décharge envoie à ses voisins un signal qui avance leur phase vers le seuil de décharge. Quand cette stimulation fait dépasser le seuil d'un des oscillateurs, ce dernier émet à son tour un signal, et ainsi de suite.

Or les composés luminescents de certaines lucioles sont précisément modifiés par un mécanisme de ce type, la stimulation étant la lumière reçue d'autres lucioles. Quand une luciole perçoit le flash d'un congénère, elle est «excitée», et sa phase se rapproche de celle de la décharge. Ch. Peskin a montré que, pour deux oscillateurs à accumulation et décharge, avec des impulsions couplées, qui obéissent à son équation, la synchronisation survient généralement (si le déphasage initial est égal à des valeurs particulières, les flashes ne se synchronisent pas, et les émissions de lumière alternent plutôt ; cependant cet état est instable, et la moindre perturbation conduit à la synchronisation).

Ch. Peskin a également supposé qu'il en serait de même pour tout réseau d'oscillateurs couplés à accumulation et décharge. Dans un article de 1990, Renato Mirollo et Steven Strogatz ont démontré l'hypothèse de Ch. Peskin, mais pour une équation plus générale que la sienne. Sous réserve de quelques hypothèses techniques, R. Mirollo et S. Strogatz montrèrent que, pour un système composé d'un nombre quelconque d'oscillateurs couplés identiques, à accumulation et décharge, l'état final est le synchronisme (sauf pour quelques rares conditions initiales qui conduisent à un comportement périodique, et ces états sont instables).

Leur démonstration est fondée sur un phénomène nommé absorption, qui a lieu lorsque deux oscillateurs déphasés se synchronisent et restent synchronisés. Le couplage étant totalement symétrique (tous les oscillateurs agissent les uns sur les autres de la même façon), un groupe d'oscillateurs qui s'est accordé reste synchrone. Mathématiquement on démontre qu'une suite de telles absorptions doit finalement mettre en phase tous les oscillateurs.

Vous pouvez étudier des groupes de lucioles à l'aide d'un modèle simple, le «Jeu du flash solitaire», qui se joue avec des jetons que l'on déplace sur les bords d'un damier ou sur la plaque d'un jeu de Monopoly ; vous pouvez aussi construire un carré de six cases de côté (voir la figure 1). On n'utilise que le pourtour, où l'on marque un coin que l'on nomme «seuil», ou «coin flash». Les quatre côtés sont alors numérotés 1, 2, 3, 4 à partir de cette case, dans le sens des aiguilles d'une montre. Quelques jetons placés aléatoirement représentent les lucioles. La position d'une luciole par rapport au coin flash, dans le sens des aiguilles d'une montre, indique sa phase. Les lucioles qui atteignent le seuil émettent un flash, puis reconstituent leurs réserves de composé luminescent selon quatre règles.

Règle 1 : on déplace chaque luciole d'une case dans le sens des aiguilles d'une montre. Bien qu'on doive déplacer les lucioles les unes après les autres, considérez que leur mouvement est simultané.

Règle 2 : quand une luciole tombe sur le coin flash, on déplace toutes les autres lucioles dans le sens des aiguilles d'une montre ; l'amplitude du déplacement est égale au numéro de la rangée sur laquelle se trouve initialement la luciole déplacée. Ainsi une luciole sur le côté 3 est déplacée de trois cases dans le sens des aiguilles d'une montre. Toutefois, quand ce déplacement conduit une luciole à dépasser le coin flash, la luciole s'arrête au coin flash (cette étape représente le couplage). Les autres lucioles perçoivent le flash qui les avance vers leur seuil.

Règle 3 : quand une luciole atteint le coin flash à la suite du pas 2, on répète ce pas ; on déplace une nouvelle fois tous les jetons.

Règle 4 : appliquer à nouveau les quatre règles.

Notons que l'arrivée de deux lucioles ou plus sur le coin flash correspond à une synchronisation ; on les déplace ensuite en bloc. Dans l'exemple de la figure 1, c'est ce que font deux des lucioles. Si vous poursuivez cet exemple, vous observerez que les trois lucioles finissent synchrones.

Je soupçonne que, pour certaines tailles de damier, on trouve des placements initiaux qui conduisent à des comportements périodiques asynchrones qui correspondent aux états instables de la théorie de Mirollo-Strogatz. Le Jeu du flash est un modèle à nombre fini d'états plus simple que celui qui a été analysé mathématiquement, et il pourrait ne pas se comporter exactement de la même façon. À vous de jouer : faites-moi part de vos découvertes.



Lutte territoriale

CATHERINE PERRIN • RENAUD BOISTEL

Dans le brouhaha de la forêt guyanaise, une oreille exercée distingue, près des cours d'eau, le coassement répété du petit crapaud diurne au ventre rose *Atelopus franciscus*, de deux centimètres de long. Perché sur une feuille, à quelques dizaines de centimètres du sol, le mâle qui répète ce signal espère attirer les femelles situées à proximité. Ce marquage sonore indique aussi aux autres mâles que le territoire environnant, sur cinq à dix mètres carrés, est occupé.

