

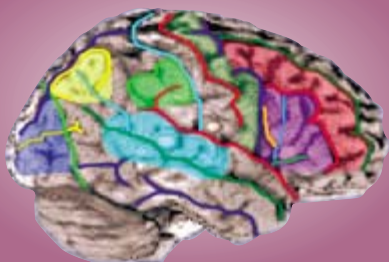
■ POUR LA

SCIENCE

Juillet 2002

Édition française de Scientific American

Les erreurs de raisonnement



La classification des courbes



Le voyage des globules rouges



FRANCE METRO : 5,95 €, DOM : 7,13 €, BEL : 7,07 €,
CH : 11,2 FS, CAN : 8,95 \$, LUX : 6,77 €, ESP : 8,71 €,
PORT. CONT. : 6,33 €, AND : 5,95 € MAY : 8,92 €, REU : 8,92 €

M 02687 - 297 - F: 5,95 €



Les ancêtres des baleines



Ils vivaient sur terre

TRIBUNE DES LECTEURS

BLOC-NOTES

de Didier Nordon



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Qualité de viande

par Hervé This



SCIENCE ET ÉCONOMIE

Oui, mais pas chez moi!

par Ivar Ekeland

POINT DE VUE

Les défis du Muséum d'histoire naturelle

par Bernard Chevassus-au-Louis

PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Gould, héraut de l'évolution

par Jean-Louis Hartenberger



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ L'internationale fourmière ■ Les géants du Chihuahua ■ Le champagne nain ■ Cavaliers

en terre arverne ■ L'origine des jets galactiques ■ La sieste pour la vue ■ Le déroulement de l'enroulement ■ La ligne mentale des nombres ■ L'invention de la pierre taillée ■ L'énergie de l'air ■ Oxygène en orbite ■ L'algue du ginkgo ■ La sixième désintégration ■ L'hormone du fer ■ La détection des mines antipersonnel

ÉNIGMATHS

Justice aveugle

par Dennis Shasha



LOGIQUE ET CALCUL

Les machines pensent-elles?

par Jean-Paul Delahaye



ART ET SCIENCE

Les mystérieux sons

par Avida Dollars

IDÉES DE PHYSIQUE

La nage des poissons

par Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



ANALYSES DE LIVRES

■ Primo Levi, *le double lien : Science et littérature*, sous la direction de W. Geerts et J. Samuel

■ *Les requins sont-ils des fossiles vivants?*, de Gilles Cuny
■ *Histoire secrète des chefs-d'œuvre*, de Didier Dubrana
■ *La science au péril de sa vie - Les aventuriers de la mesure du monde*, de Arkan Simaan ■ *De la science à la philosophie, hommage à Jean Largeault*, sous la direction de Miquel Espinoza

4

5

7

8

9

10

18

92

98

104

106

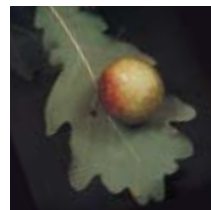
108

Les interactions durables des génomes

30

par Claude Combes

Les associations de certains parasites avec leur hôte forment des systèmes, où les interactions durables des génomes dotent les partenaires de propriétés nouvelles.

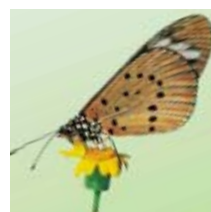


La bactérie Wolbachia, parasite féministe

34

par Fabrice Vavre

La bactérie *Wolbachia*, transmise par les femelles, favorise sa propagation en stérilisant les femelles non infectées, en féminisant les mâles, et en déclenchant le clonage des femelles.



Le grand inventaire cosmique

40

par G. Hasinger et R. Gilli

Bientôt les astronomes connaîtront avec certitude tous les objets susceptibles d'émettre de la lumière dans l'Univers. Le grand inventaire des objets cosmiques sera achevé.



La correction des erreurs de raisonnement

48

par O. Houdé, S. Moutier, L. Zago et N. Tzourio-Mazoyer

Pour la première fois, on a mis en évidence que les erreurs de raisonnement résultent de l'activation de «mauvaises» aires cérébrales que l'on peut apprendre à inhiber.



La taxonomie des courbes

56

par Marcel Berger

Des mathématiciens explorent la diversité des courbes pour les classer. Vladimir Arnold a enrichi leur tâche en identifiant une nouvelle spécificité des courbes : l'«étrangeté».



Les mammifères à la conquête des mers

par Kate Wong

L'étude de nouveaux fossiles et des analyses d'ADN ont éclairé l'origine des baleines : elles descendent des mammifères terrestres, probablement de l'ancêtre de l'hippopotame.



64

Les constantes varient-elles?

par Jean-Philippe Uzan

Deux constantes fondamentales de la physique semblent avoir varié au cours de l'histoire de l'Univers. Ces observations relancent le débat sur la nature des lois physiques.

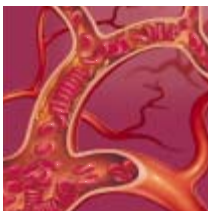


72

Le voyage des globules rouges

par Jacques Dufaux, Patrick Snabre, Gérard Guiffant

Pour faciliter l'écoulement du sang, les globules rouges se déforment et s'alignent dans les capillaires. Dans les vaisseaux plus gros, ils forment des « piles d'assiettes » réversibles.

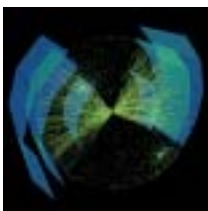


80

La traque du plasma de quarks et de gluons

par Yves Schutz et Hugues Delagrange

Les constituants des noyaux se désagrègent-ils à haute température? Les physiciens font de nouvelles expériences, en espérant confirmer ce phénomène de déconfinement.



86

Encarts d'abonnement pages 16 et 17, encarts commande de livres et abonnement pages 96 et 97. En couverture : © Alain Bénétou.



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

www.pourlascience.com

Raisonnements et émotions

« Toute notre dignité consiste en la pensée », affirmait Pascal. Cette faculté de réflexion nous valorise grandement.

Bon pour l'ego. Toutefois, penser correctement nous est difficile. Mauvais pour l'ego. « Travaillons donc à bien penser », poursuivait Pascal.

Oui, mais comment? Et d'abord, pourquoi réfléchissons-nous si mal? Le génial mathématicien Henri Poincaré s'étonnait que les démonstrations mathématiques soient si difficiles alors qu'elles ne consistent qu'en une suite de trivialités du type $A = B$, $B = C$, etc. Chacune de ces égalités est de compréhension aisée, mais la longueur de la suite rend la tâche ardue, voire décourageante. La nécessité de la motivation pointe l'oreille.

Les expériences conduites par les chercheurs (voir *La correction des erreurs de raisonnement*, pages 48 à 55) montrent que nous ne rectifions nos défaillances cérébrales, que nous n'apprenons efficacement, que si les enseignements ont une dimension émotionnelle. L'explication logique de l'erreur n'est pas suffisante, ce sont les émotions qui suscitent la motivation.

La conjonction est bizarre, car l'esprit de géométrie, de froid et lucide cartésianisme, est classiquement opposé à l'esprit de finesse, de connotation sensible. Pascal, auteur de cette distinction, avait compris que l'opposition est superficielle : pour convaincre et faire comprendre, il faut « toucher le cœur » affirmait-il. À la lueur de l'évolution, cette nécessité ne surprend plus : le cerveau humain s'est façonné pour que la peur ou la joie améliore notre comportement logique nécessaire à la survie. Aussi les enseignements qui touchent la sensibilité ont-ils plus de portée : ils nous encouragent à suivre la chaîne de déductions évoquée par Poincaré.

Ces conclusions sont validées par des mesures de l'activité cérébrale : quand nous raisonnons mal ou que nous raisonnons bien, des aires différentes du cerveau sont activées. Et dans les processus d'apprentissage efficaces, les aires de l'émotion sont scintillantes.

CQFD émotionnel.

Philippe BOULANGER

Tribune des lecteurs

Sa propre haleine

Dans *La mauvaise haleine* (voir *Pour la Science*, mai 2002), Mel Rosenberg se demande pourquoi l'on est sensible à l'haleine des autres et non à la sienne. Comme il le souligne, il ne s'agit ni d'une habitude ni de l'impossibilité d'aspirer par le nez son propre souffle buccal, car la rétro-olfaction est opérante. L'explication la plus vraisemblable s'applique à toutes les formes de stimulus sensoriels : le cerveau n'apporte à la conscience que les stimulus pertinents et représentant une modification de l'environnement. Ainsi, une heure après vous être parfumé le matin, alors que, ne sentant plus rien, vous vous demandez si vous l'avez réellement fait, votre voisin vous fait remarquer que vous avez mis trop de parfum ! Habitant dans une rue passante, vous n'êtes pas gêné par la circulation, mais une fois à la campagne dans un endroit calme, vous dormez mal à cause du changement d'environnement sonore. Il en va de même de notre propre haleine : nous ne la sentons pas, car la stimulation olfactive est permanente et ne représente donc pas un « danger » potentiel.

Michel LABROUE, La Ciotat

Réponse de Mel Rosenberg

Michel Labroue a raison de dire que nous nous habituons aux odeurs nous parvenant en permanence. Cependant, cet effet n'intervenait pas dans nos expériences. Les personnes reconnaissent leur propre mauvaise haleine si nous leur faisons sentir des ustensiles qu'ils avaient mis en bouche (une cuillère ou un cure-dent). Ces personnes étaient par ailleurs incapables de qualifier objectivement leur haleine. En fait, leur capacité à isoler leur haleine parmi d'autres dépendait de l'idée qu'il se faisait de leur haleine, agréable ou malodorante. Les gens à mauvaise haleine semblent être attentifs à celle des autres. Dans l'hôpital où je travaille, un couple s'est présenté, chacun se plaignant de l'haleine de l'autre !

Frigo sans électricité

À perspective scientifique *Du froid à volonté* (voir *Pour la Science*, mai 2002) sous-entendait que le système de réfrigération par adsorption présenté dans l'article était un précurseur de la réfrigération sans électricité. Edmond et Ferdinand Carré, inventeurs de la machine à frapper les carafes, ont dû se retourner dans leur tombe : la réfrigération sans électricité a bien été une nouveauté, mais sous Napoléon III. La machine à frapper les carafes consistait en

une pompe placée au-dessus de la boisson à rafraîchir. Plus près de nous, les réfrigérateurs à absorption pour le camping fonctionnent au gaz butane. Autre exemple : le réfrigérateur solaire dont le principe repose sur l'évaporation d'ammoniac. Ce réfrigérateur a été produit en quantité pour les pays africains où il assure la conservation d'aliments et la production de la glace nécessaire au transport des vaccins.

Nous pouvons toutefois proposer une direction de recherche : nous pouvons chauffer rapidement un corps grâce aux micro-ondes, mais nous n'avons aucun moyen de le refroidir brutalement. Un moyen d'y parvenir serait d'utiliser de l'azote liquide. À quand l'azote liquide en supermarché ?

Michel CLAUDON, Vandœuvre-lès-Nancy

Asthénosphère et plaques

Dans le domaine de la tectonique des plaques, l'avenir se révèle riche en perspectives comme le montre M. Mattauer dans *La tectonique sous les plaques* (voir *Pour la Science*, mai 2002). J'aimerais néanmoins apporter deux précisions à cet article.

Premièrement, M. Mattauer indique que l'asthénosphère s'étend depuis la base de la lithosphère jusqu'à la discontinuité de Gutenberg qui sépare le manteau du noyau externe (2 900 kilomètres de profondeur). Or, il me semble que l'asthénosphère, caractérisée par sa ductilité, ne se prolonge que jusqu'à 670 kilomètres de profondeur.

Deuxièmement, à propos de la subduction du Pacifique, l'auteur indique que la plaque Pacifique et le continent Sud-américain se rapprochent d'environ dix centimètres par an. Ne s'agit-il pas plutôt de la subduction qui s'opère entre la plaque Sud-américaine et la plaque de Nazca ? Cette dernière est « coincée » entre la plaque Pacifique à l'Ouest et la plaque Sud-américaine à l'Est. De ce fait, la plaque Sud-américaine se rapproche de la plaque de Nazca. La plaque Pacifique, quant à elle, se déplace globalement vers l'Ouest.

Thibault SIMONÉ, Ivry-sur-Seine

Réponse de M. Mattauer

Il est vrai qu'on avait souvent pris l'habitude de réserver le terme « asthénosphère » au manteau ductile situé au-dessus de la discontinuité de Gutenberg, correspondant à un changement de phase. Cependant, la tomographie sismique a montré, qu'après avoir traversé cette limite, les zones de subduction pouvaient s'enfoncer jusqu'à 1 000, voire 2 000 kilo-

mètres de profondeur. Cela implique que le manteau lui-même se comporte de façon ductile. Des travaux récents ont montré des zones d'anisotropie sismique correspondant à de grands écoulements, ce qui indique que le comportement « asthénosphérique » n'est pas limité au manteau supérieur.

Vous avez tout à fait raison de noter que ce n'est pas la très grande plaque Pacifique qui se rapproche de l'Amérique du Sud, mais seulement la petite partie de l'océan Pacifique situé à l'Est de la ride Pacifique, et que les spécialistes appellent la microplaque de Nazca. Les figures 2 et 3 de l'article le montrent bien.

La règle de l'exception

Comme de nombreux lecteurs de la revue *Pour la Science*, j'apprécie les chroniques de Didier Nordon, mais quelle n'a pas été ma surprise de le voir signer, le mois dernier, un billet où il ne mentionne pas le Dictionnaire du diable, d'Ambrose Bierce :

« Exception (n.). Objet qui prend la liberté de différer des autres objets de sa catégorie, par exemple : un homme honnête, une femme fidèle, etc. La phrase bien connue : « l'exception confirme la règle » revient constamment sur les lèvres des ignorants qui se la passent de l'un à l'autre sans jamais songer à son absurdité. Le proverbe latin *Exception probat regulam* signifie que l'exception, loin de confirmer la règle, la met à l'épreuve. Le malfaiteur qui a traduit cet excellent dicton en lui substituant une phrase d'un sens diamétralement opposé a mis en œuvre un pouvoir maléfique qui semble devoir être immortel.

Hervé THIS

Larves d'insectes

Entomologiste amateur, j'aimerais apporter des précisions à l'article *Les insectes judiciaires* (voir *Pour la Science*, juin 2002). L'auteur, Mark Benecke, écrit que lors de l'examen d'un cadavre, si le corps est desséché, on y trouve surtout des dermestes et des anthrenes, dont on récupère les petites carapaces de chitine qu'ils abandonnent au fil de leurs mues pour déterminer le cheminement de ces insectes dans le corps. Or les dermestes sont des coléoptères : ils ne muent pas au stade adulte. Il s'agit donc plutôt de la larve du dermeste, qui se nourrit également de tissus secs. D'autre part, l'anthrene n'est pas un papillon, ce que laisse croire la qualification de « petites chenilles », mais un coléoptère de la même famille que les dermestes. Jean GELLY, Bouc-Bel-Air

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

Bloc-notes

DIDIER NORDON

Des programmes hors-la-loi!

L'affaire est d'une gravité exceptionnelle. Le Conseil supérieur de l'éducation n'a pas siégé valablement, le 11 juillet 2000, lorsqu'il a délibéré des programmes scolaires. Le quorum n'étant pas atteint à 9h30, une nouvelle convocation a été adressée à ses membres le même jour à 10h. Vous vous rendez compte! Heureusement, la Société des agrégés veille. Elle a saisi le Conseil d'État et obtenu, le 8 mars 2002, qu'il annule les programmes au motif que «ces délibérations doivent être regardées comme ayant eu lieu, non au cours d'une deuxième réunion, dispensée de quorum, mais lors de la poursuite, après une courte interruption, de la réunion initiale».

Que va-t-il se passer? Les mauvais esprits répondent : rien. N'appartenant pas à cette famille spirituelle, je crois au contraire que les autorités vont mettre en place des examens d'un type nouveau. Les élèves devront démontrer qu'ils ont tout oublié des programmes dont on leur avait illégalement bourré le crâne. Ainsi, le mal sera réparé et la Société des agrégés ne pourra se lamenter sur la baisse des exigences : prouver qu'on ignore une chose est autrement plus difficile que de prouver qu'on la connaît.

Le futur de la poésie

Il l'emparouille et l'endosse contre terre,
Il le rague et le roupète jusqu'à son drôle,
Il le pratèle et le libucque et lui baroufle les
ouillais,
Il le tocarde et le marmine,
Le manage rape à ri et ripe à ra.
Enfin il l'écorcobalise.

Ce texte d'Henri Michaux (*Le grand combat*) étant souvent reproduit, on peut imaginer que, au cours des millénaires à venir, les hasards des futurs guerres et pillages, incendies et séismes, inondations et destructions, ces hasards fassent de lui, parmi tous les textes écrits en français, le seul dont un exemplaire survive à l'oubli qui finira par recouvrir notre langue et notre civilisation.



Songérons alors aux érudits archéologues du XXX^e ou du XL^e siècle n'ayant d'autre pierre de Rosette, pour reconstituer notre monde englouti, que *Le grand combat*. Quelles doctes conclusions tireront-ils de son déchiffrement? Comment nous décriront-ils dans leurs ouvrages de vulgarisation à l'intention du public avide de connaissances puisées auprès des meilleurs spécialistes? Impossible à prévoir : cela ne dépendra que de leur imagination.

Songérons également à l'inévitable aplomb avec lequel quiconque disposera d'une tribune s'emparera de ce qui lui convient dans les théories construites sur notre compte, laissera tomber le reste, et dénoncera les interprétations erronées dont se seront rendus coupables ses néfastes rivaux. N'est-il pas vital, en effet, pour qui veut maintenir une position, de proférer avec une parfaite assurance des certitudes absolues – fussent-elles secrétées à partir d'absolues incertitudes?

C'est ce que je viens de faire ici, puisque j'en sais encore moins sur le XXX^e siècle qu'il n'en saura sur nous. Cela montre que mon raisonnement est correct.

Sentiment communautaire

Un ensemble de chercheurs ne suffit pas à former ce qu'on appelle une «communauté scientifique». Il n'en forme une que s'il est structuré par la présence en son sein d'organes administratifs, lesquels doivent être composés, non d'administrateurs professionnels, mais des chercheurs eux-mêmes, qui n'ont bien sûr que cela à faire. L'organe de base est le groupe de recherche. À partir de lui, les organes sont construits par empilements successifs. On fabrique ainsi des laboratoires, composés de plusieurs groupes de recherche ; puis des comités de liaison entre laboratoires ; puis des comités de pilotage au niveau ministériel ; puis des commissions de suivi au niveau interministériel ; puis des comités nationaux d'évaluation ; puis des missions internationales. Etc. Le processus est sans fin. On peut toujours et à tout instant créer une nouvelle structure chargée de chapeauter des structures déjà existantes ou de faire le lien entre elles.