Cet interdit n'est pas toujours suffisant : un concurrent un peu plus téméraire que les autres pénètre parfois sur le territoire du mâle qui coasse sur une feuille. Le rythme du coassement s'accélère en réponse au coassement de l'intrus, mais ce dernier, peu impressionné, grimpe sur une plante voisine (1) afin de se placer vis-à-vis de son adversaire. Après un échange de cris, le nouvel arrivant saute sur la feuille du mâle résident, qui riposte immédiatement en poussant un cri et en sautant sur l'assaillant (2). Il s'accroche à lui et essaie de l'expulser de la feuille. Pendant près d'une demi-heure, ils s'affrontent au corps à corps (3 et 4). Enfin, les deux crapauds tombent au sol (5). Celui qui est en position supérieure (ici, le défenseur) pousse un dernier cri, et le vaincu s'allonge complètement sur le sol, les pattes relevées, en signe de soumission. Le vainqueur se redresse, et remonte sur la feuille. Le perdant n'a plus qu'à s'éloigner à la recherche d'un autre territoire, vacant ou moins vigoureusement défendu (6).





Géographie

Couleurs de la Terre, des mappemondes médiévales aux images satellitales

Sous la direction de Monique Pelletier. Éditions du Seuil/Bibliothèque nationale de France, 1998.

Ce grand et bel ouvrage a paru à l'occasion de l'exposition de prestige organisée par la Bibliothèque nationale de France sur son site de la rue de Richelieu, à la fin de l'année 1998. Il aborde l'histoire de la cartographie sous un jour inédit, en prenant pour thème l'emploi de la couleur, et combat l'idée répandue que les cartes anciennes sont belles et fausses, alors que les cartes modernes seraient exactes, mais peu agréables à regarder.

Une douzaine de collaborateurs ont composé cette œuvre collective en s'attachant, chacun pour son époque ou sa spécialité, à mettre l'accent sur l'affirmation et sur la diversification des couleurs en tant que langage visuel. Si la France se trouve naturellement au cœur de ces études, les innovations d'autres pays d'Europe y sont aussi exposées, notamment dans les Pays-Bas du Nord et du Sud, avec également une ouverture sur le Japon ancien.

Les cartes léguées par le Moyen Âge sont avant tout des mappemondes

schématiques, illustrant des manuscrits enluminés, où les couleurs deviennent de plus en plus significatives. Deux exemples seulement : certains auteurs antiques pensaient qu'à chacun des quatre éléments devait être attribuée une couleur qu'il avait engendrée. Ainsi la Terre était-elle colorée en bleu pervenche, car le lin – dont on extrayait cette couleur – en était le fruit, mais les mers étaient figurées en pourpre, pigment produit par un mollusque qui vivait dans les eaux océaniques. Par ailleurs, dans le système ptoléméen des planètes, la Terre se voyait souvent attribuer une couleur sombre, attirée en raison de son immobilité au sein du mouvement perpétuel des autres planètes qui, elles, portaient des couleurs vives.

Avec les cartes-portulans, à la fin du Moyen Âge, naissent les premières cartes outils, à l'usage des navigateurs. Elles apparaissent en Méditerranée, chez les Catalans et les Génois, et leurs couleurs chatoyantes évoquent le Sud. Les Portugais, à leur tour, donnent aux cartes destinées à de hauts personnages l'aspect de luxueux tableaux. Il s'agit d'éblouir les commanditaires des expéditions au Brésil et en Inde. Les cartes, mises au service des conquérants et des marchands, doivent évoquer la promesse de fructueux profits.

Les rares cartes de l'école normande du XVI^e siècle s'inscrivent dans cette tradition. Trop belles pour naviguer, elles servaient de tableaux d'apparat. Leurs coloris se distinguent par la dominante des teintes froides, des bleus et des verts délicats, souvent rehaussés d'or. Elles font cependant peu de cas des artistes

qui les ont ornées : leurs noms sont restés inconnus.

L'imprimerie révolutionne la cartographie, mais avec un certain retard. On constate d'abord une continuité entre le manuscrit et l'imprimé, les mêmes hommes exerçant les fonctions d'enlumineur, d'imprimeur et de cartographe. L'impression en couleur étant presque impossible techniquement, les cartes gravées sont imprimées en noir et blanc, puis enluminées pour séduire un plus large public. L'âge d'or de la cartographie imprimée se situe aux XVI^e et XVII^e siècles, en Flandre et aux Pays-Bas, où les cartes, les atlas et les globes sont omniprésents dans les intérieurs, comme en témoignent les tableaux de Vermeer.

À la même époque, la cartographie française revêt un aspect plus austère, mais elle se développe aux XVII^e et XVIII^e siècles, dans une direction originale, grâce au perfectionnement des corps d'ingénieurs, militaires ou civils, rompus aux techniques du paysage. Une fois maîtrisées les difficultés de la géodésie, ils portent leurs soins au rendu du terrain, inventent les plans en relief et élèvent à son apogée la peinture au naturel de la géographie physique. L'École des ponts et chaussées, créée en 1747, instaure notamment, à partir de 1775, un «exercice de carte» qui porte sur un territoire imaginaire complexe, réunissant tous les éléments du savoir-faire du dessinateur et donnant lieu à de ravissantes et curieuses cartes utopiques. Les cartes des ingénieurs des Lumières sont des chefs-d'œuvre de méticulosité et de raffinement où, à la fin du XVIII^e siècle, l'amplification de certains éléments annonce déjà le romantisme.

Elles connaissent un aboutissement particulier dans le cadre de la diplomatie, lors des règlements des litiges territoriaux entre États, lorsqu'il faut démêler l'enchevêtrement des frontières. Dans la seconde moitié du XVIII^e siècle et, surtout, dans le cadre du traité de Vienne, en 1815, se manifeste en effet la volonté de stabiliser les frontières. Les cartes des limites entre la France et les Pays-Bas deviennent alors des instruments juridiques et politiques à part entière, qui se démarquent des cartes strictement topographiques pour ne retenir que les éléments utiles aux négociateurs.

Avec le XIX^e siècle vient la grande époque de la cartographie thématique, dans l'élaboration de laquelle la couleur joue un rôle essentiel. Celle-ci perd peu à peu son rôle décoratif pour devenir un élément symbolique fondamental, résultant d'une synthèse intellectuelle : la plage



Carte réalisée vers 1460, selon le système de Claude Ptolémée.



Ce Globe vert, réalisé vers 1506, serait le plus ancien document représentant l'Amérique.

de couleur résume une somme d'observations ponctuelles. L'invention du procédé de la chromolithographie, en 1845, permet de diminuer les coûts et d'ouvrir le champ de son utilisation.

Les cartes géologiques, inventées entre 1790 et 1830, adoptent assez tôt des conventions de couleurs durables, pour lesquelles le choix se fonde sur la ressemblance avec la nature. La comparaison des trois éditions successives de la *Carte géologique de France*, de 1889, 1933 et 1996, démontre la continuité du choix des couleurs.

Dans le domaine de la végétation et des climats, le naturaliste allemand Alexandre de Humboldt (1769-1859) est à l'origine d'innovations importantes ; mais, pendant longtemps, l'emploi de la couleur dans les cartes de végétation repose davantage sur les conseils de l'imprimeur que sur les principes des auteurs. La carte de la végétation de la France au 1/200 000, entreprise en 1945, marque un pas important vers l'utilisation raisonnée des couleurs.

Dans les cartes des phénomènes politiques, à la fin du XIX^e siècle, la couleur vient remplacer les drapeaux et les armoiries comme symboles d'appartenance politique. Le rouge est fréquemment employé, dans un contexte d'exacerbation des nationalismes et d'affrontements coloniaux, tandis que l'emploi des cartes se généralise dans les écoles et dans la presse.

L'époque contemporaine voit la fin de la cartographie descriptive, aux couleurs tantôt réalistes, tantôt symboliques. Les cartographes ont aujourd'hui à leur disposition des appareils photographiques perfectionnés, mais aussi des capteurs généralement embarqués sur des satellites artificiels qui enregistrent des tranches

de rayonnement électromagnétique situées au-delà du visible. Pour rendre perceptibles les mesures instrumentales faites dans l'invisible, de même que pour élaborer les cartes théoriques appelées « modèles », il leur appartient de choisir des couleurs et des nuances artificielles proposées par milliers par des logiciels infographiques et identifiables, chacune, par un numéro qui la distingue. « L'abondance de l'offre peut être source de cacophonie comme elle peut servir à révéler des espaces insoupçonnés », écrivent les auteurs de ce chapitre.

La cartographie de notre fin de siècle a enfin inventé, grâce à l'informatique, la carte animée, qui permet de passer des observations localisées à des prévisions géospatiales simulées, comme cela est proposé chaque jour aux téléspectateurs lors de la diffusion des bulletins météorologiques.

Mireille PASTOUREAU

Géologie

La subduction océanique

S. Lallemand. Édition Gordon and Breach Science, 1999.

La subduction, un des phénomènes le plus caractéristiques de la tectonique des plaques, correspond à l'enfoncement d'une plaque dans le manteau sous-jacent ; le phénomène est toujours accompagné d'une forte sismicité. Les zones de subduction actuelles se suivent sur quelque 50 000 kilomètres. Elles correspondent pour l'essentiel à l'enfoncement de plaques océaniques. Il existe aussi des subductions continentales, à l'origine de chaînes de montagnes, mais elles sont encore mal connues.

Etant moi-même un « subducteur continental », j'ai évidemment été très intéressé par la mise au point proposée par Serge Lallemand, car la plupart des subductions continentales ont été précédées par des subductions océaniques. Le travail de présentation était difficile, car, comme l'a signalé Xavier Le Pichon dans sa préface, « aucun auteur ne peut dominer seul un sujet aussi vaste ».

L'auteur signale d'entrée que son livre est essentiellement destiné aux étudiants de troisième cycle des universités et aux chercheurs de la spécialité. La difficile figure de la première page donne le ton. Puis, tout au long de l'ouvrage, l'accent est mis sur les aspects

mécaniques de la subduction, l'auteur utilisant beaucoup la modélisation.

Grâce à l'information abondante qui est présentée, le livre donne rapidement une idée claire de l'état actuel de la discipline. La présentation est éclairée par 130 figures, consacrées à des exemples variés, et complétée par une longue bibliographie, localement surabondante mais où j'ai déposé une étrange lacune, probablement due aux délais de publications : n'est pas mentionnée la célèbre publication de S. Grand, R. van der Hilst et S. Widiyantoro, parue en avril 1997, qui montrait pour la première fois que la subduction Ouest-américaine s'enfonçait dans le manteau jusqu'à 2 700 kilomètres de profondeur ; ce travail révolutionna nos idées sur la subduction.