Il y a une contrainte, cependant. Nous sommes en démocratie. Or qui dit démocratie dit égalité des droits. Il est donc impératif que chaque chercheur soit directeur d'au moins un organe et simple membre d'au moins un autre. Nous voici maintenant à même, tirant parti au mieux de la situation, de poser un problème de combinatoire. À savoir : quel est, en fonction du nombre de chercheurs, le



nombre minimum de groupes de recherche nécessaires pour remplir la contrainte?

Le problème a l'air intéressant, voire difficile. Un beau sujet. Ouf! C'est la preuve que, malgré tout, la recherche ne perd jamais complètement ses droits.

Spiritisme mathématique

Je respecte les valeurs établies. Il suffit que Michael Atiyah émette une opinion sur les mathématiques pour que je m'y range aussitôt. Il a eu la médaille Fields, il sait de quoi il parle. Ainsi, constatant la vitesse avec laquelle les mathématiques prolifèrent et se demandant si, dans ces conditions, elles peuvent demeurer le sujet que nous aimons, il déclare être finalement optimiste. Je le serais aussi, si Michael Atiyah n'exposait les raisons «objectives» de son optimisme. Or une de ces raisons est, écrit-il, que, si Newton, Gauss ou Archimède revenaient, ils approuveraient les développements actuels.

Miracle, me voici soudain l'égal de Michael Atiyah! Sa médaille Fields ne prouve rien quant à ses talents de spirite. Pour vérifier ce qu'il affirme, procédons comme lui, c'est-à-dire de façon objective : faisons, à notre tour, tourner les tables. Newton, Gauss, Archimède – grands esprits, êtes-vous là? Nous sommes là. Que pensez-vous de l'état actuel des mathématiques? Nous sommes très pessimistes.

Faire parler les morts est rigoureusement impossible – et c'est précisément grâce à cette impossibilité même que c'est si facile! Essayez, vous verrez. Vous pouvez leur faire dire ce que vous voulez, aucun ne viendra protester (M. Atiyah, *Mathematics : Frontiers and Perspectives*, editors V. Arnold et al., IMU, AMS, 2000, préface p. IX).





Qualité de viandes

HERVÉ THIS

On détermine et l'on pourra contrôler la maturation des viandes et leur tendreté en mesurant leurs propriétés électriques.

Comment être certain que la viande que l'on se prépare à cuire sera bonne? Les cuisiniers ont leurs méthodes. Par exemple, ils examinent le «persillé» : quand ils voient dans le morceau des infiltrations grasses, ils supposent que la viande aura du goût, en raison des molécules aromatiques présentes dans les graisses et que cette viande a une bonne texture, grâce au «fondant» apporté par le gras. Pour voir si la viande est tendre, ils savent aussi la pincer entre les doigts : si la texture approche celle du beurre, la viande aura des chances d'être tendre. D'autres font glisser le pouce dessus, afin de sentir le «grain» (la rugosité serait de mauvais aloi).

Méthodes artisanales, subjectives, que l'on aimerait maîtriser. Au Centre INRA de Clermont-Ferrand-Theix, Jacques Lepetit, Sylvie Clerjon et Jean-Louis Damez ont montré que les propriétés électriques des viandes fournissent des informations objectives sur l'état de maturation des viandes, élément essentiel de la résistance mécanique des viandes, dénommée tendreté.

Au cœur du travail, la notion d'impédance électrique : pour la viande comme pour n'importe quel matériau, l'impédance électrique décrit la façon dont un objet, placé entre deux électrodes, permet le passage d'un courant électrique alternatif. Elle se compose de deux parties : d'une part, la résistance électrique, qui mesure la dissipation de l'énergie sous la forme de chaleur ; d'autre part, la capacité, qui mesure la quantité d'énergie électrique stockée. Dans la viande, cette composante capacitive est notable, parce que la viande se comporte comme un condensateur : les liquides intra et extracellulaires, qui contiennent des ions, sont conducteurs, mais les mouvements de ces charges électriques sont gênés par les membranes biologiques isolantes.

Les chercheurs de l'INRA ont tiré profit des variations de l'impédance selon la direction d'application du courant (parallèle ou perpendiculaire aux fibres musculaires). On conçoit la cause de la différence : la viande est un matériau ani-

sotrope, parce qu'elle est constituée de fibres musculaires, qui sont des cellules allongées contenant un réseau de protéines, de l'eau et tout ce qui fait vivre ces cellules. Ces fibres musculaires sont limitées par leur membrane et gainées par un tissu fibreux contenant du collagène (lequel donne la gélatine, après une longue cuisson dans l'eau). Elles sont réunies en faisceaux par d'autres tissus faits de collagène et des graisses sont incluses dans la structure.

TENDRETÉ ET ÉLECTRICITÉ

Comment évolue la tendreté de la viande de bœuf? L'état de santé de l'animal est important, mais la maturation après l'abattage est cruciale : c'est un processus lent et, surtout, de durée très variable selon les animaux. En France, la viande bovine est généralement commercialisée après une à deux semaines de stockage, alors que l'optimum de maturation n'est pas toujours atteint : le consommateur paye cher une viande qui n'est pas toujours tendre. Comment le satisfaire tout en minimisant les frais de stockage?

Des méthodes de laboratoire, physiques ou biochimiques, permettent déjà de connaître cet état de maturation, mais ces méthodes ne sont pas exploitables en site industriel. Les chercheurs ont donc mis au point des méthodes de mesures rapides et non destructives, adaptées aux contraintes industrielles. Ils ont découvert une relation entre les propriétés électriques et mécaniques de la viande en cours de maturation : pendant la maturation, l'impédance électrique d'un muscle diminue proportionnellement à la résistance mécanique. Pourquoi? Parce que le muscle évolue au cours de la maturation : d'une part, les membranes cellulaires se détériorent progressivement, ce qui réduit leur capacité électrique ; d'autre part, l'espace extracellulaire évolue, ce qui change sa résistance électrique.

Toutefois, la relation découverte entre impédance électrique et résistance mécanique n'est pas exploitable pour le contrôle

de l'état de maturation, car le rapport entre impédance électrique et résistance mécanique varie d'un muscle à l'autre. Cul-de-sac technologique? Pas tout à fait : très récemment, les chercheurs de Theix ont montré, comme nous l'annoncions, que l'anisotropie électrique, c'est-à-dire la différence entre les impédances électriques mesurées parallèlement et perpendiculairement aux fibres musculaires, est directement reliée à la résistance mécanique, indépendamment du muscle et de l'animal. Cette relation résulte d'un même mécanisme biochimique qui dégrade les membranes et le réseau des protéines dans les fibres musculaires.

Et comme un bonheur ne vient jamais seul, les chercheurs ont fait un nouveau pas avec le passage aux hyperfréquences : lorsque l'on envoie une onde électromagnétique de fréquence comprise entre 300 mégahertz et 20 gigahertz, polarisée linéairement (la direction du champ électrique est fixe), on peut également mesurer l'anisotropie diélectrique de la viande. Comme pour les fréquences comprises entre 1 et 10 kilohertz, l'anisotropie des réactions aux hyperfréquences diminue au cours de la maturation. De surcroît, avec les hyperfréquences, il n'est plus nécessaire de planter des électrodes dans la viande pour enregistrer son impédance (ce qui risque de propager des micro-organismes) : on mesure la maturation de la viande sans contact, à l'aide d'antennes.

Des capteurs hyperfréquences révéleront-ils bientôt la maturation des viandes? Quand ce sera, les bouchers sauront, mieux qu'au toucher, déterminer la tendreté de leur produit.

L'ouvrage *Casseroles et éprouvettes*, édité par Belin-Pour la Science regroupe les chroniques *Science et gastronomie* d'Hervé This, revues en fonction des progrès récents.

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



Oui, mais pas chez moi!

IVAR EKELAND

Les particuliers n'aiment guère être pénalisés pour un avantage profitant à la communauté. C'est le syndrome Not in my backyard!

Je suis président du Conseil syndical de mon immeuble. Nos réunions sont consacrées aux problèmes traditionnels des copropriétés. Le ravalement et l'ascenseur reviennent périodiquement à l'ordre du jour, mais lors de la dernière séance nous avons dû trancher une question nouvelle : le gestionnaire d'une des boutiques du rez-de-chaussée nous demandait l'autorisation d'y installer un pressing.

Voici des années que mon épouse se plaint de la difficulté de trouver un pressing à proximité de l'endroit où nous habitons, et nous prenons l'autobus, nos linges sous le bras, pour les porter ou les rapporter du nettoyage. Tout l'immeuble étant logé à la même enseigne, la proposition aurait dû passer par acclamations. C'était compter sans la méfiance naturelle des gens qui ont du bien : qu'il faille une autorisation nous avait mis la puce à l'oreille, et chacun s'était renseigné. L'escalier de l'immeuble ne bruissait que des nuisances, réelles ou supposées, des pressings, témoignages à l'appui. Les produits utilisés pour le nettoyage risquaient de nous incommoder, voire même de causer allergies ou intoxications. C'est un cas typique de ce que les économistes appellent une externalité négative : tout le voisinage bénéficierait de la proximité du pressing, mais les habitants de l'immeuble en supporteraient seuls les inconvénients.

Une manière de faire serait de ne pas exiger d'autorisation préalable pour installer un pressing. Mais la valeur marchande des appartements dépendant de la présence d'un pressing dans l'immeuble, le gestionnaire du rez-de-chaussée pourrait à son gré changer le prix de biens qui ne lui appartiennent pas et qu'il n'entend pas acheter. On pourrait imaginer qu'il installe un pressing, puis en négocie la fermeture auprès des copropriétaires.

Que ceux qui jugent ce scénario peu crédible relisent *Topaze*, où ils verront comment Castel-Bénac, conseiller municipal véreux, tire ses revenus d'une vespasienne, bien nécessaire au soulagement de ses administrés. Il prend

soin que l'édicule soit devant la terrasse d'un café. Les chaleurs venues, le tenant sent son malheur et monnaie l'éloignement de la source. Castel-Bénac déplace alors la vespasienne, bien entendu devant un autre café, et s'assure ainsi, de proche en proche, une rente annuelle, qui, elle, selon la formule de l'empereur Vespasien, n'a pas d'odeur.

Dans le cas du pressing, en l'absence d'autorisation préalable, le résultat le plus probable est que les copropriétaires règlent le problème en rachetant le local pour éviter qu'on y installe des commerces, et donc un pressing. Si tous les immeubles adoptent cette solution, il y aura de très grandes difficultés à trouver un local commercial, et toute la collectivité en souffrira. Il faut donc trouver autre chose. La réglementation? Ne pas demander d'autorisation préalable, mais imposer des normes de sécurité très strictes? Certes, si le risque pouvait être éliminé complètement, aucune autorisation ne serait plus nécessaire, et c'est bien ce qu'avaient compris les copropriétaires : qu'elle le soit dénote un risque résiduel, moins grave que pour une centrale nucléaire, mais certain. L'immeuble est-il prêt à l'assumer pour le bénéfice de la collectivité? La réponse, bien entendu, est non, et l'autorisation fut refusée à l'unanimité. Au grand dam de la collectivité, en l'occurrence les habitants des quelques rues qui nous entourent, y compris les occupants de l'immeuble, qui continueront à perdre du temps en transports pour aller dans des pressings lointains.

Voilà donc en action, à l'échelle d'une petite rue de Paris, le principe bien connu du «D'accord, mais pas chez moi», en anglais *Not in my backyard*, principe qui empêche la construction d'incinérateurs d'ordures à proximité des villes, de nouveaux aéroports dans les campagnes et de centrales thermiques en Californie. Chacun est d'accord sur l'utilité de ces équipements, et est partisan d'en construire de nouveaux, mais personne n'en veut devant chez soi. Comment s'en sortir?

Que dit la théorie économique? Qu'il ne faut construire le pressing que si le bénéfice que la collectivité en tire est supérieur au préjudice qui affectera quelques-uns. En d'autres termes, il faut que les bénéficiaires du pressing soient prêts à verser aux propriétaires de l'immeuble une somme suffisante pour compenser la perte de valeur de leurs appartements. Pour ce faire, le gérant du pressing pourrait payer mensuellement un droit d'exploitation qu'il répercuterait sur ses prix.

Outre qu'il n'est pas évident qu'il puisse alors pratiquer des prix concurrentiels (et donc trouver des clients), cette solution est injuste puisqu'elle fait payer à tous les clients du pressing, d'où qu'ils viennent, un avantage qui n'est consenti qu'à ceux qui habitent au voisinage. Une meilleure solution consisterait à imposer à tous les voisins une taxe qui représenterait en gros le supplément de valeur que prend leur appartement du fait de la présence d'un pressing à proximité, et à verser aux propriétaires de l'immeuble une somme qui compense exactement la perte de valeur de leur propre appartement.

Si c'est impossible – c'est-à-dire si le montant de la taxe est insuffisant pour verser la compensation – c'est que les inconvénients du pressing en dépassent les avantages et il ne faut donc pas l'installer là. Si c'est possible – si le montant de la taxe dépasse celui de la compensation – l'installation du pressing est avantageuse pour la collectivité. On peut donc utiliser la taxe pour dédommager les propriétaires de l'immeuble, et l'opération dégage même un bénéfice, un surplus social, qui n'appartient en propre à personne. On peut, soit le partager (en s'entendant sur la manière de le faire), soit l'employer à une œuvre d'intérêt général.

Je verrais bien une petite fête où l'on convierait les habitants du quartier, histoire de faire connaissance et de célébrer la mise en pratique de la théorie économique.



Les défis du Muséum d'histoire naturelle

BERNARD CHEVASSUS-AU-LOUIS

Les missions du Muséum national d'histoire naturelle ont été redéfinies : les chercheurs devront décrire le monde du vivant, en comprendre le fonctionnement et agir pour sa préservation.

Aujourd'hui, quelle est la «raison d'être» du Muséum national d'histoire naturelle ? Créé en 1635 par Louis XIII, le Jardin royal des plantes médicinales a pour objet la culture et la conservation des plantes servant à la formation des pharmaciens, des droguistes et des futurs médecins. La chimie, la botanique et l'anatomie y sont enseignées, malgré l'hostilité de la Faculté de médecine de Paris. Au début du XVIII^e siècle, les cours se développent et les installations consacrées aux cultures se multiplient. En 1729, le Jardin royal des plantes médicinales devient le Jardin des plantes, puis le Jardin du roi. À la Révolution, par convention du 10 juin 1793, ce dernier est transformé en Muséum national d'histoire naturelle. Pour que cet établissement retrouve, dans l'espace scientifique français et international, la place d'excellence qui fut la sienne, sa mission a été redéfinie : elle doit être centrée sur l'étude de la diversité biologique et écologique, présente et passée – y compris celle de notre espèce – de son rôle, de son origine et de son devenir. Pour ce faire, le Muséum doit développer des actions de conservation, de recherche, d'enseignement, de diffusion des connaissances et d'expertise.

Pour répondre à ces objectifs, le Muséum s'est doté, le 3 octobre 2001, d'un nouveau statut. Il doit se réorganiser en profondeur, en s'appuyant notamment sur des conseils, le Conseil d'administration et le Conseil scientifique, ouverts à des personnalités extérieures, et sur la mise en place de départements. Sur le plan scientifique, une telle ambition suppose de faire appel aux sciences de la vie au sens large, mais aussi à deux ensembles complémentaires : les sciences de la Terre, indispensables pour décrire et comprendre les environnements présents et passés ainsi que les interactions multiples au sein du système géosphère-biosphère, et les sciences

humaines et sociales, dont l'analyse des relations, à la fois concrètes et symboliques, entre l'homme et la nature, conditionnera l'élaboration de pratiques durables de gestion de la diversité. Il ne s'agit pas là de revendiquer la légitimité de recherches en sciences de la Terre ou en sciences sociales au Muséum, mais plutôt de conserver, voire d'élargir le panorama des disciplines abordées, afin d'assurer une contribution de ces disciplines au projet global.

Un autre aspect tient à la position particulière que doit occuper le Muséum face au monde vivant, à la fois unique et divers. Durant la seconde moitié du XX^e siècle, les possibilités d'explorer l'organisation cellulaire et moléculaire du vivant ont permis de constater sa profonde unité, et les résultats les plus récents issus de l'étude des génomes et du développement renforcent encore ce constat. Toutefois, plus ce dernier est conforté, plus il exige une meilleure compréhension de l'extraordinaire diversité des organismes peuplant notre planète.

Enfin, cette vision globale obligera le Muséum à être présent sur quatre fronts simultanément : décrire le monde du vivant, le comprendre, sensibiliser tout un chacun pour le maintien de sa biodiversité et agir pour sa préservation. Ces objectifs nécessiteront de faire un inventaire rigoureux et de décrire la diversité, qui, à l'exception des espèces macroscopiques des pays tempérés, demeure pour l'essentiel un terrain en friches. Le Muséum doit, en concertation étroite avec tous les partenaires concernés, continuer à jouer un rôle central dans ce domaine, y compris dans la conservation des collections issues de ces travaux d'inventaire. Même sur la base d'inventaires encore très incomplets, le Muséum devra s'investir davantage dans cette mission, notamment en précisant la nature des enjeux, entre une vision

optimiste et permissive d'une nature robuste, et une vision très restrictive considérant toute disparition d'espèce comme une catastrophe écologique.

On devra également analyser les relations complexes entre les activités humaines – passées, présentes et futures – et la diversité biologique qui, même mal connue et mal comprise, fait l'objet d'une prise de conscience obligeant au développement de politiques publiques nationales et internationales. Restera l'action éducative et culturelle, visant à faire découvrir cette diversité et à sensibiliser tous les acteurs aux questions que pose la gestion durable de ce patrimoine unique. La coexistence de ces différents objectifs engendrera peut-être des tensions au sein du Muséum, mais lui donnera une dynamique de bon aloi, à condition que la cohérence de l'ensemble soit assurée.

Ces défis scientifiques nécessiteront la coexistence de départements spécialisés et de directions de coordination transversale assurant la cohérence globale des missions. Deux types de départements ont été créés pour regrouper la quarantaine de laboratoires et services préexistants, six départements de recherche et d'enseignement et trois départements éducatifs et culturels. Les départements de recherche et d'enseignement devront demeurer des partenaires actifs des départements éducatifs et culturels pour leur mission de diffusion des connaissances. En outre, les autres missions de l'établissement (conservation des collections, expertise et valorisation) demeureront un domaine d'activité pour tous les départements. Les directions transversales seront chargées d'animer, de coordonner et de superviser les actions de l'ensemble des départements.

Bernard CHEVASSUS-AU-LOUIS est le Président du Muséum national d'histoire naturelle.



Gould, héraut de l'évolution

JEAN-LOUIS HARTENBERGER

Parce ce qu'il a combattu les a priori et les idées reçues, Gould a fait progresser la paléontologie. Passé maître en vulgarisation scientifique, il a aussi fait découvrir cette discipline au grand public.

En rediffusant quelques jours après sa mort, l'épisode de la série télévisée, les *Simpson*, où son personnage avait fait une incursion remarquée, la télévision américaine a su rendre à Stephen Jay Gould (1941-2002) l'hommage médiatique qu'il fallait. Gould fut en effet avant tout, et pour notre plus grand plaisir, un savant populaire. Aux États-Unis, on peut dire que son nom est synonyme de théorie de l'évolution. D'abord écrivain, il n'hésitait pas à faire étalage de sa grande culture devant tous les médias et provoquait des débats scientifiques et philosophiques devant les tribunaux, bien marris d'avoir à endiguer son militantisme évolutionniste en lieu et place de leur ronron convenu. Pourrait-on imaginer qu'en France, un scientifique de haute volée soit le héros des *Guignols de l'info*? Il est vrai qu'il y a un océan entre les deux séries cultes, qui n'ont en commun que le même souci de flatter leurs publics. Pourtant, il arrive que la culture y soit l'invitée surprise! Et c'est le cas lorsqu'un penseur, un scientifique, ennemi juré des idées reçues de surcroît, paraît à l'heure où le peuple va se désaltérer devant les étranges lucarnes et discours de l'ordre de la nature, de sa puissance comme de sa fragilité.

C'est en 1974 que Gould a débuté sa carrière d'échotier de l'évolution, et, depuis, sa renommée n'a fait que grandir. Il a su rendre attractives et plaisantes, des disciplines – la paléontologie et l'évolution – réputées poussiéreuses, austères et même obsolètes. Avec ses *Contes de la Nature*, 28 ans durant, de 1974 à la fin de 2001, écrits pour la revue *Natural History Magazine*, publication du Muséum d'histoire naturelle de New York, il entraîna des millions de lecteurs dans de véritables voyages dans le temps. Sa rubrique s'intitulait *Cette conception de la vie*, titre emprunté à un ouvrage de George Gaylord Simpson, l'un de ses grands

prédécesseurs, paléontologue comme lui, mais spécialiste de mammifères en lieu et place des escargots, que Gould chassait aux Bahamas. Il produisit ainsi quelque 300 nouvelles scientifiques à un rythme mensuel, et chacune est un petit chef-d'œuvre. Les compilations qui en sont issues ont donné lieu à plusieurs volumes, traduits dans de nombreuses langues. Ainsi en est-il de *Darwin et les grandes énigmes de la vie*, *Le sourire du flamant rose*, *Le pouce du panda*, ou encore *La foire aux dinosaures*, et quelques autres aux titres accrocheurs certes, mais dont le contenu n'est pas de la science de bazar, loin de là.

Toutes sont d'une élégance d'écriture peu commune, et le meilleur exemple de vulgarisation scientifique que l'on puisse donner : leur ton est badin, mais elles enchantent l'amateur de science naturelle, troublent souvent et éclairent le spécialiste. Ses digressions nous font compatir aux aléas existentiels que connaissent les escargots, les antilopes, les champignons, les vers ou les dinosaures.

L'ÉCHOTIER DE L'ÉVOLUTION

Au détour des exemples qu'il donne, il profite de l'occasion pour instiller des notions subtiles ou des concepts ardu. Par exemple, son hypothèse sur les qualités adaptatives des bois gigantesques du *Megaceros*, ce grand cervidé d'Irlande disparu il y a quelque 10 000 ans, pourra paraître discutable. Est-il vrai que cette ramure gigantesque n'était utilisée que comme symbole visuel de domination entre mâles? Peu importe, au passage Gould a clairement montré ce qu'était une relation allométrique (le poids est proportionnel à une puissance de la taille) : c'est cela la vulgarisation scientifique, savoir passer de l'anecdote à la théorie, inviter à la réflexion.

Et puis Gould parsème ses récits des portraits de ces hommes qui inventaient depuis trois siècles les mystères de la nature : suivre leur démarche, comprendre pourquoi ils ont échoué ou réussi à convaincre leurs contemporains de la justesse de leurs idées, est un travail d'ethnologue qui n'est pas la facette la moins intéressante des contributions gouldiennes. Son grand homme est bien sûr Charles Darwin. Il n'empêche qu'en plusieurs occasions, on peut se demander s'il souhaite chanter les louanges de Darwin ou... de Gould. Le nombrilisme de l'auteur agace parfois. Aussi cultivé qu'un prince de la Renaissance, il en a les qualités de modestie! En contrepartie, il y a son humour, toujours à fleur de plume, et de-ci de-là quelques piques pour ses collègues. Sa culture est vaste et éclectique : il cite aussi bien Marx (Karl), Cuvier, Lyell, Haeckel, que Marx (Groucho), Stanley Kubrick, Kate Millet... clins d'œil appuyés, qui sont autant de points d'ancrage contemporains, de références à la culture



D'après Goodfriend G.A. et S.J. Gould, *Science* 1996, vol. 274.

1. Ces six spécimens sont des gastéropodes terrestres appartenant au genre *Cerion*, objet de nombreux travaux de Gould. Les deux individus digitiformes (à gauche) de l'espèce *Cerion columna* sont actuels, tout comme les spécimens à spire légèrement écrasée (au centre). Ces derniers ont une forme intermédiaire entre les spécimens de *columna* et les deux exemplaires bulbiformes, appartenant à l'espèce fossile *Cerion excelsior*, trouvés dans des sédiments datant de 20 000 ans.

actuelle avec lesquels il s'attire la complicité du public. Une autre de ses «recettes» consiste à émailler son propos de souvenirs d'enfance et autres aventures familiales, n'hésitant pas à partager sa passion pour le chant choral ou... pour le base-ball.

C'est ainsi qu'à l'écouter, on en arriverait à croire que du côté de Cambridge, ces nouveaux jeux du cirque, manifestations d'infantilisme collectif fruits de nos civilisations consuméristes, sont assimilés à des valeurs culturelles phares. Cependant, les parallèles qu'il trace pour expliquer certains paradoxes d'études statistiques pointues ne deviennent-ils pas lumineux, dès qu'on les pimente de coups de batte et de trajectoires de balles lancées ?

Il avait conclu son 300^e essai en précisant qu'il souhaitait se retirer au sommet de son art, tel le joueur de base-ball Joe Di Maggio, plus connu, en France, pour son fugitif partenariat marital avec Marilyn Monroe. Dans le même temps, il inaugurait dans la revue *Paleobiology*, une série consacrée à l'histoire des sciences géologiques. Elle s'intitule *Index des fossiles qui ont donné naissance aux concepts en usage*. Dans le premier article de la série, il rendit un hommage appuyé à Guillaume Rondelet, le Maître Rondibilis de Rabelais lorsqu'il était étudiant à la Faculté de médecine de Montpellier !

Le dernier recueil est un hommage à son grand-père maternel. Venu de Hongrie, il passa le filtre de l'immigration en 1901, avant de partir à la conquête de l'Amérique avec six dollars en poche. Son petit-fils aimait à raconter que sa vocation de paléontologue datait de sa première visite au musée, lorsqu'à cinq ans, il avait été confronté au squelette du terrible et gigantesque Tyrannosaure. Après des études universitaires à Antioche, dans l'Ohio, il obtint son diplôme de l'Université de New York, en 1967. Nommé professeur à Harvard, il devait occuper le bureau de Louis Agassiz (1807-1873), anti-évolutionniste quasi pathologique. Il y enseigna pendant 35 ans la paléontologie, mais aussi la biologie, la géologie et l'histoire des sciences. Des foules d'étudiants se pressaient à ses cours, et, à partir des années 1980, il enseigna aussi à l'Université de New York.

LE CONTEUR DE LA VULGARISATION

Écrivain scientifique prolifique par ses nouvelles mensuelles, il a aussi commis plusieurs ouvrages de vulgarisation, dont *La malmesure de l'homme* et *La vie est belle*. Le premier, sous-titré *L'intelligence sous la toise des savants*, a connu un vaste succès, alors que le sujet est réputé rébarbatif et que, contrairement à ses autres ouvrages, l'humour ne fait ici aucune incursion. Le problème du déterminisme biologique est au centre du propos. Depuis des décennies, on sonde le contenu et les méandres de nos cerveaux. Ayant collecté mille et une données, poids du cerveau, circonférence du crâne, aptitudes à répondre aux tests (d'intelligence bien sûr !), on obtient une bouillie quantifiable, qui passée au crible d'une écumeoire mathématique, fournit un chiffre unique pour chaque individu.

Ce sont les débordements des différentes écoles de crâniométrie, qu'elle soit américaine avec Norton, ou française avec Paul de Broca, qu'a fustigés Gould dans ses premiers chapitres. Avec une mention spéciale pour Lombroso, spécialiste d'anthropologie criminelle, qui reconnaissait les criminels au faciès. Ce savant n'hésitait pas à écrire, en 1899, que tel ou tel pouvait faire un coupable tout à fait convenable, au vu de ses caractéristiques «biologiques», qu'il s'agisse des rides de son visage, ou de ses tatouages ! En cette occasion, Gould s'attaque à des scientifiques qui ont eu pignon sur rue, et même continuent d'être honorés. L'une de ses victimes est Louis Agassiz, fondateur du Musée de zoologie d'Harvard, celui-là même dont Gould occupe la chaire et le fauteuil. Une autre est l'anthropologue de Broca (1824-1880). C'est pourtant surtout au

QI, cette invention française due à Edouard Binet et qui servit de bien noirs desseins, que Gould réserve ses critiques les plus argumentées. Pour ce faire, il dissèque minutieusement données, outils mathématiques, préjugés philosophiques qui sous-tendent les questions posées, et ne laisse rien dans l'ombre. Dans un langage mesuré qui fait fi de la polémique, la démonstration de Gould balaie tous les pseudo-arguments de cette mauvaise science. Dans l'épilogue, non dépourvu d'émotion, il rappelle les conséquences tragiques qu'ont pu entraîner de telles élucubrations, car ne l'oublions pas, le racisme s'est fondé sur ces théories «scientifiques», apparemment irréfutables. Aussi, si certaines des conclusions de ces anciens auteurs nous paraissent risibles, il ne faut pas perdre de vue qu'elles furent édictées par des hommes de science écoutés en leur temps.

Gould était de ceux qui considèrent que le racisme et l'élitisme sont des maladies graves et récurrentes des sociétés, qui nécessitent un combat quotidien, et que, dans ce domaine, la vigilance s'impose. Et il avait raison ! Ainsi est paru, en 1994, aux États-Unis, un ouvrage de R. J. Herrnstein et C. Murray, *La courbe en cloche*, qui connut un succès immédiat. Le sous-titre est éclairant : *Comment repenser le modèle américain d'après les différences d'intelligence*. On ne s'étonnera pas que Gould se soit lancé par presse interposée dans la bataille contre une œuvre qu'il qualifia de débile et de grotesque. Pourtant dans ce cas aussi, les auteurs sont des scientifiques



2. L'explosion cambrienne, il y a près de 560 millions d'années, fut l'épisode de diversification le plus intense de l'histoire de la vie. En un seul ouvrage de vulgarisation, Gould en fit la renommée auprès du grand public et força ses collègues à y porter un œil neuf.

connus, mais ce que l'on a qualifié de «darwinisme social» a la peau dure, et trouve toujours des avocats, y compris dans notre hexagone. Si ces soubresauts de la société américaine peuvent paraître lointains, ils nous concernent, mondialisation aidant. Dans la conclusion de son article du *New Yorker*, Gould notait combien il était curieux qu'un chiffre unique et faux puisse autant diviser, alors que l'évolution est synonyme d'unité et de diversité, et qu'elle a montré que tous les hommes ont en commun la même généalogie.

L'histoire de *La vie est belle* est tout autre : c'est un ouvrage de paléontologie jubilatoire, comme il en existe peu. Il conte par le menu ce que fut cet épisode extraordinaire de l'histoire de la vie, l'explosion du Cambrien. Voici plus de 500 millions d'années surgirent d'étranges créatures, ancêtres de toutes celles qui peuplent aujourd'hui notre planète, et qui sont les mères de la biodiversité, cette nouvelle venue dans nos préoccupations. Les gisements phares qui ont livré les premières faunes de cette époque sont ceux de Burgess au Canada, découverts au début du ^{xx}e siècle. Depuis lors, la Chine, l'Australie et d'autres pays ont à leur tour fait étalage de richesses paléontologiques de cet âge, et la diversité de ces faunes primordiales s'est encore accrue de plusieurs unités. Le plus étonnant est qu'aux côtés d'animaux «classiques» – ancêtres des éponges, oursins, mollusques ou vers – et de certains qui évoquent déjà les premiers vertébrés, on trouve aussi des organismes restés sans descendance connue : leur plan d'organisation est tout à fait insolite... Ce sont là des surprises de l'évolution.

En écrivant ce livre, Gould ne se fit pas que des amis, notamment chez les spécialistes qui, depuis des décennies, s'efforçaient d'interpréter ces traces du passé, et qui considéraient que cet expert ès escargot n'était pas le bienvenu pour chasser sur leurs terres ! Habités à converser avec des objets peu loquaces, la plupart des paléontologues ne le sont guère hors de leurs cercles. Aussi lorsque survient un quidam, tel Gould, aussi brillant qu'arrogant, qui fait sortir les fossiles des tiroirs et des musées, et ne craint pas de débattre sur la place publique, jusqu'à prendre à témoin les amateurs de base-ball, certains font grise mine.

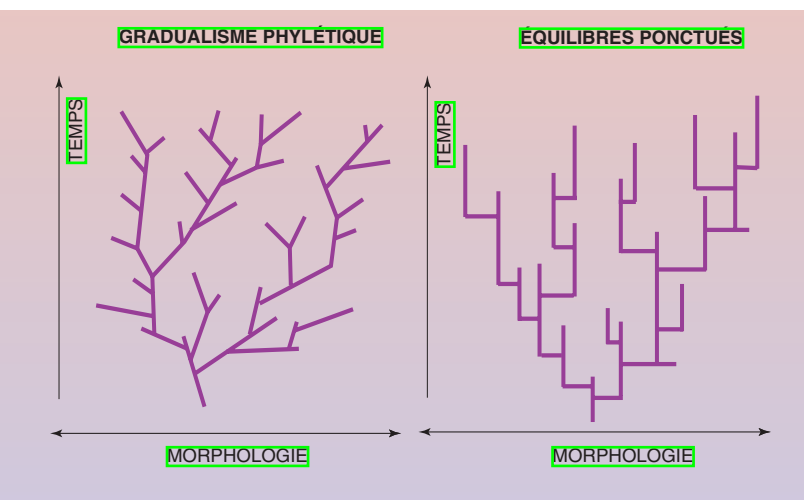
Il est vrai que Gould emprunta largement aux travaux de ses collègues, mais son talent de vulgarisateur et son esprit de synthèse ne furent pas de trop pour faire connaître au public cette grande nouvelle que seuls quelques-uns connaissaient déjà : la diversité de la vie est apparue brutalement voici 560 millions d'années, et cette explosion de la vie s'est produite dans un laps de temps court, quelques millions d'années seulement. Et puis, par-delà la description de ce bestiaire incroyable et de l'enquête policière qui a permis d'en retrouver la trace, puis de reconstruire et de préciser les caractéristiques de ces étranges animaux, Gould remet en cause, une nouvelle fois, certaines conceptions classiques. En cette occasion, il montre l'importance de la contingence dans l'histoire de la vie : l'enchaînement de tous ces événements évolutifs, s'il est devenu, au fil des études, parfaitement explicable, du moins *a posteriori*, et si cette succession suit une logique rigoureuse, il n'empêche qu'aucun fait d'évolution, si minime soit-il, n'était prévisible, pas plus qu'il n'est reproductible. La contingence est un maître mot pour Gould, qu'il s'agisse de l'histoire de la vie ou de celle de l'homme, et il considère que l'avenir des deux est imprévisible.

NATURALISTE DE TERRAIN ET THÉORICIEN

Vulgarisateur remarquable, Gould fut aussi un homme de terrain, et il laisse une belle somme de travaux originaux sur ses fossiles de prédilection : les gastéropodes, et, notamment, les Cérions, mollusques terrestres actuels et fossiles, présents aux Caraïbes. Tout paléontologue doit nourrir sa pensée par l'exercice du terrain qui commence par la recherche des fossiles, se poursuit par leur récolte et leur identification, et s'achève par leur étude. Tous ses collègues s'accordent à reconnaître que, sur le terrain, Gould était un «découvreur» de fossiles très efficace. Toutefois, récolter en nombre des spécimens ne suffit pas, il faut aussi savoir ce que l'on cherche et ce que l'on souhaite montrer... jusqu'au moment où l'on est amené à revoir l'hypothèse initiale, ce qui est souvent le cas, et qui conduit à échauffer une nouvelle théorie.

Gould ne fut jamais avare de conjectures, et préférait à toutes les autres théories celles qu'il avait lui-même forgées. Il eut quelques marottes, bien qu'il se défendît d'un tel travers. Ce fut le cas lorsqu'il lança, avec son collègue Niels Eldredge, la théorie des équilibres ponctués. Selon cette théorie, l'évolution des espèces ne se produit pas toujours de la façon graduelle sur laquelle Darwin avait tant insisté, mais connaît de longues périodes de stagnation entrecoupées d'épisodes frénétiques d'innovation biologique. Ses propres travaux sur les Cérions des Bahamas (voir la figure 1) éclaircissent son attachement à ses vues théoriques. Il avait récolté des spécimens de cet escargot terrestre dans différents niveaux des dépôts du Quaternaire des Bahamas. Les plus anciens sont globuleux, bulbiformes, alors que les formes plus récentes sont allongées, digitiformes. Parmi elles, il existe aussi des coquilles de morphologie intermédiaire, ni allongées ni écrasées. Tout un chacun aurait interprété cette situation comme une preuve patente d'évolution graduelle. Défenseur acharné de sa théorie des équilibres ponctués, Gould tergiversa et conclut son article en disant... qu'on ne pouvait pas conclure, préférant spéculer sur une prétendue hybridation entre populations fossiles !

Cette aventure ne doit pas faire perdre de vue qu'en jetant sur la table leur hypothèse des équilibres ponctués, Eldredge et Gould ont servi notre communauté, et le débat a même dépassé le cercle des paléontologues pour concerner tous les évolutionnistes. Ce fut le grand mérite de cette théorie que de contraindre notre communauté à une réflexion sur les méthodes de la paléontologie et sur les dogmes aprioristes.



3. Deux modèles d'évolution morphologique s'opposent : le gradualisme phylétique (à gauche), et le modèle des équilibres ponctués (à droite), défendu notamment par Gould. Dans le premier, les modifications morphologiques se produisent de façon graduelle et elles ne sont pas liées aux événements de spéciation. Pour le second, les transformations morphologiques se produisent lors des épisodes de spéciation et sont brutales : il y a des «sauts» évolutifs après lesquels on n'observe pas de changement morphologique durant l'existence de l'espèce. Dans ce modèle, des périodes d'évolution rapide sont séparées par des périodes de stase morphologique.