Dès les premières pages, le lecteur constate que les méthodes d'investigation utilisées par les géologues océanologiques sont bien différentes de celles des géologues continentaux : comme les structures sous-marines se trouvent souvent à plusieurs kilomètres de profondeur, le spécialiste de subduction océanique doit raisonner sans la moindre roche (sauf dans le cas rarissime de sondage profond). Il se focalise alors inévitablement sur la topographie sous-marine (dont on tire de magnifiques cartes topographiques), sur quelques profils sismiques à travers les empilements sédimentaires, et sur la localisation et la signification des séismes. Comme la part d'incertitude est grande avec cette géologie sans roche, il utilise largement la modélisation.

Un intéressant chapitre est consacré au fonctionnement des zones de subduction ; se fondant sur une abondante documentation glanée dans toutes les parties du Globe, S. Lallemand s'efforce d'être pluridisciplinaire. Il tire de son exploration une série de coupes générales théoriques, assez parlantes, des zones de subduction. Quel dommage qu'elles soient souvent sans échelle, ou avec des échelles non respectées ! Chemin faisant, il utilise constamment la sismologie, mais parfois trop rapidement (le moment sismique, qui résume le cisaillement le long de la faille, n'est pas proportionnel au cube de la surface ; la magnitude des séismes ne varie pas de 0 à 10...).

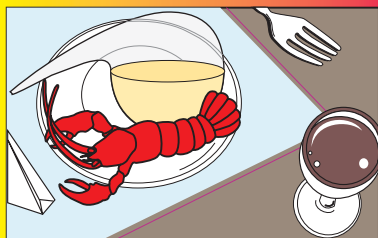
Puis il considère les prismes d'accrétion sédimentaires associés aux subductions, dont la structure est toujours compliquée. D'importants développements sont tirés de leur comparaison avec la très belle expérimentation analogique mise au point depuis longtemps par mon collègue J. Malavielle, à l'aide de couches de sables. L'auteur ne fait-il pas trop confiance à ces belles

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 26 mai 1999.

FRANCE

info

expériences? Quand il écrit «il est démontré expérimentalement et vérifié sur de nombreuses marges», ne prend-il pas un raccourci dangereux?

Il n'en reste pas moins que les expériences analogiques comparables de S. Dominguez, à l'Université de Montpellier, sur le devenir des grands volcans sous-marins qui sont entraînés dans la subduction, sont impressionnantes. Dans ce cas, des aller-retour expérimentation-observation ont montré de façon convaincante que les effets de ces aspérités pouvaient être suivis jusqu'à des dizaines de kilomètres en arrière du front de chevauchement et jusqu'à des profondeurs de 10 à 20 kilomètres.

Le livre fait ensuite une large place à «l'érosion tectonique». Je trouve malheureux ce terme, utilisé par une partie de la communauté internationale, non pas pour évoquer l'érosion que tous les géologues continentaux connaissent bien, mais pour décrire un phénomène susceptible de se produire en profondeur : des subductions «ablatives», capables d'arracher des copeaux à la plaque supérieure et de les entraîner à grande profondeur ; le bord de la plaque serait ainsi peu à peu grignoté, de sorte que sa surface diminuerait notablement.

Après une longue discussion, l'auteur propose que l'érosion tectonique (= ablation) «est certainement un processus aussi répandu que l'accrétion sédimentaire». Cette conclusion me semble fort exagérée, car elle ne s'appuie guère que sur la subsidence des marges, sans envisager d'autres phénomènes.

L'ouvrage se termine de façon méritoire par des considérations générales, prenant en compte des régions émergées de l'Ouest Pacifique, et en allant jusqu'à la collision continentale. Cependant les problèmes restent traités avec la logique sous-marine ; on ne voit pas apparaître les raisonnements géologiques, à base de cartographie, de données, de paléogéographie, de structures... utilisés par les géologues aériens, à partir de l'observation d'un grand éventail de roches affleurant sur le terrain.

C'est ainsi que l'obduction (enfouissement d'un continent sous un océan), dont l'exemple le plus célèbre se trouve en Oman, est quasi oublié. On ne trouve aucune discussion sur l'hypothèse classique du métamorphisme de haute pression, qui admet que ce métamorphisme est lié à des subductions océaniques.

Malgré ses inévitables imperfections, cet ouvrage sera certainement utile, car il fera découvrir le monde particulier et attachant de la géologie sous-marine, avec ses diverses tendances, ses modes actuelles, et cela juste avant le bouleversement de la discipline dû à

la tomographie sismique. Il montrera que, grâce aux nombreux (et coûteux) projets internationaux, les spécialistes de la subduction océanique ne se cantonnent plus à une région. Dans un cadre international, ils sont informés sur toutes les zones de subduction actuelles de la planète en envisageant toujours les choses de façon globale... d'une manière qui ne se fait pas encore pour les subductions continentales.

Des progrès surviendront quand on poursuivra ces tendances, sans se limiter aux phénomènes actuels ou très récents. Il est temps de s'intéresser à l'histoire géologique des subductions qui ont eu lieu depuis au moins 150 millions d'années.

Maurice MATTAUER

Biologie

Biochimie : livre compagnon

R.I. Gumport, A. Jonas, R. Mintel,
C. Rhodes et R.E. Koeppe
(traduction de P. Kamoun).
Flammarion, Médecine-Sciences,
1998.

Imaginons un moment un étudiant idéal qui se destine à apprendre la biochimie dans les grandes largeurs. Outre son assiduité sans faille au cours magistral, il s'exerce et cerne mieux sa discipline lors des travaux dirigés. Dans la foulée, il assiste à quelques travaux pratiques, où il effleure de ses mains la genèse expérimentale du savoir et essaie, comme il peut, de concilier sciences et techniques.

Il se heurte alors au volume considérable des connaissances à intégrer, à l'art subtil de l'approximation, à la nuance capitale entre une hypothèse et un acquis. Il aborde le difficile mariage de la chimie et de la biologie, du macroscopique et du microscopique, du qualitatif et du quantitatif, de l'empirisme et de l'analyse. Finalement, il doit, vaille que vaille, se situer face au cours du professeur et à la trilogie «cours-TD-TP» : sa vision de la biochimie étant très fragmentaire, il conclut rapidement que seul le recours au livre lui permettra d'élargir son savoir et de mûrir sa compréhension. Quel livre choisir? Ils sont si nombreux et il en paraît presque chaque jour!

Lubert Stryer rallie depuis longtemps un grand nombre de suffrages, au grand bonheur de la maison Flammarion pour

l'édition française : étudiants et enseignants de tous pays sont unanimes pour vanter ce cours complet et récemment actualisé, plus particulièrement sur le plan de la biologie moléculaire. Depuis 1995, aux États-Unis, et, depuis cette rentrée universitaire, en France, le livre de ce maître incontesté de la biochimie est accompagné d'un autre ouvrage réalisé par un collectif d'universitaires américains. Cet autre ouvrage de 800 pages, le *Livre compagne*, veut aider l'étudiant à s'évaluer par rapport au cours. Il pourra alors saisir inéluctablement et machinalement une somme de connaissances que ses prédécesseurs avaient péniblement ingurgitée, des effets de puits à électrons du phosphate de pyridoxal aux propriétés topologiques de l'ADN, des pompes à protons au chaperonnage des protéines, du bilan thermodynamique d'un chaînon métabolique au flottement des appariements codon-anticodon lors de la traduction. Il différenciera les mondes eucaryotes des mondes bactériens et comprendra aisément ce qu'un inhibiteur peut apporter à la compréhension d'un mécanisme réactionnel complexe, etc.

Il bénéficiera alors d'un texte remarquablement traduit, sans faiblesse. À ce propos, il pourra tout de même s'étonner que l'ADN et l'ARN aient gardé la terminologie anglaise ; il pourra aussi s'amuser du choix de certains termes tels que le mot tassage, qui évoque la compaction de la chromatine, ainsi que l'empilement des paires de bases dans la double hélice. En fin de compte, il réussira là où ses aînés ont généralement échoué : acquérir à la fois un solide fonds de culture en biochimie et en biologie moléculaire, et une vivacité d'esprit qui lui permettra de s'adapter à n'importe quel sujet d'examen de n'importe quel professeur.

Son travail sera récompensé par la réussite aux examens (l'indulgence des examinateurs ne sera plus nécessaire) et par une exigence supplémentaire vis-à-vis des enseignants, qui devront être particulièrement vigilants au cours de l'année pour éviter les bourdes. Pour ceux-ci, une lecture attentive des cours et des tests de notre duo *Stryer et Compagne* évitera toute bévue et alimentera le débat au moment de la confrontation avec les étudiants.

Mais... évidemment, ces perspectives sont irréalistes. L'étudiant ne serait l'idéal précédemment décrit que s'il préparait ses cours, ce qui n'est pas le plus courant, et s'il cassait sa tirelire, ce qui n'est pas le plus facile... À moins que les bibliothèques n'achètent en masse ? Ne rêvons pas. L'étudiant devrait en outre faire preuve d'une ténacité et d'une

disponibilité implacables : à raison d'un chapitre par semaine (soit environ 50 pages pour l'ensemble des deux livres), il devrait consacrer à la biochimie une bonne dizaine d'heures en solitaire, auxquelles s'ajouterait une charge de travail équivalente s'il voulait rester au niveau dans les autres matières.

Là est la difficulté : il y a les autres matières. En pratique, l'étudiant sera alors contraint de limiter ses ambitions, soit à n'être qu'un perroquet, soit à réduire son champ de curiosité. En revanche, l'étudiant ne devra pas redouter d'incompatibilité entre le livre (américain) et le programme universitaire français : les enseignants du monde entier ont tous choisi les mêmes modèles.

Ainsi l'arrivée dans nos librairies du *Compagne* de l'étudiant, seul livre d'exercices aussi complet en biochimie, accompagnant de surcroît un traité majeur, est une bénédiction. Aux enseignants de profiter de cette aubaine pour affûter l'esprit de l'étudiant et sa réflexion spontanée, véritable clé pour que celui-ci se transforme petit à petit en un biochimiste éclairé. Et s'il est prouvé que la lecture de ce type d'ouvrage est une garantie de réussite, les maisons d'édition et les biochimistes francophones pourront collaborer davantage pour aller plus loin que la publication de cours, et les prix baisseront. Simultanément l'école française de biochimie disposera de jeunes talents suffisamment armés pour faire face aux enjeux de la recherche et de la bio-industrie de demain. Il ne restera plus qu'à reconnaître la qualité de la formation par la recherche et à régler le problème des offres d'emplois. Mais je m'égare...