ÉVOLUTION PROGRESSIVE OU ÉVOLUTION PAR SAUTS?

La question de fond qu'ils ont soulevée revêt plusieurs facettes. Les observations que l'on fait dans le domaine de la micro-évolution peuvent-elles, seules, expliquer les événements de macro-évolution? Autrement dit, la variation intraspécifique suffit-elle à rendre compte des grands événements d'évolution que constatent les paléontologues (l'apparition de nouveaux plans d'organisation ou de nouveaux phyla)? Par ailleurs, la formation des espèces est-elle liée à des transformations morphologiques notables? Enfin, les modifications sont-elles lentes et graduelles ou, au contraire, sont-elles brutales, correspondant à des sauts évolutifs (voir la figure 3)? C'est ce dernier modèle que Elredge et Gould ont défendu pendant 25 ans, soulignant que le registre fossile regorge d'exemples où l'on observe que les espèces sont stables sur de longues périodes, et que les nouvelles espèces surgissent brutalement. L'argument selon lequel la stagnation est une donnée comme les autres invite les paléontologues à prêter plus d'attention à un aspect de l'évolution qu'ils ont trop négligé.

Les principales critiques faites à leurs propositions ont porté sur le lien obligé qu'Elredge et Gould établissent entre spéciation (naissance d'espèces filles) et transformation morphologique, lien qui entraîne que la sélection d'espèces est le moteur le plus puissant de l'évolution (alors que pour le darwinisme orthodoxe, la sélection n'agit que sur les individus). Bien des biologistes, et non des moindres, se sont élevés contre cette hypothèse, notamment les partisans convaincus de l'adaptation. Chez les paléontologues, ce qui déclencha le plus de controverses fut l'idée qu'il faut considérer comme périmé le gradualisme si cher non seulement à Charles Darwin lui-même, mais aussi à tous les chasseurs de fossiles. Selon Darwin, les transformations qu'ont connues les êtres vivants au cours des temps géologiques ont été lentes et continues, sur de très longues périodes, et si l'on ne trouve que peu de formes intermédiaires, c'est que l'enregistrement fossile est plein de lacunes.

Dans ce domaine, depuis 1859, des découvertes nombreuses sont venues apporter des réponses éclairantes, qu'il s'agisse de l'origine des oiseaux, de celle des baleines, voire de notre propre espèce. Peu à peu, nous reconstruisons l'histoire des lignées et comblons les vides qui existaient dans le registre fossile au temps de Darwin. Si l'on revient maintenant à la question des sauts évolutifs, il est vrai qu'elle reste discutée, mais est-elle réellement bien posée, et surtout est-elle à la portée des observations qui sont disponibles aux paléontologues? L'enregistrement fossile, ne l'oublions pas, est tributaire de l'enregistrement sédimentaire. Ne peut-il arriver que l'on confonde, en observant l'évolution d'espèces à différents niveaux de la colonne stratigraphique, la vitesse d'évolution de leurs caractères avec celle de l'enregistrement sédimentaire? Les stases morphologiques ne sont-elles pas dues à des épisodes au cours desquels la sédimentation fut continue et l'accumulation lente, alors que les sauts sont observés après des interruptions du dépôt?

Des études expérimentales récentes, conduites par des généticiens sur la bactérie *Escherichia coli*, me paraissent très instructives quant aux questions d'échelle de temps (voir la figure 5) et de continuité (ou de discontinuité) des enregistrements fossiles. Par leur capacité de multiplication, ces micro-organismes offrent bien des avantages qu'on rechercherait en vain chez les fossiles. Observer quelques milliers de générations qui se succèdent dans les boîtes où on les élève n'est qu'un jeu d'enfant, du moins pour les microbiologistes. Ainsi Richard Lenski et Michael Travisano, de l'Université du Michigan, ont observé l'évolution de 10 000 générations successives d'une douzaine de colonies d'*Escherichia coli* durant quatre ans. Ils ont suivi l'évolution de

la taille de leurs cellules et de la valeur sélective (un coefficient qui mesure la capacité à passer le crible de la sélection naturelle) des colonies de ces micro-organismes. Ils constatent que leurs «courbes d'évolution» sont très différentes selon que les prélèvements et les mesures sont effectués toutes les 100 ou toutes les 500 générations.

Dans le premier cas, on obtient une courbe en escalier, conforme au modèle de Elredge et Gould, dans le deuxième, la courbe révèle une évolution graduelle. Cependant, dans les deux cas, à l'issue de l'expérience, un palier de stabilité – une stase – est atteint. L'hypothèse d'Elredge et de Gould paraît vérifiée : les caractères peuvent rester stables pendant des périodes plus ou moins longues. Cependant, stabilité d'un ou de plusieurs caractères n'est pas synonyme de stabilité de l'espèce qui les porte. Les causes de ces phénomènes de stase sont peut-être à rechercher au cœur des cellules, dans leur mode de fonctionnement et, surtout, de leur développement. Ainsi, l'importance d'une protéine «chaperonne» (Hsp 90) est régulièrement confirmée. Les protéines chaperonnes ont pour mission de protéger les autres protéines contre les agressions extérieures, par exemple une brusque élévation de la température. C'est peut-être là le premier pas «moléculaire» qui nous permettra de mieux comprendre la stase et d'en mesurer les effets.

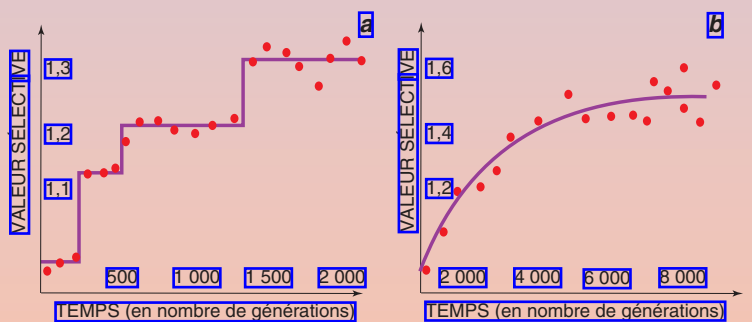
A cette occasion, on voit que, loin de concerner uniquement le cercle étroit de la paléontologie, les travaux de Gould ont ouvert des perspectives dans bien d'autres disciplines. Si j'ajoute que, dans la foulée de son travail sur les équilibres ponctués, il écrivit, en 1977, un autre ouvrage *Ontogénie et Phylogénie* qui, à son tour, devint une référence – au point que la lecture en est aujourd'hui imposée aux débutants –, on ne s'étonne pas qu'au fil des ans, l'autorité et le prestige de Gould soient allés grandissants.

ONTOGÉNIE ET PHYLOGÉNIE

Le biologiste Ernst Haeckel (1834-1919) avait écrit : «L'ontogénie récapitule la phylogénie.» Autrement dit, au cours de son développement (ontogénie), chaque embryon passe par les formes primitives qui ont précédé celles de son espèce (phylogénie). Ce concept était passé de mode, lorsque Gould en fit son miel en le réactualisant et en suggérant que l'on devait



4. Gould devant le Tyrannosaure qui fut, selon ses dires, à l'origine de sa vocation de paléontologue.



5. La valeur sélective a été représentée en fonction du temps, exprimé en nombre de générations, dans des populations d'*Escherichia coli*. Quand on fait les mesures toutes les 100 générations (a), la courbe évoque celle des équilibres ponctués, tandis que des mesures effectuées toutes les 500 générations (b) indiquent une évolution graduelle.

étudier de plus près les hétérochronies de développement (le fait que l'on peut passer d'une forme vivante à une autre, très différente, par la simple modification de quelques gènes commandant les rythmes de développement de l'embryon).

D'aucuns diront que le vocabulaire sybillin qu'il remit au goût du jour – paedomorphose ou péramorphose – ne déboucha que sur des joutes logomachiques. Il n'empêche que, ce faisant, une réflexion s'engagea chez tous les évolutionnistes, qui devait porter ses plus beaux fruits lorsqu'à la même époque se déclencha la révolution cladiste. Cette approche permet de construire un arbre généalogique des espèces en recherchant les caractères évolués qu'elles partagent et en supposant qu'entre chaque embranchement, le nombre de transformations évolutives est minimal. Nombre de systématiciens étaient restés jusque-là quasi indifférents à la notion d'homologie, et la lecture de Gould fut des plus salutaires. Par ailleurs, un regain d'intérêt se fit jour pour les études d'embryologie évolutive, et, la génétique du développement prenant son essor, le travail de Gould arriva à point nommé.

Le travail de réflexion qu'a accompli Gould dans le domaine de la biologie évolutive est tout à fait remarquable. Dès son premier essai, paru en 1965, il s'interrogeait : « L'uniformitarisme est-il un passage obligé ? » Ce premier travail me semble contenir en germe la suite de son œuvre et de sa guerre contre les idées reçues. Elles ont en science, la vie aussi dure que dans d'autres domaines. C'est probablement vis-à-vis des adaptationnistes purs et durs qu'il s'éleva le plus vigoureusement. Avec Richard Lewontin, son voisin au Musée de Harvard, il postula qu'à l'image des tympans des églises (si ornements soient-ils, ils ne sont d'aucune utilité pour assurer la solidité de l'édifice), de nombreux caractères ne sont d'aucune utilité pour assurer la survie des organismes et que, par conséquent, la sélection naturelle n'a joué aucun rôle pour les forger. Ce faisant, ils remettaient en cause des pans entiers d'une discipline qui venait de naître, la sociobiologie, due à Edward Wilson.

C'est avec Elizabeth Vrba, de l'Université Yale, qu'il partagea la paternité du concept d'exaptation. D'après ce concept, certains caractères qui, dans le passé évolutif d'un groupe, ont occupé des fonctions précises, ont été, par la suite, « oubliés ». Puis, dans une nouvelle phase de l'histoire du groupe, ils ont pu être réutilisés à d'autres fins. Ainsi en est-il, par exemple, des os pubiens, présents chez tous les vertébrés terrestres ovipares, absents chez les mammifères placentaires, et qui, chez les marsupiaux, sont réutilisés et maintiennent la poche marsupiale. C'est, à l'échelle de l'organisme, du « bricolage », selon l'expression de François Jacob, et il est plus fréquent qu'on ne le pense.

Encore une fois, ces positions firent naître de nombreuses polémiques. Récemment, il avait engagé avec l'auteur de l'*Horloger aveugle* et du *Gène égoïste*, Richard Dawkins, une chicane qui devenait de plus en plus acrimonieuse. Les deux

hommes n'étaient pas seulement séparés par l'Atlantique : Gould, on l'a rappelé, était un naturaliste de terrain, professeur de géologie et de paléontologie à Harvard (New England) ; Richard Dawkins est professeur à l'Université d'Oxford (Old England) et préfère fabriquer la nature dans son laboratoire où il s'adonne à une tâche bien mystérieuse, la modélisation du comportement animal. J'avoue préférer les coureurs de garrigue aux colins froids rivés à leurs écrans d'ordinateur, mais on me répliquera, évidemment, que le plus grand naturaliste, Buffon, lui aussi écrivain populaire, fréquenta surtout sa table de travail, plume d'oie à la main. La dispute ne concernait en rien le célèbre Français : Darwin, comment s'en étonner, était pris à témoin par les deux hommes ! Résumons la querelle en disant que Gould reprochait à R. Dawkins son darwinisme outrancier, le qualifiant d'hyperdarwiniste, alors que l'intéressé accepte tout juste le qualificatif d'ultradarwiniste !

EXPERT EN CONTROVERSE

Les controverses entre scientifiques sont monnaie courante, et Gould n'a pas manqué de s'adonner à ce sport de cénacle. Il en est d'autres, publiques celles-là, qu'il ne négligea pas non plus, et où il donna libre cours à son militantisme évolutionniste.

C'est ce dernier aspect de l'action de Gould que je souhaite évoquer : il montre, s'il en était besoin, qu'il fut un scientifique attentif aux maux de notre temps. Dans ce grand pays, religieux jusqu'au puritanisme, il dut, à de nombreuses reprises faire entendre la voix de la raison dans la presse, bien sûr, mais aussi devant les tribunaux. Le combat contre le créationnisme est une bataille qui dure depuis près de 80 ans, puisqu'elle a débuté en 1925. Régulièrement, dans les États du Sud des États-Unis, on propose d'enseigner, dans les écoles, les théories créationnistes, telles qu'elle sont rapportées dans la Genèse. Récemment, en plusieurs occasions, Gould a été appelé à témoigner devant diverses instances, souvent accompagné de plusieurs de ses collègues. C'est une guerre d'usure qui semble ne jamais devoir s'achever. Les différentes sectes qui s'y livrent recherchent le battage médiatique, et les moyens financiers qu'elles investissent dans ces opérations sont considérables. Chaque fois, Gould est venu témoigner, et son savoir, son autorité, son éloquence et son ironie ont fait merveille. Souhaitons que la communauté scientifique américaine lui trouve rapidement un successeur : les gardiens des temples du sectarisme ne sont hélas pas près de baisser les bras.

Il y a quelques mois, est parue une œuvre en gestation depuis 20 ans : *La structure de la théorie de l'évolution*. Il disait de cette œuvre de 1 433 pages et de plus de deux kilogrammes qu'elle était son *Opus Magnus*. Je ne doute pas qu'elle fera date et qu'elle constituera une référence pour tous les évolutionnistes qui sont, un peu grâce à lui, de plus en plus nombreux.

Jean-Louis HARTENBERGER est directeur de recherche à l'Institut des sciences de l'évolution, à l'Université de Montpellier II.

Recueils d'articles parus dans la série *This view of life, Natural History Magazine* :

La foire aux dinosaures. Réflexions d'histoire naturelle, Seuil, 1993.

Un hérisson dans la tempête, Grasset Fasquelle, 1994.

Comme les huit doigts de la main ? Réflexions d'histoire naturelle, Seuil, 1997.

Les quatre antilopes de l'apocalypse, Seuil, 2000.

Les coquillages de Léonard. Réflexions d'histoire naturelle, Seuil, 2001.

Les pierres truquées de Marrakech : avant dernières réflexions sur l'histoire naturelle, Seuil, 2002.

L'internationale fourmilière

Sur 6 000 kilomètres de côtes, de l'Italie au Portugal, une colonie géante de fourmis prospère, car ses membres sont devenus altruistes.

Dans un bocal, deux fourmis de l'espèce *Linepithema humile* s'épient. L'une provient des coteaux rocaillieux des environs de Perpignan, l'autre d'une forêt catalane, près de Barcelone. Elles se redressent et s'attaquent. La fourmi de Perpignan frotte ses mandibules dans le cou de son adversaire et... le sectionne. On introduit dans l'arène une autre adversaire, native du Portugal, à plus de 1 000 kilomètres de distance. Les fourmis s'observent, se frottent les antennes, et repartent chacune de leur côté sans se chercher querelle. Elles font partie de la même congrégation, une supercolonie, la plus grande du monde qui s'étend de Gènes à La Corogne, en passant par Marseille, Barcelone, Malaga, Lisbonne. Toutes les fourmis de cette colonie ont un comportement amical, quelle que soit la distance qui sépare leurs lieux d'origine, leur environnement, leur nourriture et leur patrimoine génétique. Une autre colonie ennemie vit en Catalogne.

Tatiana Giraud et ses collègues de l'Université Paris-Sud, à Orsay, ont testé les comportements d'agressivité des fourmis *Linepithema humile* selon leur lieu d'origine. Ils ont récolté 400 fourmis sur 20 sites, le long de la côte, et ont organisé des «rencontres». Les fourmis prélevées sur 17 sites de ce pourtour de 6 000 kilomètres ne manifestent aucun comportement d'agression.

Les biologistes ont tenté de comprendre ce qui codifie le comportement d'agressivité si manichéen des fourmis, alors

qu'elles appartiennent à la même espèce. Ils ont étudié leur matériel génétique, et ont constaté qu'il diffère entre les communautés, mais pas au-delà de la variabilité inhérente à une supercolonie.

Les fourmis d'une même supercolonie se fient-elles à des indices environnementaux pour discerner leurs «alliées»? Les biologistes ont laissé des fourmis catalanes, portugaises et françaises se reproduire en laboratoire, loin de leur environnement et des interactions existant au sein d'une fourmilière. Puis ils ont séparé les larves des parents et les ont laissé éclore dans un milieu où elles ne pouvaient apprendre aucun comportement. Une fois adultes, les fourmis développèrent les mêmes comportements d'agression ou de non-agression, en respect des lois en vigueur dans la supercolonie. Ainsi, les fourmis utilisent un autre mode de reconnaissance que les indices de l'environnement.

L'explication tient à l'histoire de l'espèce *Linepithema humile*. À l'origine, cette fourmi n'existait qu'en Argentine, où les colonies se battent, même lorsqu'elles sont éloignées de quelques mètres. Or cette espèce a été introduite en Europe, il y a quelque 80 ans. Les premières reines fondèrent des fourmilières sur les côtes de Madère, puis du Portugal. Sur leur cuticule, des molécules de reconnaissance leur permettent de s'identifier lors des contacts par les antennes. Ces molécules aidaient les fourmis d'Argentine à reconnaître leurs parents et à combattre les fourmis des autres colonies, la compétition pour les ressources alimentaires étant forte. En Europe, les fourmis ont trouvé un pays de cocagne où toute guerre était inutile, les ressources étant suffisantes et les prédateurs moins féroces. Dès lors, les fourmis dont les molécules cuticulaires ne provoquaient pas de réaction agressive furent avantagées, car elles dépensaient moins d'énergie à se battre et profitaient à loisir des richesses de cet environnement propice. Les gènes «pacifiques» furent sélectionnés et de grandes communautés se formèrent.

Bel hymne à la tolérance ! Hélas, la force de la supercolonie pourrait être aussi sa perte. Au fond des gènes, l'égoïsme veille... Au sein d'une fourmilière «normale», les ouvrières poursuivent un seul but : propager leurs gènes le plus efficacement possible dans la population. Étant donné qu'elles ne peuvent se reproduire (seule la reine peut pondre), elles sont condamnées à favoriser leurs sœurs en portant un soin particulier aux larves : les signaux chimiques assurant cette reconnaissance sont déterminants. Or, dans la supercolonie méditerranéenne, ces signaux de reconnaissance ont disparu. Pour une fourmi de cette communauté, toute larve est une sœur. Chaque ouvrière prend soin des enfants des autres comme de sa propre fratrie. Si, un jour, une mutation se produit chez une fourmi, prédisposant ses descendants à se transformer en reines plutôt qu'en ouvrières, le patrimoine génétique de la reine porteuse de la mutation va se reproduire très rapidement au détriment des autres génomes. On assistera à un appauvrissement de la diversité génétique et, simultanément, à une augmentation de la vulnérabilité (si toutes les fourmis ont le même génome, et que cette colonie devient vulnérable à un agent pathogène, toute la colonie disparaît). Une structure sociale classique, où chaque ouvrière s'occuperait égoïstement de ses sœurs, se mettrait en place. La structure hyperaltruiste de la supercolonie serait condamnée à disparaître.