Gilles MIRAMBEAU

Sciences de la Terre

Histoires d'une mer au Sahara. Utopies et politiques.

René Letolle et Hocine Bendjoudi.
Éditions L'Harmattan, 1997.

Les chotts, ces immenses dépressions au fond couvert d'une croûte de sel et, parfois, d'un peu d'eau, sont aujourd'hui une des principales attractions touristiques du Sud tunisien (pour des raisons évidentes, les

chotts algériens, qui prolongent vers l'Ouest ceux de Tunisie, n'attirent guère les touristes, ces temps-ci). Depuis le siècle dernier, toutefois, on a voulu à plusieurs reprises leur trouver une tout autre utilité : le creusement d'un canal, à partir du golfe de Gabès, devait les inonder et les transformer en mer intérieure, source supposée de bienfaits climatiques et économiques. L'excellent livre de René Letolle et Hocine Bendjoudi raconte l'histoire aujourd'hui méconnue de projets qui, en leur temps, firent couler beaucoup d'encre ; il démonte, par la même occasion, les ressorts d'une utopie qui fut à la fois scientifique, technique, économique, politique et militaire.

Cette utopie de la mer saharienne prend ses sources dans une Antiquité presque mythologique, avec les récits d'Hérodote au sujet d'un mystérieux lac Triton, dont certains voyageurs européens, dès le XVIII^e siècle, voulurent trouver l'emplacement dans les chotts. Le motif de l'antique lac Triton, associé souvent à celui de l'Atlantide, revient périodiquement dans les nombreuses publications consacrées aux chotts depuis le début du XIX^e siècle.

C'est alors que commença l'exploration géographique et scientifique de ces régions arides, sous l'impulsion de la conquête de l'Algérie par la France. Rien de particulièrement aventureux, pourtant, dans les voyages de cette époque, sinon l'aventure intellectuelle suscitée par le mystère de ces dépressions situées en partie au-dessous du niveau de la mer. On sait aujourd'hui, comme l'expliquent les auteurs, que leur origine est liée à la formation de l'Atlas, elle-même conséquence de la dérive du continent africain vers le Nord. Le résultat actuel, dans ces bassins sursalés, est un écosystème particulier, auquel les populations locales se sont adaptées.

La grande question que se posèrent bientôt les explorateurs fut la suivante : dans le passé, les chotts n'ont-ils pas été occupés par la mer ? Leur topographie, leurs eaux salées l'indiquaient, ainsi que la découverte, sur leur pourtour, de couches contenant de nombreuses coquilles, fossiles ou non, réputées appartenir à des espèces marines. La controverse qui a longtemps fait rage s'est encore rallumée, naguère, même si les tenants de cette antique mer des chotts sont aujourd'hui très minoritaires. Cependant l'utopie technique et économique s'est nourrie de cette hypothèse hasardeuse ; au XIX^e siècle, les deux se trouvèrent mêlées.

Deux hommes furent les principaux acteurs de la tragi-comédie de la mer saharienne. L'un était un assez obscur officier de l'armée française, et l'autre

un entrepreneur et financier de haut vol. Le premier se nommait François Élie Roudaire, et le second n'était autre que Ferdinand de Lesseps. Roudaire avait été chargé, en 1872, d'un relevé topographique dans la région des chotts ; il en revint en voulant convaincre la France de l'intérêt d'une mer saharienne. Il fut appuyé par de Lesseps, auquel le percement de l'isthme de Suez avait valu un fauteuil à l'Académie des sciences, où les débats sur la mer saharienne furent vifs.

Toute cette affaire est narrée ici en détail. On voit comment Roudaire s'obstina, malgré les difficultés (les missions ultérieures montrèrent notamment que les chotts Djerid et Fejej, les plus orientaux, se trouvent au-dessus du niveau de la mer). Toutefois le projet fut soutenu par l'armée et par la marine françaises, qui voyaient dans la mer intérieure une possibilité d'un beau port de mer au Sahara et d'une barrière aquatique contre les pillards.

En 1882, une commission parlementaire finit par conclure qu'il n'y avait pas lieu d'encourager cette entreprise. Roudaire mourut en 1885 de fièvres contractées sur le terrain, et Lesseps eut bientôt d'autres chats à fouetter avec le scandale du canal de Panama. Le projet tomba... à l'eau pour resurgir dans *L'invasion de la mer*, de Jules Verne, mais aussi avec une nouvelle étude à la fin de la guerre d'Algérie : l'idée de la mer intérieure fut envisagée comme débouché pour le pétrole saharien et, aussi, pour inquiéter le gouvernement provisoire de la République algérienne (GPRA), semble-t-il. Une étude par une firme suédoise, en 1980, conclut à l'inutilité et au coût excessif d'un ultime projet algéro-tunisien.

Non contents de relater l'histoire de ces projets avortés, les deux auteurs ont examiné comment l'inondation des chotts situés au-dessous du niveau de la mer pourrait être réalisée et quelles seraient ses conséquences : ils concluent que le projet est réalisable, bien que coûteux, mais que ses effets sur l'environnement seraient désastreux, sans bénéfice aucun pour l'économie locale.