Qui de la Catalane ou de la Marseillaise aura le dessus? Ces deux fourmis sont de la même espèce, mais elles appartiennent à deux colonies géantes différentes ; dans chacune d'elle règne la paix, mais les individus des deux colonies se combattent.

Les géants du Chihuahua

Deux mineurs mexicains ont découvert les plus gros cristaux du monde.



Les cristaux de sélénite, une forme transparente de gypse, découverts dans une mine de la région de Chihuahua, au Mexique sont les plus grands que l'on connaisse : ils mesurent près de 17 mètres de hauteur et environ un mètre de diamètre.

Le nom de la région du Chihuahua, au Sud du Mexique, est le plus souvent associé à l'idée de petitesse, notamment celle des chiens. Cette association n'a plus lieu d'être depuis la découverte des plus grands cristaux de gypse connus au monde.

Ces cristaux ont été découverts par les frères Eloy et Javier Delgado alors qu'ils perçaient un nouveau tunnel à 300 mètres de profondeur dans la mine de Naica. Lors de leur exploration, ils ont découvert une «salle du trésor» en pénétrant par une petite entrée dans une cavité de 10 mètres de largeur sur 20 mètres de longueur. Elle abritait des cristaux de plus de 1 mètre de diamètre et d'environ 17 mètres de hauteur. Peu après, une autre équipe de mineurs a découvert une autre salle similaire avec des cristaux en forme de dents de requins. Comment de tels cristaux ont-ils pu se former, alors que la plupart de ceux que l'on connaît tiennent dans la paume de la main ?

Selon des géologues, une chambre contenant du magma s'étendrait à trois ou quatre kilomètres sous la mine. Ces roches en fusion seraient à l'origine des différents minéraux exploités dans la mine, tels l'or, l'argent, le plomb et le zinc dont les filons parcourent la roche calcaire de la région. La chaleur régnant dans la première salle des cristaux, environ 60 °C, confirme la proximité de la poche magmatique !

Les minéraux, riches en sulfates, ont été lessivés par les eaux circulantes, lesquelles ont dissous la roche calcaire. Les sulfates et le calcium se sont alors combinés et ont cristallisé en sulfate de calcium. Ces cristaux se seraient développés pendant 30 à 100 ans. Ce sulfate de calcium est de la sélénite, du nom de Séléné, la déesse grecque de la Lune, car les cristaux découverts et notre satellite partagent la même lueur pâle. La sélénite est une forme transparente de gypse, ce minéral qui compose les roses des sables et le plâtre, quand il est broyé.

En Europe, on connaît de gros cristaux de sélénite, notamment dans la région des Apennins, en Espagne et dans le Sud de la France, mais ils ne dépassent guère deux ou trois mètres de longueur. Le précédent record était détenu par des cristaux découverts dans la même région du Chihuahua. Et les habitants de cette région pensent que des cristaux encore plus extraordinaires sont à découvrir. Cet espoir est fondé, car l'eau de la caverne aux cristaux géants a été pompée pour faciliter l'exploration, arrêtant ainsi leur croissance, alors que d'autres, encore inconnus, continuent de se développer...

La société d'exploitation de la mine prévoit d'aménager d'ici quelques mois la salle, notamment d'installer l'air conditionné, afin de recevoir des touristes.

BRÈVES

L'espérance du temps jadis

Un bébé né en France, au XXI^e siècle, vivrait-il réellement deux fois plus longtemps que ses ancêtres ? Non. En détectant un certain nombre de biais dans les estimations de l'âge de nos ancêtres, Claude Masset, de l'Université de Paris I, a montré que l'on a sous-estimé la longévité de nos ancêtres. Au XVII^e et au XVIII^e siècle, l'espérance de vie à la naissance était estimée à 25 ans, mais elle résultait d'une forte mortalité infantile : ceux qui survivaient jusqu'à 20 ans avaient encore une espérance de vie de 35 ans, c'est-à-dire qu'ils atteignaient en moyenne 55 ans. Une des causes d'erreurs tient au fait que pour évaluer l'âge du décès, on observe les sutures osseuses. Or on n'a pas tenu compte du fait que l'évolution des sutures est rapide chez l'adulte jeune, puis qu'elle ralentit avec l'âge. Une personne de 60 ans peut présenter les mêmes sutures osseuses qu'une de 30 ans, pour peu que cette dernière présente des signes de vieillesse prématurée !



L'Antarctique ne fond pas

Malgré le réchauffement climatique, la glace de l'Antarctique n'a cessé de s'étendre depuis 1980. Des océanographes américains ont mis en évidence une augmentation de sa surface totale de un pour cent tous les dix ans. Les chutes de neige ont augmenté, en raison d'une plus forte évaporation, due au réchauffement. Toutefois, l'expansion des glaces de l'Antarctique n'est pas uniforme : elle est surtout importante dans la mer de Ross. Au contraire, dans la péninsule Ouest, les glaces ont reculé. C'est dans cette région qu'un immense bloc de glace s'est récemment détaché du continent, avant de se morceler en icebergs.

Un siège pour les accouchements

Un siège utilisé lors des accouchements a été découvert dans le Sud de l'Égypte, par Joe Wagner et ses collègues, de l'Université de Pennsylvanie. Il mesure 42 centimètres sur 17, il est troué en son centre et porte des hiéroglyphes : ces derniers indiquent qu'il appartenait à Arnessent, épouse du gouverneur de la région sous le règne de Sénousret, pharaon de la XII^e dynastie (1991-1790 avant notre ère). Le siège est décoré de dessins colorés représentant une femme portant son nouveau-né, et la déesse Hathor, qui assistait les femmes en couches.

Un ruban de Möbius monocristallin

Des physiciens japonais sont parvenus à faire pousser un cristal sous la forme d'un ruban de Möbius. Le matériau de l'édifice, un composé de niobium et de sélénium, a la particularité de croître, lorsqu'il se condense, en filaments et en rubans. Les rubans ont poussé en s'enroulant autour d'une goutte de sélénium pur. Durant cette opération, certains rubans se sont tordus, puis leurs extrémités se sont rejointes, donnant une forme de ruban de Möbius à la construction. Malgré sa grande taille – une fraction de millimètre –, le ruban n'est constitué que d'un unique cristal. Cette réalisation offre une nouvelle voie pour tester les propriétés quantiques dans cette topologie si particulière d'un objet à une face.

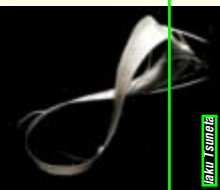


PHOTO: ISHIMIZU

Vue panoramique assyrienne

Le roi Ashur-Nasir-Pal II vivait dans la cité assyrienne de Nimrud, dans l'actuel Irak. Son palais a été découvert en 1847, lors de l'expédition de l'archéologue Henry Layard. Le site ne comportait plus que des fondations et des restes de murs incomplets. Aujourd'hui, en reconstituant les volumes du palais par des logiciels de réalité virtuelle en trois dimensions, les informaticiens de l'Université de Buffalo ont fait une découverte en se «promenant» dans les couloirs du palais. En montant sur le trône du roi, un des informaticiens a découvert un bas-relief composé de trois éléments dispersés dans la salle, mais qui, observés de cette position, formaient la même scène. Les trois éléments en sont le roi, une colonne de courtisans et les dieux protecteurs de la cité. Un exemple de l'intérêt des reconstitutions qu'utilisent les archéologues-informaticiens d'aujourd'hui.

Un nouvel acide aminé

On connaissait 21 types d'acides aminés. Des biologistes américains viennent d'en découvrir un 22^e, la pyrrolysine, dans un micro-organisme du groupe des Archées, une branche primitive des bactéries. Cet organisme qui vit à proximité des sources chaudes des fonds océaniques utilise des enzymes pour transformer les amines en méthane. En étudiant la structure tridimensionnelle d'une de ces enzymes cristallisées, les biologistes ont détecté un acide aminé différent des 21 autres. Ils ont analysé le génome de la bactérie, et découvert... une erreur vieille de 30 ans : une courte séquence que l'on croyait être un signal d'arrêt de la synthèse des protéines est, en réalité, un signal de synthèse de cette nouvelle brique constitutive. Reste à chercher si ce 22^e acide aminé existe chez d'autres organismes vivants.

Le champagne nain

À la surface des feuilles d'un cépage de Champagne, des biologistes australiens ont identifié une mutation vieille de 400 ans. Survenue par hasard, elle a apporté une note particulière à certaines cuvées.

Sur les coteaux d'Épernay, au milieu du XVII^e siècle, un moine de l'Abbaye bénédictine de Hautvilliers se pencha sur un plant de vigne à l'allure bizarre. Ses feuilles étaient couvertes de poils, et les baies avaient un aspect mat. Intrigué, il étendit la vigne par bouturage et l'ajouta peu à peu à la composition des mélanges de champagne. Aujourd'hui, le Pinot Meunier est l'un des trois cépages utilisés pour la fabrication du champagne, ce breuvage dont Talleyrand disait qu'il était le «vin de la civilisation», et l'on a élucidé ses mystères morphologiques et génétiques.

Ce moine bénédictin, qui eut l'intuition de ne pas arracher le pied de vigne suspect, ignorait de quelles mutations ses plants étaient atteints. Au printemps, des cellules indifférenciées se forment sur les bourgeons. Quand un rayon de Soleil atteint une molécule d'ADN, ou qu'une substance chimique mutagène s'y dépose, ou encore lorsqu'un virus s'y introduit, le patrimoine génétique d'une des cellules peut être modifié. Cette cellule transmet la modification à toutes ses descendantes, si bien que la vigne est pourvue de cellules ayant un patrimoine génétique donné, et d'autres cellules dotées d'un autre patrimoine génétique.

Si le moine avait laissé la vigne se reproduire par germination des graines, il aurait perdu le bénéfice de la mutation, car les graines sont produites par des cellules de l'intérieur de la plante qui ne portent pas la mutation. Au contraire, en pratiquant le bouturage, il a assuré la reproduction de la plante à l'identique, avec toutes ses hétérogénéités histologiques, c'est-à-dire avec des cellules mutées en surface des tissus végétaux et des cellules non mutées à l'intérieur.

Aujourd'hui, on dispose de méthodes qui assurent la pérennité de cette originalité, voire qui transmettent la mutation à l'ensemble des cellules de la plante. Au Centre de recherche en viticulture de Glen Osmond, en Australie, Paul Boss et Mark Thomas ont prélevé des cellules de la partie supérieure de l'épave de la vigne. À cet endroit, certaines cellules portent la

mutation, d'autres en sont exemptes, et toutes ont la faculté de donner naissance à une plante entière lorsqu'elles sont cultivées dans un milieu nutritif adéquat. Les biologistes ont ainsi fait repousser deux vignes : l'une ne possédant pas la mutation (le Pinot Noir) et l'autre portant la mutation dans toutes ses cellules.

À leur stupéfaction, ils ont constaté que la vigne dont toutes les cellules portent la «mutation-champagne» est naine, et les vrilles sont remplacées par des fleurs et par des grappes (les vrilles sont ces excroissances qui aident la plante à s'agripper aux tuteurs). En somme, il s'agit d'un plant à la fois plus robuste et plus productif. La mutation correspond exactement à celle que les agronomes ont créée artificiellement dans le blé nain cultivé massivement aujourd'hui, et dont les rendements sont deux fois supérieurs à celui du blé classique.

Aurait-on trouvé une vigne qui produit plus, tout en gardant la saveur du champagne ? Si cette découverte éclaire les mécanismes des messagers chimiques à l'œuvre dans la plante (notamment les récepteurs hormonaux qui, mutés, ne reconnaissent plus l'hormone de croissance et convertissent les vrilles en fleurs), elle n'a pas révélé tous les secrets de la saveur d'un vin. Les arômes ne sont pas dus à la productivité d'un pied. Parfois, un petit nombre de grappes assure une concentration élevée en sucres, une assimilation différente des sels minéraux, et donc une plus forte influence du terroir. On a percé quelques mystères des mécanismes qui commandent la morphologie des vignes, ceux de la saveur du champagne restent entiers.

a



b

Le cépage de Pinot Meunier est un des constituants des champagnes. Les cellules de la surface des feuilles et des baies portent une mutation. Quand la mutation est présente dans toutes les cellules, les vrilles (a), qui permettent à la vigne de s'accrocher, sont remplacées par des grappes (b) ; la vigne, plus trapue, n'a plus besoin de tuteur.

Cavaliers en terre arverne

Une fosse contenant plusieurs squelettes révèle une pratique funéraire ou rituelle encore inconnue.

Une fosse rectangulaire contenant huit cavaliers, enterrés avec leurs chevaux, a été découverte sur le site de Gondole, dans le Puy-de-Dôme. Ulysse Cabezuelo, de l'Institut national de recherches archéologiques préventives, a dirigé les fouilles, entreprises avant la construction d'une portion d'autoroute qui contournera la ville de Clermont-Ferrand par le Sud-Est.

Sur le site de Gondole, à la confluence de l'Allier et de l'Auzon, se dressait autrefois l'une des trois plus importantes places fortes des Arvernes. Les deux autres, celle de Gergovie et celle de Corent, en sont éloignées de quelques kilomètres. Les archéologues ont découvert trois fosses d'inhumation, dont une seule a été fouillée. Elle se situe à 300 mètres en dehors des remparts de terre de Gondole. Les hommes et les chevaux, alignés sur deux rangées, sont couchés sur le flanc droit, le corps orienté dans la direction Nord-Sud, la tête au Sud. Les hommes sont des adultes, dont le bras gauche repose sur le squelette qui les précède, à l'exception d'un adolescent, dont la main a été placée près du visage. Aucun objet n'accompagne les squelettes, ce qui rend difficile la datation de la tombe. Elle serait contemporaine de la place forte, occupée vers le milieu du I^{er} siècle avant notre ère. La petite taille des chevaux (1,20 mètre au garrot) semble le confirmer, car à l'époque romaine, la sélection des animaux a abouti à un allongement des membres.

Qui étaient ces hommes et pourquoi ont-ils été enterrés ensemble ? Peut-être sont-ils morts lors d'un conflit entre deux cités gauloises, ou lors des affrontements qui ont opposé Gaulois et Romains (la bataille de Gergovie ne s'est déroulée qu'à deux kilomètres). De plus, de nombreux ossements d'hommes et de chevaux avaient également été découverts sur le site au XIX^e siècle. Le nombre important de morts à enterrer expliquerait peut-être que l'on n'ait pas pris le temps de creuser une tombe pour chaque victime ni d'y déposer les armes, généralement accompagnées d'offrandes alimentaires, comme cela se pratiquait du moins pour les défunts de haut rang. Toutefois, les huit squelettes récemment découverts ne portent pas de blessures apparentes.

L'inhumation pourrait aussi relever d'une pratique rituelle. La mise en scène de Gondole n'a encore jamais été observée dans d'autres sites gaulois contemporains, notamment l'association de squelettes d'hommes et de chevaux. Toutefois, les archéologues ont récemment mis au jour, sur d'autres sites, des vestiges qui témoignent de la diversité des pratiques funéraires et rituelles gauloises. Par exemple, à Ribemont-sur-Ancre, dans la Somme, au III^e siècle avant notre ère, les restes de centaines d'individus ont subi un cycle de manipulations diverses (les corps, une fois décharnés, ont été démembrés, les os longs cassés, passés au feu et déversés dans des autels creux), tandis que d'autres ont été exposés dans un enclos sacré. D'après Jean-Louis Brunaux, qui a fouillé le site, les premiers seraient les ennemis, dont les dépouilles ont été offertes aux dieux, et les seconds seraient les guerriers morts dans le camp des vainqueurs. À Gournay-sur-Aronde, dans l'Oise, à la même époque, des armes et des animaux ont séjourné dans une fosse d'exposition au centre d'un enclos sacré, avant d'être enfouis dans les fossés de l'enclos. À Acy-Romance, dans les Ardennes, au II^e siècle avant notre ère, 19 jeunes hommes ont été enterrés roulés en boule, la tête entre les pieds, tandis que trois



Dans la fosse découverte près de Clermont-Ferrand sont associés des squelettes d'hommes et de chevaux, enterrés sans doute un peu avant notre ère.

autres ont été momifiés naturellement, puis enterrés en position assise. On évoque dans ce cas l'hypothèse de suppliciés. À Vertault, en Côte-d'Or, on a observé une grande fosse du I^{er} siècle avant notre ère, où des cadavres de chevaux et de chiens ont été exposés à plusieurs reprises. Des datations au carbone 14 devraient bientôt confirmer l'âge des squelettes de Gondole. Reste également à fouiller les deux fosses voisines. Les archéologues espèrent ainsi découvrir de nouveaux indices sur l'identité des défunts et la cause de leur mort. Ils disposent encore de quatre ans, avant que l'autoroute ne recouvre le site.

L'origine des jets galactiques

Des observations récentes montrent que les jets galactiques trouvent leur origine dans de gigantesques disques de gaz chaud gravitant autour de trous noirs supermassifs.

Les noyaux de galaxies comptent parmi les astres les plus lumineux de l'Univers. Certains d'entre eux, les quasars, sont visibles à des milliards d'années-lumière de distance. Pourtant, ces sources très énergétiques sont des objets compacts dont le diamètre ne dépasse pas quelques jours-lumière. Pour expliquer cette débauche de rayonnement à partir de systèmes aussi petits, les astrophysiciens ont imaginé que les noyaux de galaxies abritent des trous noirs gigantesques de quelques milliers à un milliard de masses solaires. Par ailleurs, la plupart de ces objets émettent d'immenses jets de gaz ionisé dans la direction de leur axe de rotation et qui peuvent atteindre un million d'années-lumière de longueur. Ces jets ainsi que le rayonnement des noyaux galactiques seraient produits par un disque de gaz et de poussière qui ceinture chaque trou noir et y déverse des tombereaux de matière. Pendant près de trois ans, une équipe internationale dirigée par Alan Marscher, de l'Institut d'astrophysique de l'Université de Boston, a surveillé la galaxie 3C120 dans plusieurs domaines de longueurs d'onde, et a confirmé cette origine commune.

Les zones boréales verdissent

Les biogéochimistes, de l'Institut Max Planck de Jena, ont montré que la masse végétale dans les régions boréales augmente. Ils ont vérifié que leurs données biologiques étaient compatibles avec les images satellitaires obtenues depuis 20 ans. Effectivement, la couverture végétale a augmenté dans les zones boréales. Aujourd'hui, le printemps s'y déclenche environ une semaine plus tôt, ce qui favorise une plus grande densité de la végétation. Cette tendance générale a toutefois été interrompue entre 1992 et 1993, après qu'une éruption du volcan philippin Pinatubo a diffusé des aérosols dans l'atmosphère, contribuant à la refroidir.

L'eau de la comète

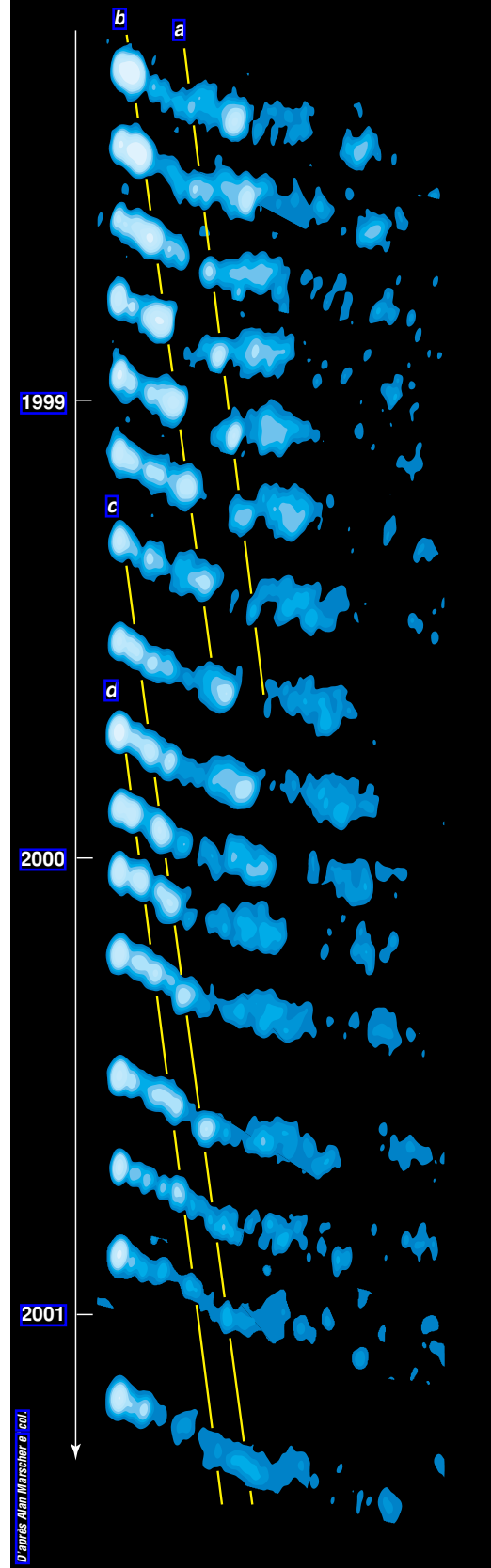
La comète Ikeya-Zhang, découverte en février 2002, est passée au plus près de la Terre le 29 avril dernier. À cette occasion, le radiotélescope de Nançay et le satellite *Odin* ont enregistré l'émission de molécules d'eau issues de la sublimation des glaces constituant le noyau cométaire. Ces molécules ne sont pas détectables de la Terre, car le signal qui les caractérise est absorbé par la vapeur de l'atmosphère terrestre. Les mesures réalisées à Nançay reposaient sur l'émission radio du radical OH (produit par photo-dissociation des molécules d'eau). Elles confirment les mesures directes réalisées par *Odin* : la comète libère 2×10^{29} molécules (soit six tonnes d'eau) par seconde. Par ailleurs, le satellite a réalisé la première mesure spectrale du rapport de l'eau constituée d'oxygène 16 (l'isotope le plus courant) et de l'eau contenant de l'oxygène 18. Le résultat préliminaire est identique à celui qui fut mesuré *in situ* par la sonde *Giotto* dans la comète de Halley, et il est très proche de celui des océans terrestres.

Rhinocéros en augmentation

En 1960, on estimait le nombre des rhinocéros noirs à quelque 100 000 individus. En 1992, la population s'était effondrée à 2 400. En 2001, le nombre total des rhinocéros blancs et noirs atteignait 15 000, environ 1 500 de plus qu'en 1999. Ainsi on constate une augmentation lente, mais régulière de ces animaux. Des mesures ont été prises, notamment en Namibie et en Afrique du Sud, pour lutter contre la contrebande. De plus, la corne de buffle sert parfois de succédané, remplaçant celle de rhinocéros, par exemple pour les objets sculptés. Toutefois, la vigilance reste de mise, car, dans certaines sous-espèces, on ne dénombre plus que quelques individus.

À l'intérieur de notre Galaxie, certains trous noirs d'origine stellaire (les restes d'une étoile morte) émettent un flux intense de rayons X et présentent des jets de gaz le long de leur axe de rotation qui sont semblables – à une échelle considérablement réduite – à ceux des quasars et des noyaux actifs de galaxies. On qualifie ces trous noirs de «microquasars». Les caractéristiques des microquasars sont assez bien expliquées dans le cadre du modèle mis au point par les astrophysiciens. Selon ce modèle, le trou noir est entouré d'un disque de gaz et de poussière qui gravite à des vitesses très élevées, de sorte que la matière y est portée à d'énormes températures et émet des rayons X. Par ailleurs, ce gaz alimente les deux jets qui s'élèvent de part et d'autre du trou noir. Les mécanismes qui produisent ces jets sont encore discutés. Il se peut que les lignes de champs magnétiques attachées au plasma en rotation rapide s'enroulent fortement autour de l'axe de rotation du système et participent à la propulsion d'une partie du gaz. On pense également que le gaz tombant dans le trou noir émet un rayonnement si intense que la pression de radiation est suffisante pour sauver de l'engloutissement une petite fraction de la matière et la propulser au-dessus des pôles. Quoiqu'il en soit, l'origine commune de la matière constituant les jets et le disque a été établie par les observations, notamment celles de Félix Mirabel et de ses collègues du Service d'astrophysique du CEA. En effet, lorsque le gaz chaud franchit l'horizon du trou noir, son rayonnement s'éteint brusquement et l'on constate une courte chute d'intensité dans le flux de rayons X émis par le microquasar. Peu après, la fraction de matière arrachée au nuage de gaz englouti et propulsée vers les pôles apparaît comme un nodule brillant s'élevant le long des jets.

Bien que les noyaux de galaxies soient des dizaines de millions de fois plus grands et plus massifs que les microquasars, les astronomes espéraient que le même modèle expliquerait leurs propriétés. Toutefois, jusqu'à récemment, aucune observation ne leur montrait ce mécanisme à l'œuvre. A. Marscher et ses collègues ont surveillé le noyau de 3C120 de mars 1998 à avril 2001 dans plusieurs longueurs d'onde du domaine des rayons X à l'aide du satellite RXTE. Le jet de 3C120 était, quant à lui, observé dans le domaine radio par l'interféromètre américain VLBA. Ils ont constaté que chacune des quatre chutes d'intensité du flux X qui se sont produites sur cette période était suivie, environ 40 jours plus tard, par l'apparition d'un nodule brillant dans le jet de plasma. Cette observation importante établit que l'analogie entre microquasars et quasars est aussi pertinente qu'on l'avait espéré.



Le jet de plasma émis par le noyau de la galaxie 3C120 a été étudié pendant trois années. Sur cette image prise dans le domaine radio, on peut suivre la progression de quatre nodules de plasma éjectés à une vitesse proche de celle de la lumière par le trou noir tapi au centre de la galaxie (a, b, c et d). L'éjection de chacun de ces nodules a été précédée d'une chute d'intensité du rayonnement X émis par le disque de gaz en orbite autour du trou noir, confirmant ainsi que c'est bien la matière de ce disque qui alimente le jet.

La sieste pour la vue

Durant la sieste, le sommeil diffère de celui de la nuit, mais il suffit à restaurer certaines facultés mentales essentielles.

Après un repas plantureux et par temps chaud, se manifeste souvent le besoin impérieux d'une sieste. Sur un canapé, dans une pièce fraîche, on goûte alors la félicité d'une sieste réparatrice. Que se passe-t-il dans notre cerveau ?

Dans les premières minutes qui suivent l'assoupissement, un premier type de sommeil prend place : le sommeil à ondes lentes. Des ondes électriques de basse fréquence envahissent le cerveau. Jusqu'à présent, on pensait que ce sommeil à ondes lentes de la sieste se limitait à détendre les muscles et à stabiliser l'activité métabolique. S. Mednick et ses collègues de l'Université Harvard, à Boston, ont voulu étudier plus précisément les vertus de la sieste. Ils en ont examiné les conséquences sur les capacités d'attention au fil d'une journée. Ils ont soumis 130 étudiants de l'Université à un test cognitif. Ces derniers devaient observer un écran où étaient projetées, au centre, pendant 16 millisecondes, une lettre *L* ou *T* ; puis l'écran restait vide pendant une durée variable ; enfin des barres horizontales ou verticales apparaissaient pendant 16 millisecondes dans le coin inférieur gauche de l'écran.

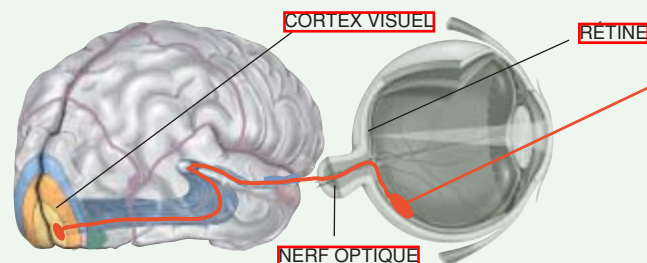
Après chaque projection, les étudiants doivent annoncer quelle lettre ils ont vue, puis si les barres étaient horizontales ou verticales. Ce test est une bonne mesure de l'état de concentration visuelle. Dans la première séance du matin, les personnes testées peuvent percevoir des informations séparées par un temps court, inférieur à 10 millisecondes. À 11 heures, des informations séparées par moins de 20 millisecondes ne sont pas analysées, et le soir... 40 millisecondes sont nécessaires. Quand ces personnes font une courte sieste, le temps de discrimination s'améliore notablement pour se rapprocher de celui du début de la matinée, et une sieste de une heure restaure un temps de perception de 10 millisecondes. L'essentiel de la récupération se fait au cours de la première demi-heure.

Le sommeil des étudiants a été analysé au moyen d'électrodes appliquées à la surface du crâne. Les mesures montrent que le sommeil à ondes lentes dure plus longtemps quand la sieste a lieu après une période de concentration visuelle. Au contraire, lors d'une sieste durant les congés, la durée du sommeil à ondes lentes est courte. Ainsi, le sommeil à ondes lentes est d'autant plus efficace que les tâches matinales ont stimulé les capacités d'attention. Il aurait peu d'effets sur la fatigue générale de l'organisme. Les biologistes sont même arrivés à une conclusion inverse : ce sont précisément les petits groupes de neurones, qui ont été sollicités lors d'une tâche d'attention visuelle, qui récupèrent le plus vite de leur fatigue.

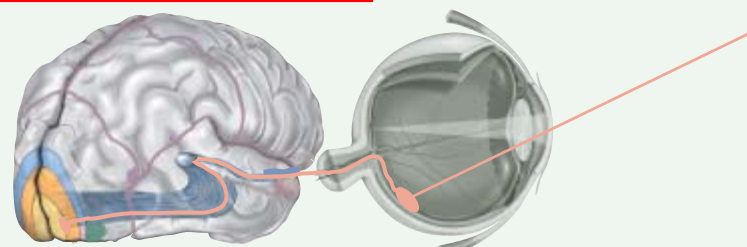
Cette notion est illustrée par une expérience très simple : lors de la dernière séance de travail, à sept heures du soir, on fait apparaître les barres horizontales, non plus dans le coin inférieur gauche de l'écran, mais dans le coin supérieur droit. Ce sont alors d'autres neurones, partant d'un autre endroit de la rétine et se projetant dans une autre zone du cerveau, qui sont mis en action. Ces neurones sont prêts pour l'exercice, même à la fin de la journée. Leur niveau de performance est identique à celui des neurones stimulés le matin. On en conclut que de petites groupes de neurones de travail sont « épuisés » par les exercices répétitifs, et ce sont ces assemblées de neurones que la sieste restaure. Cette étude a livré d'autres résultats surprenants : bien que le sommeil à ondes

lentes prédomine, on constate, chez certains sujets, l'apparition de rêves et, par conséquent, des périodes de sommeil dit paradoxal, durant les siestes courtes. Comment interpréter ce fait, et quel rôle attribuer à chaque type de sommeil ? Le sommeil entraîne des modifications physiologiques dans le cerveau, lesquelles influent à leur tour sur le psychisme. Le « repos » est la résultante de mécanismes cellulaires complexes : des hormones de croissance sont libérées pendant le sommeil, et incitent les cellules à produire des peptides réalisant un renouvellement des tissus. Cette régénération cellulaire et tissulaire se mettrait en place quand le besoin s'en fait sentir. Doit-on en conclure que l'on ne doit pas résister à la fatigue et à l'appel de la sieste ?

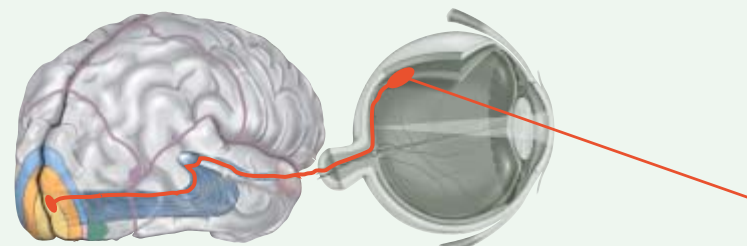
a : PERCEPTION VISUELLE NORMALE
(vers le haut)



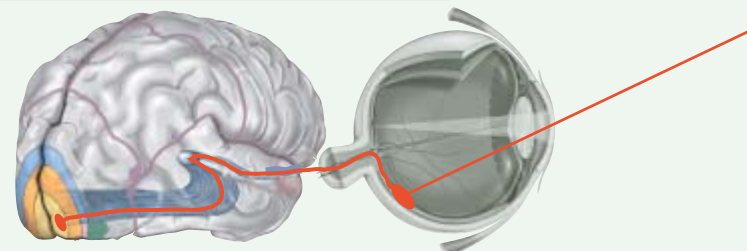
b : PERCEPTION VISUELLE DÉCLINANTE
(vers le haut)



c : RÉACTIVATION DE LA PERCEPTION VISUELLE
(par modification de la direction d'observation)



d : RÉACTIVATION DE LA PERCEPTION VISUELLE
(par la sieste)



Quand on fixe trop longtemps un même point, les mêmes voies nerveuses, de la rétine au cerveau, sont activées de façon répétitive (a), et la perception visuelle faiblit (b). On peut éviter cette fatigue en observant un autre point : l'image se projette alors en un autre endroit de la rétine et de nouvelles voies neuronales sont activées (c). On peut aussi... faire une sieste. Le sommeil permet aux neurones suractivés de « se reposer » : les performances sont restaurées (d).

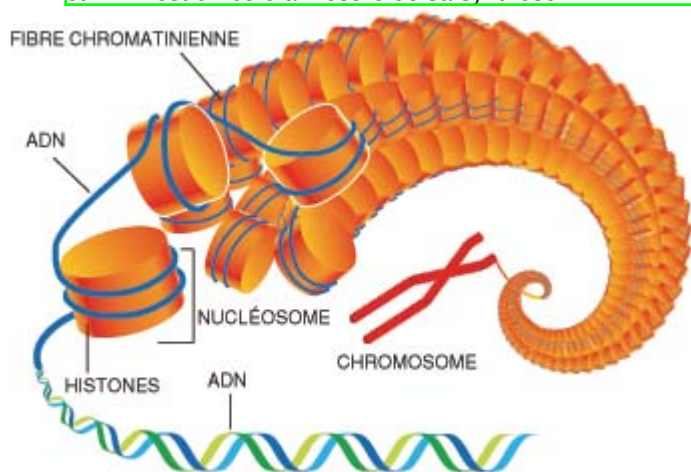
Le déroulement de l'enroulement

On a découvert une protéine qui participe à une voie inédite de l'enroulement de l'ADN dans le noyau des cellules.

Nous sommes composés d'environ 100 000 milliards de cellules et chacune contient dans son noyau un mètre d'ADN, une longue molécule qui porte les gènes : notre organisme contient ainsi 100 milliards de kilomètres d'ADN, soit l'équivalent de 600 fois la distance de la Terre au Soleil ! Ces longs filaments sont enroulés dans le noyau en chromatine. Outre la diminution de l'encombrement, cette structure confère à la cellule un moyen de contrôler l'expression des gènes, d'une part, en les laissant, ou non, accessibles aux facteurs de transcription, d'autre part, en rapprochant des séquences normalement éloignées. De nombreuses protéines, telles les histones, qui sont les protéines les plus abondantes du noyau, participent à l'enroulement de l'ADN en chromatine et l'on connaissait un unique mécanisme de cet assemblage. L'équipe de Geneviève Almouzni, de l'Institut Curie, a mis au jour une nouvelle voie d'enroulement indépendante de la précédente.

Déplions la chromatine. Le brin d'ADN s'enroule deux fois autour d'un complexe protéique composé en majorité d'histones et forme ainsi un nucléosome. Les nucléosomes se succèdent et constituent une sorte de collier de perles qui est replié à son tour en une spirale compacte nommée fibre chromatinienne. Quand la cellule se divise, ces fibres s'enroulent encore et forment les chromosomes.

Le premier mécanisme d'enroulement connu a lieu au moment de la réplication de l'ADN ou quand celui-ci est réparé, c'est-à-dire pendant deux événements où de l'ADN est synthétisé. Une protéine torique, nommée PCNA, glisse le long de l'ADN de la même façon qu'un anneau coulisse le long d'une tringle. Stoppée à l'extrémité du brin d'ADN en cours de synthèse, PCNA se lie à la protéine CAF1 associée au préalable à des histones. L'ADN s'enroule alors autour de ces dernières avant que les protéines CAF1 et PCNA, qui jouent le rôle de guide, ne soient libérées. Le mécanisme se répète et l'ADN est enroulé à mesure de sa synthèse.



Dans le noyau d'une cellule, la longue molécule d'ADN est agencée selon une organisation complexe. D'abord, elle s'enroule deux fois autour d'un groupe de protéines nommées histones : cette association est un nucléosome. Les nucléosomes forment une sorte de « collier de perles » qui s'enroule à son tour en une spirale nommée fibre chromatinienne. Enfin, pendant certaines phases de la vie cellulaire, cette fibre se condense encore pour constituer un chromosome.