Les auteurs sont bien documentés, et leur livre comporte de nombreuses annexes et une belle bibliographie ; sa rigueur scientifique et historique ne lui nuit bien sûr en rien. Au-delà du récit passionnant d'une curieuse affaire à la fois scientifique, économique et politique, c'est une analyse pénétrante de la façon dont naît une utopie et de la manière dont elle peut résister à toutes les désillusions.

Il est donc possible qu'en dépit des études le vieux mythe du lac Triton renaisse un jour.

ERIC BUFFETAUT

Biologie

Plantes transgéniques : les graines de la discorde

Sous la direction de P. Philippon et C. Tastemain. Éditions Elsevier, 1998.

Un avertissement précise clairement que ce livre de 157 pages rassemble des textes d'origines et d'intentions diverses, dont le sujet, les plantes transgéniques, défraie la chronique depuis la fin de l'année 1996, avec l'arrivée, dans les ports européens, de fèves de soja et de grains de maïs issus de plantes transgéniques. Ce livre conçu par des journalistes regroupe des articles parus dans la revue *Biofutur* et des résultats d'enquêtes récentes. Il ne se limite pas à une description des avancées scientifiques apportées par cet outil que représente la transgénèse végétale, mais élargit le débat aux choix socio-économiques suscités par le développement des plantes transgéniques.

Tout commence, naturellement, par une évaluation des potentialités scientifiques de la transgénèse végétale, suivie d'une première analyse et de leurs conséquences. Marc van Montagu, l'un des pionniers dans ce domaine, nous rappelle comment une bactérie naturelle du sol, *Agrobacterium tumefaciens*, à l'origine de l'induction de tumeur végétale, a été modifiée en outil efficace avec lequel les biologistes savent aujourd'hui transformer génétiquement des plantes d'intérêt agronomique.

Puis Philippe Bournat présente les deux grands types de méthodes pour introduire des transgènes dans le génome d'une cellule végétale : le transfert indirect, qui utilise des vecteurs biologiques comme les bactéries telluriques du genre *Agrobacterium*, et le transfert direct, qui met en œuvre des méthodes physiques et chimiques. Toutes ces méthodes sont fondées sur une propriété remarquable de la cellule végétale : la totipotence (une cellule végétale peut, dans des conditions de culture particulières, se différencier dans tous les types cellulaires qui composent une plante entière).

Plusieurs applications sont ensuite expliquées. Harry Smith décrit comment des tabacs transgéniques surproduisent le phytochrome A et augmentent la biomasse de leurs feuilles par rapport à celle de leurs tiges, lorsque ces plantes sont cultivées en densité serrée. L'ob-

jectif visé est d'augmenter la croissance des organes de stockage (semences, racines, tubercules) chez la plupart des plantes européennes de grande culture. À terme, certaines plantes transformées pourraient survivre dans des conditions de stress abiotiques comme la sécheresse, le froid, l'oxydation et la présence de métaux lourds. Julio Salinas et Friedrich Shoeffl expliquent comment l'activation d'un facteur de transcription et l'induction de gènes codant des protéines chaperonnes devraient protéger les cellules végétales de ces stress abiotiques.

La transgénèse permet également de protéger les plantes contre des pathogènes qui les agressent. Ainsi Michel Ravelonandro décrit comment des pruniers transformés qui deviennent résistants à un virus véhiculé par des pucerons présentent des symptômes qui rendent les fruits inconsommables. Dans cet exemple, les plantes ont acquis leur résistance à la maladie par insertion et expression d'un gène codant une protéine de la capsid virale.

Dans son *Plaidoyer pour la transgénèse*, Jeff Schell montre les promesses du génie génétique : compréhension des mécanismes qui gouvernent la croissance et le rendement des plantes aux stress environnementaux, amélioration des qualités nutritives ou gustatives des végétaux. On sait déjà produire des protéines riches en acides aminés indispensables en cultivant des tubercules de pomme de terre modifiés, et la tomate *Flavr Savr* mûrit plus lentement, ce qui allonge et sa longévité en rayon (ce résultat est dû au blocage d'une des étapes de la biosynthèse de la polygalacturonase, une enzyme qui dégrade les parois cellulaires au cours du mûrissement). Plus récemment, le mûrissement du melon a été contrôlé par blocage de la synthèse d'éthylène, une hormone végétale qui joue un rôle essentiel dans ce phénomène : un gène antisens de l'enzyme ACC-oxydase a été introduit dans ces melons transgéniques. Ces fruits transformés peuvent rester plus longtemps sur la plante, où ils se changent en sucres solubles, en vitamines et en molécules aromatiques volatiles.