Les biologistes ont identifié une nouvelle protéine, nommée HIRA, dont on connaissait l'affinité pour les histones sans autre précision. Dans une première étape, ils ont montré que la protéine HIRA, en présence d'histones et d'un fragment d'ADN, favorise *in vitro* la formation de nucléosomes. Ensuite, ils ont étudié l'apparition des nucléosomes dans un œuf de xénope, une grenouille d'Afrique du Sud : en l'absence de la protéine HIRA, seul l'ADN nouvellement synthétisé s'assemble en nucléosomes (fonction assurée par CAF1 et PCNA). Ainsi, cette protéine participe à l'enroulement de l'ADN selon une voie différente de celle où interviennent les protéines CAF1 et PCNA. La protéine HIRA résulterait de la fusion de deux protéines, HIR1 et HIR2, qui, chez la levure, influent sur la synthèse d'histones avec lesquelles elles interagissent. Ainsi, au moins deux mécanismes d'enroulement coexistent dans les cellules.

La ligne mentale des nombres

Dans notre esprit, les nombres sont disposés le long d'une ligne qui va de la gauche vers la droite.

Nous pensons tous comme Einstein. Interrogé sur la façon dont il raisonnait, le père de la relativité répondait que les mots ne jouaient aucun rôle dans ses pensées, au contraire de certaines images plus ou moins claires qui semblaient matérialiser des concepts. De même, de nombreux mathématiciens déclarent utiliser des représentations spatiales, en particulier pour les nombres, qu'ils se représentent non pas comme des êtres abstraits, mais comme des points de l'espace. Selon une étude de psychologues italiens, cette méthode n'est pas propre aux mathématiciens : même si nous n'en avons pas conscience, nous pensons les nombres en termes de points ordonnés sur une ligne droite.

Plusieurs indices suggèrent que nous utilisons des représentations spatiales pour les nombres. Notamment, lorsqu'on demande à un individu de lever la main gauche ou la main droite selon qu'un nombre est pair ou impair, il réagit plus rapidement de la main gauche pour les petits nombres (de 1 à 6), et de la main droite pour les plus grands. Ainsi, les petits nombres sont plus accessibles à la partie droite du cerveau, qui gouverne le circuit moteur gauche, et inversement pour les grands nombres. Comme si les nombres étaient disposés sur une ligne, devant nous (les petits nombres étant à gauche et les grands à droite), et que nous devions les saisir physiquement pour les manipuler mentalement.

Y a-t-il une part de vérité dans cette image ? Pour y répondre, Marco Zorzi et ses collègues du Département de psychologie générale de l'Université de Padoue ont travaillé avec des malades atteints d'héminégligence, une déficience de la perception gauche-droite due à une lésion d'un des hémisphères du cerveau. Les individus souffrant d'héminégligence privilégient l'un des côtés des personnes ou des objets qu'ils rencontrent, et négligent l'autre : ils ne se rasent qu'un côté du visage, n'habillent qu'une partie de leur corps... Quand on leur demande de trouver le milieu d'un segment, ils le placent trop à gauche ou trop à droite.

Les psychologues italiens ont soumis les malades à l'analogue mental de cette dernière expérience. Ils leur ont demandé de déterminer la valeur centrale d'intervalles : 2 pour l'intervalle 1-3, 3 pour 1-5, etc. Alors que des sujets sains répondent convenablement dans tous les cas, les malades trou-



vent toujours des valeurs décalées par rapport au milieu : inférieures pour les intervalles courts (par exemple, 2 pour l'intervalle 1-5), et supérieures pour les longs intervalles. En fait, le résultat est d'autant plus décalé vers les grands nombres que l'intervalle est grand.

Ainsi, les patients atteints d'hémiparésie ne trouvent pas la juste valeur centrale, car leur système de repérage gauche-droite est défectueux. Il existe bien une autre maladie, l'acalculie pariétale, qui entrave elle aussi la localisation du milieu d'un segment, mais les patients qui en sont atteints éprouvent des difficultés à calculer, ce qui n'est pas le cas des patients hémiparésiques.

Cette étude prouverait que nous nous représentons inconsciemment les nombres sur une ligne orientée de la gauche vers la droite. Selon les psychologues, en utilisant consciemment ce mode de pensée, on exploiterait pleinement les capacités du cerveau en matière de calcul. C'est peut-être en procédant ainsi que certains mathématiciens jonglent si bien avec les nombres.

L'invention de la pierre taillée

Les éclats de pierre produits par les chimpanzés ressemblent à ceux des premiers hominidés.

Les chimpanzés sont les seuls animaux, avec l'homme, à utiliser des outils divers de façon régulière. Dans la forêt africaine, ils se servent de 42 types d'outils pour casser des noix, creuser le sol, aller à la pêche aux termites, chasser les mouches... On étudie leur comportement pour essayer de reconstituer comment nos ancêtres ont inventé leurs premiers outils. Deux archéologues de l'Université Georges Washington, aux États-Unis, et le primatologue Christophe Boesch, de l'Institut Max Planck d'anthropologie évolutive, en Allemagne, sont allés plus loin dans cette démarche : ils ont fouillé un «site archéologique», qui avait été occupé par des chimpanzés pendant plusieurs années. Puis, ils ont comparé les vestiges exhumés à ceux issus de sites archéologiques occupés par des australopithèques, il y a 2,5 millions d'années.

Le site fouillé se trouve dans le Parc national de Taï, en Côte d'Ivoire. Il est au cœur de la forêt tropicale, à l'intérieur de l'un des méandres d'une petite rivière. Là, les chimpanzés cassaient une espèce de noix très dure, nommée *Panda oleosa*. En 1996, à la mort de l'arbre qui fournissait les noix, les chimpanzés ont abandonné le site, mais Ch. Boesch les y avait observés depuis 1975. Les chimpanzés utilisent les racines des arbres comme enclumes et des pierres de 3 à 15 kilogrammes (du granite, de la latérite, de la diorite, du quartz, du feldspath) comme marteau. Ils les ramassent aux alentours, à deux kilomètres à la ronde, puis les rapportent sur leur «lieu de travail». Un chimpanzé casse jusqu'à 100 noix par jour de février à août, et un jeune met sept ans à apprendre cette technique.

Les archéologues ont mis au jour six enclumes, 40 kilogrammes de coquilles de noix et quatre kilogrammes d'éclats de pierre, qui se sont détachés des «marteaux» lithiques lors de leur utilisation répétée. Ils ont comparé ces éclats obtenus par hasard aux pierres intentionnellement taillées par les australopithèques, dans des sites de la Vallée de l'Olduvai, en Tanzanie : ces deux groupes se caractérisent par une gamme de tailles et de paramètres morphologiques similaires. Les différentes sortes d'éclats, classés selon la typologie établie

sur des sites archéologiques classiques, sont présentes en proportions similaires, ainsi que les pierres plates ; la densité des éclats par mètre carré et les dimensions des amas de pierre sont voisines. On en déduit que certains sites archéologiques de l'Olduvai auraient été des sites de cassage de noix. Les australopithèques auraient d'abord utilisé comme outils des éclats de pierre produits accidentellement, puis ils auraient essayé de les reproduire intentionnellement.

Ainsi, les activités des chimpanzés laissent des traces archéologiques détectables, qui devraient permettre d'étudier le développement de la culture des chimpanzés et des hominidés et de répondre à plusieurs questions encore ouvertes : le comportement lié au cassage des noix est-il ancien ? Les chimpanzés et les humains ont-ils hérité d'une culture commune dans ce domaine ou bien l'ont-ils acquise séparément ? Les chimpanzés sont-ils sur le point de tailler leurs premières pierres ?



Dans la forêt de Taï, en Côte d'Ivoire, les chimpanzés cassent des noix (*Panda Oleosa*) avec des pierres.

L'énergie de l'air

Les manchots utilisent l'air de leur système respiratoire et celui que contient leur plumage pour améliorer leur flottaison et leurs performances en plongée.

Friands de poissons, les manchots royaux plongent jusqu'à 300 mètres de profondeur pour capturer leurs proies. Longtemps inaccessibles, les poudres sous-marines de ces oiseaux sont depuis peu révélées par des appareils enregistreurs miniatures fixés sur ces animaux et qui transmettent des informations sur leur profondeur, leur vitesse ou leurs accélérations. Par exemple, on a récemment découvert qu'en plongée, la température corporelle des manchots royaux diminue dans les organes qui ne sont pas sollicités par la locomotion : ils restent en apnée huit minutes alors que le volume de leurs poumons n'autorise, en théorie, que quatre minutes. L'équipe d'Yvon Le Maho, du Centre d'écologie et de physiologie énergétiques de Strasbourg, en collaboration avec celle de Katsufumi Sato, de l'Institut polaire japonais, a utilisé de tels appareils pour mettre en évidence le déroulement des plongées et pour révéler le rôle de l'air emprisonné dans les poumons et dans le plumage.

Les manchots descendent vers les profondeurs à une vitesse de deux mètres par seconde en battant vigoureusement des ailerons. Ils doivent lutter contre la poussée d'Archimède qui tend à les faire remonter en surface : l'air emmagasiné augmente leur flottaison. À mesure de la descente, la pression de l'eau environnante augmente : le volume de l'air emprisonné diminue, augmentant la densité de l'animal jusqu'à ce que la poussée d'Archimède soit compensée. Au-dessous d'un certain palier, la descente continue passivement sans battement d'ailerons. Les battements ne reprennent qu'au moment de la chasse quand les manchots poursuivent leurs proies.

La chasse terminée ou bien l'oxygène épuisé, les manchots remontent vers la surface. La première partie de cette remontée nécessite des battements pour rejoindre la profondeur où la poussée d'Archimède est suffisante pour qu'ils remontent sans effort, soit environ -135 mètres pour les manchots royaux et -73 mètres pour les manchots Adélie. Au-dessus de cette profondeur critique, l'air qui est resté dans leurs poumons ou qui est emprisonné dans les plumes les aide à remonter sans qu'ils aient à mouvoir leurs ailerons. Si la première partie de la remontée est verticale, la seconde partie de l'ascension – passive – est inclinée, et ils remontent plus len-



Les manchots adaptent leur flottaison grâce à l'air présent dans leurs poumons et à celui qui est emprisonné dans leur plumage (on voit ici des bulles d'air s'échapper du plumage).

tement qu'au début. Ce comportement éviterait les accidents de décompression, qui peuvent se produire quand les plongées sont rapprochées, comme cela a lieu, par exemple, chez les pêcheurs de perles qui plongent en apnée.

Les biologistes ont calculé que, chez les manchots royaux et chez les manchots Adélie, l'air enfermé dans le système respiratoire ou sous le plumage favorise la remontée passive et économise l'énergie des animaux qui, ainsi, peuvent rester plus longtemps immergés que s'ils devaient consommer de l'énergie pour la remontée. Les appareils enregistreurs ont révélé que plus les oiseaux plongent profondément, plus la remontée passive commence tôt (les battements d'ailerons s'arrêtent tôt lors de la remontée) : on peut en déduire qu'ils adaptent la profondeur de leur plongée à la quantité d'air emmagasiné et qui servira à la remontée passive. Ces observations indiquent que les manchots adaptent leur flottaison aux performances requises, c'est-à-dire à la durée et à la profondeur de la plongée en apnée.

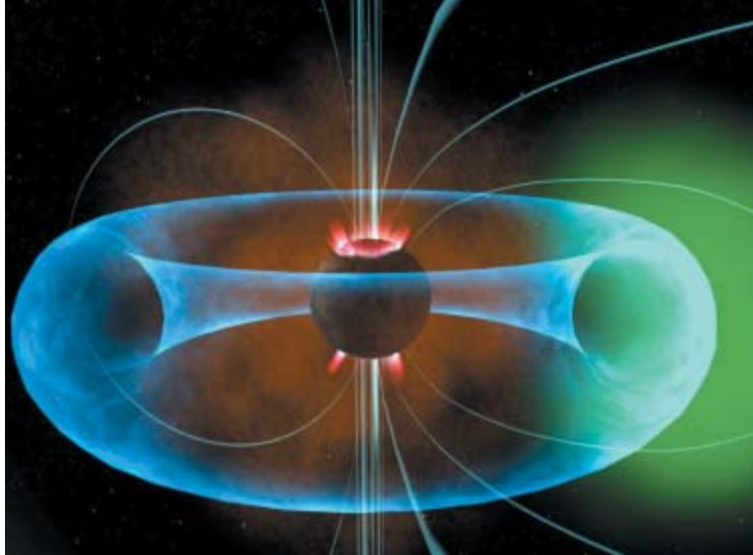
Oxygène en orbite

Un satellite d'observation de la magnétosphère a révélé qu'un immense nuage d'atomes ionisés entoure la Terre lors des orages magnétiques.

A chaque tempête solaire, le Soleil pare la chevelure magnétique de la Terre d'une couronne d'oxygène. Le satellite IMAGE, lancé il y a deux ans par la NASA afin d'étudier la magnétosphère terrestre, a été témoin du phénomène et a pris la première photographie complète de cette couronne. L'ampleur du phénomène – la couronne entoure toute la planète – confirme le rôle de l'atmosphère terrestre dans les orages magnétiques.

Les atomes d'oxygène concernés, qui proviennent de la plus haute couche de l'atmosphère, l'ionosphère, sont en quelque sorte expulsés de l'atmosphère par le vent solaire, ce flux permanent de particules venant du Soleil et constitué essentiellement d'électrons, de protons et d'atomes d'hélium ionisés. À proximité de la Terre, le vent solaire est dévié par le champ magnétique terrestre et circule en spirale autour des lignes de champ. Quand il pénètre dans l'ionosphère, ce courant de particules chauffe l'atmosphère. Lors d'une tempête solaire, le vent solaire est brusquement plus dense ou plus rapide. L'échauffement est alors si important que des atomes d'oxygène de l'ionosphère sont éjectés dans l'espace.

Une fois éjectés de l'ionosphère, les atomes d'oxygène ne sont plus excités par le courant de particules et n'émettent pas de lumière. Comment peut-on alors les détecter ? Les précédentes sondes embarquées à bord de satellites les récoltaient sur leur passage. Le satellite IMAGE a pu observer le phénomène dans sa globalité en détectant les atomes d'oxygène après leur interaction avec le peu d'atmosphère neutre présente à cette altitude. Dans l'ionosphère, les atomes d'oxygène sont présents sous forme d'ions O^+ . Après leur éjection due au chauffage, ils rencontrent des atomes neutres de l'atmosphère ou des ions du vent solaire. Quand les ions oxygène captent un électron, ils se neutralisent et sont, dès lors, insensibles au champ magnétique terrestre : ils suivent une trajectoire rectiligne. Un satellite rencontre ainsi des atomes neutres d'oxygène qui proviennent de toutes les régions emplies par les ions originaires de l'ionosphère. En analysant les trajectoires des atomes recueillis par IMAGE, les physiciens ont trouvé la région dont ils proviennent et ont cartographié la répartition des atomes : comme le



Modélisation, dans la haute atmosphère, des conséquences d'un soufresaut du vent solaire. Le vent solaire, qui s'enroule autour de la Terre, chauffe l'ionosphère au point que des atomes d'oxygène en sont éjectés (la couronne en bleu). Ces atomes diffusent ensuite autour de la planète (en rouge) et font un aller et retour (en vert) en suivant les lignes de champ magnétique (en blanc).

vent solaire, les atomes ionisés suivent les lignes de champ magnétique, c'est-à-dire qu'ils remontent vers le pôle, puis basculent de l'autre côté de la Terre, là où les lignes de champ sont étirées sous la pression du vent solaire. Puis ils suivent la partie extérieure de la queue de la magnétosphère et retournent vers la Terre dans le plan équatorial où le champ magnétique est, lors de tempêtes solaires, nul. Ils pénètrent ensuite dans l'atmosphère par les pôles, où ils participent, en excitant les atomes environnants, aux aurores boréales.

Près de la moitié de l'énergie du vent solaire est ainsi dissipée dans l'ionosphère. Or les tempêtes solaires entraînent de brusques variations du champ magnétique terrestre qui, par phénomène d'induction, créent des courants électriques dans les conduits métalliques, provoquant notamment la corrosion des pipelines. Dans l'espace, le flux de particules auquel elles sont associées est dangereux pour les astronautes. IMAGE a montré que les atomes d'oxygène de l'ionosphère jouent un rôle important dans ces phénomènes. La carte dressée par le satellite aidera à mieux les étudier afin de s'en prémunir. La météorologie de l'environnement terrestre vient de prendre une bouffée d'oxygène.

L'algue du ginkgo

La première algue vivant en symbiose avec un végétal supérieur a été découverte : elle a choisi le plus ancien d'entre eux, le *Ginkgo biloba*.

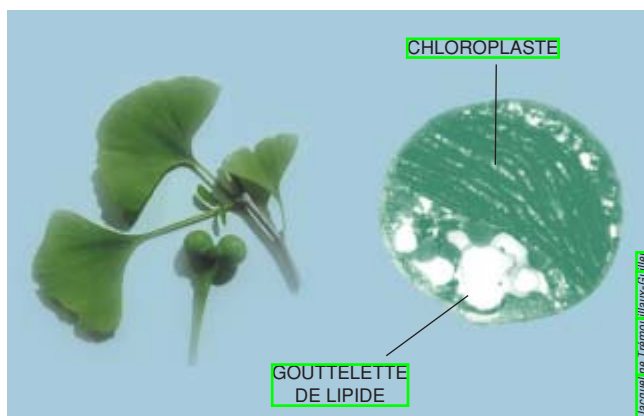
Le *Ginkgo biloba*, fossile végétal vivant, est le seul survivant de l'ordre des *ginkgoales* qui a atteint son apogée à la fin du Jurassique et au début du Crétacé, il y a quelque 200 à 150 millions d'années. Cet arbre, contemporain des dinosaures, intrigue les botanistes. Ses feuilles bilobées sont en éventail, vestige de son lointain passé. Ses gamètes mâles sont mobiles et attestent d'un mode de reproduction en environnement aqueux, proche de celui des fougères. Il est très résistant aux insectes, à la pollution atmosphérique ou encore aux rayonnements ionisants : à Hiroshima, un ginkgo a résisté à la déflagration du 6 août 1945. Enfin, il dispose d'une exceptionnelle longévité : le plus vieux a 3 000 ans et se trouve au Temple Dinlinsi dans la province de Shandong, en Chine. Qui plus est, Jocelyne Trémouillaux-Guiller (UPRES-EA 2106) à l'Université François Rabelais de Tours, a découvert, dans des cellules de ginkgo, une algue unicellulaire qui vit en symbiose avec son hôte.

Dans le monde végétal, les symbioses sont fréquentes : par exemple, le lichen résulte de l'association d'une algue et d'un champignon. Par ailleurs, *Ginkgo biloba* est connu pour héberger dans ses racines des champignons parasites ou symbiotiques. Cependant, pour la première fois, une algue a été identifiée à l'intérieur des cellules d'un végétal supérieur.