L'obtention d'espèces transgéniques produisant des molécules sucrées «à basses calories» comme les fructosannes intéresse aujourd'hui les agronomes. De même, on doit au génie génétique des aubergines dépourvues de graines amères et qui, de plus, restent d'excellente qualité en conditions hivernales. Cette fois, le résultat résulte de l'introduction dans les plantes du gène *iaaM* d'une souche bactérienne de *Pseudomonas syringae* pv *savastanoi*, qui

POURLA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte, assisté de Anne Gusdorf. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Camille Lamorte. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Ludovic Bot, Bettina Debü, Paul Decaix, Marc Dujardin, Françoise Ferré, Ivan Ineich, Philippe Janvier, Sönke Johnsen, Marie-Thérèse Landousy, Jean-Marc Levailant, Valérie Martin-Rolland, Claude Olivier, Guy Paulus, Christophe Pichon, Pierre Thomas.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Marguerite Holloway, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Rick Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. President and Chief Executive Officer: Joachim Rosler. Chairman: John Hanley. Co-Chairman: Rolf Grisebach. Vice-président: Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28.
Téléc : LIBELIN 202978F.
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : Kate Dobson, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon : 01 55 42 84 04.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : Servioli - 5, rue des Chaudronniers - 15 Postale 3663 - CH 01211 Genève

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront dans ce numéro des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

code la synthèse d'une autre phytohormone, l'acide indole-acétique. Certains de ces aspects sont développés dans les articles : *Ingrédients basses calories* de Leen de Leenheer et Sjef Smeekens, et *Des lignines sur mesure*, par Alain-Michel Boudet.

Autre intérêt, et non des moindres : les plantes transgéniques peuvent fournir des protéines à l'industrie pharmaceutique. Des vaccins comestibles ont été préparés à partir d'aliments qui contiennent des principes vaccinaux actifs, tels les antigènes de surface de l'hépatite B et l'entérotoxine d'*Escherichia coli*. Récemment les biologistes ont réussi à faire exprimer, dans le tabac, des gènes codant les sous-unités des immunoglobulines A sécrétées. Ces anticorps, extraits à partir de feuilles de plants de tabac transformés, étaient dirigés contre des déterminants antigéniques associés à la souche bactérienne *Streptococcus mutans* ; ils neutralisent ce micro-organisme pathogène qui cause les caries dentaires. La méthode génétique est un moyen économique d'immunothérapie passive : à quand des bâtons de réglisse ou des feuilles de menthe à mâcher pour lutter contre les caries dentaires ?

Patrick Philippon expose l'actuelle polémique concernant les risques environnementaux ou sanitaires, voire éthiques. Les organismes génétiquement modifiés (OGM) secouent les syndicats d'exploitants agricoles qui revendiquent une maîtrise correcte des risques éventuels sur la santé animale et humaine comme sur l'environnement ; un étiquetage clair et vérifiable ; une surveillance de la concurrence dans l'agriculture et dans ses filières. Les premières plantes transformées résistant aux herbicides ou résistant aux ravageurs ont suscité des inquiétudes. Le problème du transfert de gènes entre cultures transgéniques et plantes sauvages apparentées a été posé. Le colza, qui s'hybride spontanément avec les plantes sauvages comme la ravenelle ou la moutarde des champs, fait partie des plantes surveillées. La résistance à un insecte (le maïs *Bt* porte un gène de résistance aux insectes provenant de la bactérie *Bacillus thuringiensis*) ou aux herbicides (*Roundup/Glyphosate* et *Liberty/Basta/Glufosinate*) pourrait transformer certaines mauvaises herbes en super mauvaises herbes au potentiel invasif décuplé. Les effets des plantes transgéniques sur les écosystèmes sont également évoqués.

Les premières constructions génétiques utilisées, tel le maïs *Bt*, comportent un ou des gènes de résistance aux antibiotiques. Ici le problème soulevé

serait la possibilité de transmettre ce gène à une bactérie du rumen d'un bovin ou de l'intestin d'un consommateur de maïs et de provoquer l'apparition d'une souche résistante à cet antibiotique. Dans le domaine de la santé publique, le caractère toxique de certains éléments issus de plantes transgéniques est posé. Certaines protéines peuvent déclencher des réactions allergéniques chez des sujets sensibles : l'effet a été observé avec un soja transgénique ayant intégré un gène provenant de la noix du Brésil et codant une albumine riche en méthionine, un acide aminé indispensable.

Comment la transgénèse végétale pourrait-elle profiter aux pays en développement et comment pourrait-elle nourrir la planète ? Le chapitre 5 apporte des réponses diverses. Peut-on envisager de fournir des variétés résistantes à la sécheresse, aux maladies, tolérant des sols salés ? Quelle serait la dépendance de ces pays en développement vis-à-vis des fournisseurs occidentaux de matériel, de constructions génétiques, de semences chères et de variétés non replantables ? Enfin le chapitre 6 aborde la réglementation sur les conditions de dissémination des OGM dans l'environnement et de leur mise sur le marché. Toutes les réglementations suffiront-elles à convaincre les consommateurs ? À ce jour, en Europe, l'insistance des consommateurs pour obtenir un étiquetage obligatoire des aliments contenant des OGM témoigne d'une confiance très limitée sur ces nourritures du futur.

Ce livre intéressant présente, avec un juste équilibre, les avantages et les inconvénients que suscite l'émergence des plantes transgéniques ; il invite réellement un lecteur non initié à une réflexion personnelle sur cette évolution scientifique et ses conséquences. Tous les acteurs susceptibles d'être impliqués peuvent trouver écho de leurs préoccupations : chercheurs scientifiques, responsables de sociétés agroalimentaires, sélectionneurs, agriculteurs, écologistes, sociétés de distribution, consommateurs et citoyens. Dans leur forme, les différents articles se lisent facilement, seule une redondance de certains éléments de discussion peut sembler lourde ; mais la pédagogie n'est-elle pas une succession de répétitions ?

Francis DELMOTTE

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>