Dans un premier temps, l'examen au microscope électronique de cellules cultivées a révélé que cette algue, d'une taille de trois à cinq micromètres, a un noyau : elle est eucaryote. Ultérieurement, à l'aide d'une autre culture cellulaire de *Ginkgo biloba*, les biologistes ont mis en évidence l'intense prolifération de l'algue à l'intérieur des cellules en voie de nécrose. À mesure de la multiplication de l'algue, les cellules de ginkgo enflent, puis se rompent et libèrent leur contenu d'algues dans le milieu extérieur. La prolifération de l'algue est ainsi liée à la mort des cellules hôtes. On ignore encore le mécanisme qui déclenche la multiplication intense de l'algue. Cultivées en milieu liquide, ces algues sont devenues autonomes et ne nécessitent qu'une source lumineuse pour subsister.

Après avoir découvert la présence de l'algue dans des cultures de cellules de *Ginkgo biloba*, on a détecté l'algue à l'intérieur d'une cellule vivante de ginkgo. Il s'agissait d'une forme mature et de formes immatures. L'algue réside en permanence dans les cellules de son hôte, vraisemblablement sous sa forme la plus immature. Elle n'a alors aucune activité photosynthétique. De plus, étant donné les difficultés que l'on a pour la démasquer, elle n'est sans doute pas présente dans tous les arbres, ni dans toutes les parties de la plante ni dans tous les types cellulaires d'une même zone.

L'étape suivante a consisté à identifier cette algue verte par l'analyse des ARN ribosomiaux. Ainsi, l'endosymbiote appartient à la classe des *Trébouxiphytes*, dont plusieurs membres sont connus pour être des symbiotes d'invertébrés ou de champignons, par exemple. Les analyses moléculaires indiquent une étroite relation phylogénique de l'algue verte découverte avec *Coccomyxa*, une algue unicellulaire présente dans certains lichens. L'association de cette algue avec *Ginkgo biloba* est un nouveau type d'interaction de deux plantes.



Les cellules du *Ginkgo biloba* (à gauche) hébergent des algues vertes de la famille de *Coccomyxa*. Quand on l'observe au microscope électronique à transmission (à droite), on constate que cette algue (environ trois micromètres de diamètre) contient, dans son cytoplasme, un volumineux chloroplaste (vert plus foncé) et de nombreuses gouttelettes lipidiques (en blanc).

La sixième désintégration

La découverte d'une sixième forme de radioactivité contribue à l'amélioration de la théorie des noyaux.

Jusqu'à présent, on connaissait cinq formes de radioactivité : la fission (un noyau se partage en deux « sous-noyaux »), la désintégration alpha (un noyau libère une particule alpha, c'est-à-dire un noyau d'hélium), la désintégration bêta (un noyau libère un électron), la radioactivité gamma (un noyau libère un photon gamma) et la désintégration à un proton, découverte au début des années 1980. Ce dernier type correspond au cas d'un noyau instable parce qu'il contient trop de protons ; en émettant un proton, il se transforme en un noyau léger plus stable. Au Grand accélérateur d'ions lourds de Caen, le GANIL, et au Centre de recherche sur les ions lourds de Darmstadt, deux équipes de physiciens viennent de mettre en évidence la désintégration à deux protons. Les deux groupes ont observé l'émission simultanée des deux particules par un noyau instable de fer 45. Ils ajoutent ainsi une forme de radioactivité aux cinq déjà connues.

Les physiciens avaient prédit que ce noyau, qui contient 26 protons et 19 neutrons, devait se désintégrer en libérant deux protons en même temps. Ils ont d'abord exclu le mécanisme qui aurait été la succession de deux désintégrations à un proton, phénomène qui pourrait se confondre avec une désintégration à deux protons. Si un tel scénario en cascade se produisait, le fer 45 deviendrait d'abord du manganèse 44, qui, cédant à son tour un proton, se transformerait en chrome 43. Or, le manganèse 44, trop massif, ne peut être produit à partir du fer 45. Aussi, les physiciens ont-ils tenté d'observer la désintégration du fer 45 en sachant que s'ils détectaient un phénomène, il s'agirait de la désintégration à deux protons.

Pour produire le fer 45, l'équipe du GANIL dirigée par Bertram Blank (IN2P3) a bombardé trois jours durant une cible avec 10^{12} noyaux de nickel 58 par seconde, obtenant ainsi environ un noyau de fer 45 toutes les deux heures... Dirigés vers un détecteur où ils se sont incrustés dans un cristal de silicium, ils y ont « vécus » environ deux millisecondes avant de se désintégrer. Cette durée de vie, si petite soit-elle à notre échelle, suffit à l'observation de l'arrivée du fer 45, puis de sa transformation en chrome 43, laquelle est accompagnée de l'émission de deux protons. Parmi la vingtaine de noyaux créés, seuls 12 ont conduit à des désintégrations « observables ». Ces 12 événements confirment l'existence d'un mode de désintégration qui n'avait pas encore été détecté. Par une méthode indépendante, les physiciens allemands sont arrivés aux mêmes conclusions.

Selon les physiciens, il est vraisemblable que cette nouvelle forme de radioactivité n'aura pas d'application. En revanche, sa

découverte est d'une grande importance pour notre compréhension des phénomènes qui se déroulent dans le noyau. Beaucoup de modèles décrivent la physique du noyau, notamment le modèle en couches (les nucléons sont situés sur des niveaux d'énergies successifs comme l'électron autour de l'atome) ; ils s'appliquent bien aux noyaux stables, situés dans ce que l'on nomme la « vallée de stabilité ». En dehors de cette vallée, le modèle des bosons interagissants suppose que les protons (des fermions) s'associent par paires pour former des pseudoparticules bosoniques (les autres restent disposés sur des couches). Puisque ces paires constituent des bosons, elles peuvent se trouver à plusieurs dans un état physique de même énergie, où elles interagissent. Ainsi, grâce à la formation de paires de protons, le noyau serait stabilisé pour un coût énergétique faible. Dès la découverte de la désintégration à deux protons, les physiciens se sont demandé si les quantités de mouvement des deux protons émis étaient corrélées. Si c'est le cas, cela indiquerait que c'est bien une paire bosonique qui est émise au cours de la désintégration à deux protons, ce qui confirmerait l'existence de telles paires au sein des noyaux et, par là-même, l'intérêt du modèle de bosons interagissants.

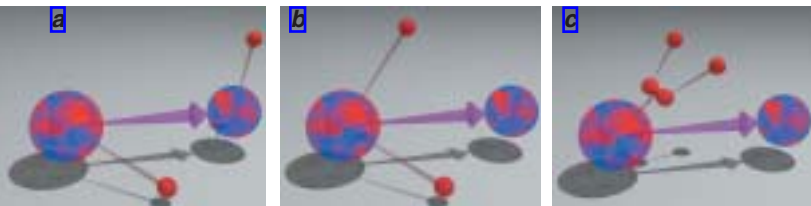
L'hormone du fer

On a découvert l'hormone qui contrôle la quantité de fer dans l'organisme.

La quantité de glucose circulant dans notre sang est maintenue constante, à environ un gramme par litre. Cet équilibre résulte de l'action conjuguée, mais antagoniste, de deux hormones : l'insuline, qui diminue la concentration sanguine en glucose, et le glucagon, qui l'augmente. Cette homéostasie est vitale pour l'organisme et de nombreux éléments font l'objet d'un contrôle aussi rigoureux. C'est le cas du fer, indispensable aux cellules pour certaines réactions enzymatiques et, surtout, pour l'élaboration de l'hémoglobine, une protéine qui transporte l'oxygène dans les globules rouges. L'équipe d'Axel Kahn et de Sophie Vaulont, de l'Institut Cochin à Paris, a identifié l'hormone qui participe à la régulation de la concentration en fer de l'organisme.

L'histoire de cette découverte doit beaucoup au hasard et commence par l'étude du gène *usf2* codant un facteur de transcription (une molécule qui favorise ou, à l'inverse, diminue l'expression des gènes), que l'on supposait spécifique du métabolisme des sucres. Le pancréas et le foie des souris dont ce gène est muté par génie génétique sont marron et attestent ainsi d'une quantité anormalement élevée de fer dans ces organes. Or ces signes cliniques sont aussi ceux de l'hémochromatose, une maladie génétique qui touche 1 Européen sur 300. Ces malades présentent une surcharge en fer, qui cause la dégénérescence de nombreux tissus. L'origine de cette maladie est, dans 80 pour cent des cas, due à une mutation du gène *Hfe-1* qui participe au contrôle de l'absorption intestinale du fer.

Une première hypothèse s'imposait. Outre le métabolisme du glucose, le facteur de transcription *usf2* participe-t-il aussi au métabolisme du fer ? Pour répondre à cette question, les biologistes ont comparé l'expression de divers gènes chez des souris mutées et normales. Ils ont ainsi identifié un gène dont l'expression est très perturbée chez les souris mutantes. Il s'agit du gène codant l'hepcidine, un peptide de 25 acides aminés sécrété par les cellules du foie et connu pour ses propriétés antibactériennes. Or des biologistes, du



L'émission de deux protons par un noyau est possible selon trois mécanismes : deux émissions successives de un proton (a), l'émission simultanée de deux protons indépendants l'un de l'autre (b) ou l'émission d'une paire de protons liés entre eux (c). Le fer 45 se désintègre en chrome 43 par l'un des deux derniers mécanismes, c'est-à-dire par une nouvelle forme de radioactivité : la désintégration à deux protons.



Les souris normales disposent de suffisamment de fer et, par conséquent, d'hémoglobine : elles sont bien colorées et leur sang est normal (à droite en haut). Les souris dont le gène de l'hepcidine est surexprimé (flèche) ont une anémie, car le fer n'est pas absorbé et elles manquent d'hémoglobine : elles sont pâles et leur sang (à droite en bas) est pauvre en hémoglobine.

Centre hospitalo-universitaire Pontchaillou de Rennes, avaient mis en évidence la sensibilité de ce gène à la quantité de fer dans l'organisme.

Par la suite, des analyses ont montré que le gène *hepcidine* est voisin du gène *usf2* : la mutation de ce dernier, chez les souris mutées, endommage aussi le gène de l'hepcidine.

ce qui explique la concomitance des anomalies observées. L'hepcidine appartient à une famille de molécules antibactériennes, nommées défensines, fréquentes chez les insectes notamment. Chez les mammifères, l'hepcidine semble avoir acquis une nouvelle fonction dans le métabolisme du fer, celle de freiner l'absorption du fer par des cellules spécialisées de l'intestin, les entérocytes. En effet, l'organisme a des besoins limités en fer, celui-ci étant le plus souvent recyclé à partir des globules rouges dont le contenu est libéré quand ils ont terminé leur cycle de vie. Afin de vérifier cette hypothèse, les biologistes ont fabriqué des souris mutantes dont le gène de l'hepcidine est, cette fois, surexprimé : comme prévu, ces animaux souffrent d'une grave anémie et sont, de ce fait, très pâles, car leurs organismes ne disposent pas de quantités suffisantes de fer pour construire l'hémoglobine. Une injection de fer les sauve d'une mort inéluctable.

La découverte du rôle de l'hepcidine est vraisemblablement un premier pas vers la mise au point de médicaments qui, en cas d'excès de fer, imiteraient les effets de l'hepcidine, ou qui, en cas de manque de fer, inhiberaient l'hepcidine, notamment dans les anémies chroniques.

La détection des mines antipersonnel

Une forme de résonance magnétique nucléaire permet de détecter les explosifs des mines.

Les conflits armés ont laissé entre 60 et 100 millions de mines antipersonnel, qui tuent ou estropient 20 000 personnes chaque année. Un espoir est né depuis que plus de 140 États ont signé un traité d'interdiction des mines antipersonnel et se sont promis d'en débarrasser la planète en dix ans. Pour ce faire, les méthodes de déminage doivent progresser. Les démineurs utilisent une bobine à induction qu'ils déplacent sur le sol : la présence d'un objet métallique produit un signal. Toutefois, les mines contiennent de moins en moins de constituants métalliques. Pourrait-on détecter directement les explosifs ? Franz Fajara et son équipe de l'Université technique de Darmstadt viennent d'améliorer notablement une technique possible. Nommée résonance quadrupolaire nucléaire, cette méthode est fondée sur le fait que les noyaux des atomes d'azote de l'explosif entrent en résonance quand on les soumet à une radiofréquence particulière.

La résonance quadrupolaire nucléaire révèle les résonances de certains noyaux atomiques. Pour faire passer un noyau d'un niveau d'énergie à un autre, on lui applique le champ magnétique oscillant d'une onde radio de fréquence adéquate. Pour la plupart des atomes, les écarts énergétiques entre les sous-niveaux nucléaires sont constants. Pour certains, ayant un moment électrique quadrupolaire non nul (leur noyau n'a pas de symétrie sphérique), ces écarts sont irréguliers. Ainsi la résonance quadrupolaire nucléaire révèle les résonances particulières des atomes sans symétrie sphérique : c'est le cas de l'azote. En outre, la forme particulière du signal dépend aussi de la structure cristalline de l'explosif.

Malheureusement, l'efficacité de la résonance quadrupolaire nucléaire est limitée, parce que le signal dû aux atomes d'azote est noyé dans le bruit de fond résultant de la résonance des atomes d'hydrogène. F. Fajara et son équipe ont tiré parti de cet inconvénient, car, dans certaines conditions, les atomes d'hydrogène excités transfèrent leur énergie aux atomes d'azote. Ils ont «accordé» les résonances de l'hydro-

gène aux résonances nucléaires de l'azote : ils polarisent d'abord les protons à l'aide d'une bobine d'induction supplémentaire, puis mesurent l'aimantation des noyaux d'hydrogène. La fréquence du champ magnétique supplémentaire est ensuite réduite, de telle sorte que les énergies des résonances de l'hydrogène s'accordent à celles des résonances quadrupolaires nucléaires de l'azote. On coupe le champ supplémentaire et un transfert d'énergie se produit des atomes d'hydrogène excités à ceux d'azote. On mesure alors l'aimantation résiduelle des atomes d'hydrogène. La différence entre les deux signaux fait apparaître les résonances quadrupolaires nucléaires propres de l'azote.

Les physiciens ont testé cette nouvelle méthode sur des échantillons d'explosifs placés dans des tubes de six millimètres de diamètre. Ces échantillons comprenaient du trinitrotoluène (TNT) ainsi que du paranitrotoluène, proche du TNT, mais qui ne comporte qu'un seul groupe $-NO_2$ au lieu de trois. À chaque fois, on a détecté les résonances quadrupolaires nucléaires de l'azote.

Reste à construire un spectromètre-détecteur de mines de terrain. Il devra être monté sur un véhicule, car il faudra transporter plusieurs bobines capables de produire les champs magnétiques nécessaires. Les protons devront d'abord être polarisés par ce champ magnétique pendant quelques dizaines de secondes ; le signal émis par le sol sera mesuré avec, puis sans le champ ; finalement, la différence calculée par un dispositif embarqué dans le véhicule révélera la présence éventuelle d'explosifs dans le sol, sur une vingtaine de centimètres d'épaisseur.



Les interactions durables des génomes

CLAUDE COMBES

Les associations de certains parasites avec leur hôte forment des systèmes dont le tout est plus que la somme des parties : les interactions de longue durée des génomes font apparaître des propriétés nouvelles.

Une manière de représenter l'évolution du monde vivant consiste à dessiner un arbre gigantesque dont les branches se sont multipliées et ont divergé sans cesse depuis quelque quatre milliards d'années : plus les branches sont éloignées, plus la divergence génétique entre les espèces est grande et, par conséquent, plus leur plus proche « ancêtre commun » est lointain dans le temps. Par exemple, l'homme et le chimpanzé, dont l'ancêtre commun aurait vécu il y a sept ou huit millions d'années, sont voisins sur l'arbre, tandis que le chien et le ver de terre, dont le plus proche ancêtre commun vivait il y a quelque 600 ou 700 millions d'années, se trouvent sur des régions de l'arbre très écartées.

Aussitôt que l'on prend en compte les liens qui se nouent entre les êtres vivants dans les écosystèmes actuels, la représentation d'un arbre aux branches qui divergent sans cesse ne convient plus : des espèces dont la parenté évolutive est extrêmement lointaine peuvent se retrouver rapprochées dans l'espace par les liens qu'elles contractent. Parmi ces rapprochements, ceux qui donnent lieu à des interactions durables entre individus d'espèces différentes sont riches en conséquences fonctionnelles et évolutives.

Considérons le « lien » qui unit dans un écosystème une « espèce prédatrice » et une « espèce proie », par exemple le renard et le campagnol des champs. Lorsqu'un individu-renard poursuit et capture un individu-campagnol, l'interaction entre eux dure peu de temps : celui de la poursuite et de la capture elle-même (souvent quelques secondes seulement) plus celui de la digestion et de l'assimilation (au plus quelques heures). De surcroît, pareille interaction implique seulement un flux d'énergie : toute l'information génétique que représentait le campagnol disparaît lorsque son organisme est digéré. Le support matériel de cette information, l'ADN, ne survit pas davantage que les tissus de la proie et se trouve emporté dans le tourbillon des sucs digestifs du prédateur. Pareille interaction est qualifiée d'instantanée. À l'échelle des populations, la prédation par les renards peut contribuer à la sélection naturelle de certains génotypes (ou ensemble de gènes) chez les campagnols mais, à l'échelle individuelle, le génome du renard et celui du campagnol

n'interagissent pas. Au contraire, les interactions qui peuvent s'établir entre un parasite ou un mutualiste et son hôte sont d'une tout autre nature. De nombreux exemples illustrent ces interactions.

Le gîte et le couvert

Certains insectes provoquent chez les végétaux des galles, des excroissances aux couleurs souvent voyantes. Parmi ces insectes, de petites guêpes (des Hyménoptères du groupe des cynipides) pondent leurs œufs sur les feuilles des chênes ou des rosiers sauvages : peu de temps après le dépôt de l'œuf et l'éclosion de la larve d'insecte, une galle apparaît. Cette dernière est due à une multiplication accélérée des cellules végétales. La galle dissimule la larve d'insecte sous une épaisse paroi, lui procurant une certaine protection contre ses ennemis potentiels. Ces ennemis sont, par exemple, des insectes parasitoïdes qui pondent leurs œufs dans d'autres insectes. La galle offre aussi à la larve qui s'y terre une nourriture abondante et facile à prélever : la larve consomme par l'intérieur les tissus qui constituent la galle. La larve de l'insecte exerce un contrôle sur l'édification de la galle : celle-ci grossit graduellement, selon les exigences de son « locataire ».

Citons un autre exemple d'interaction. Le nématode *Trichinella spiralis*, ou trichine, est un ver qui contamine les mammifères lorsqu'ils consomment les muscles d'un autre mammifère précédemment infesté ; ces muscles contiennent de minuscules larves du nématode qui évoluent en adultes, mâles et femelles, dans le tube digestif du mammifère contaminé. Les femelles donnent naissance à de nouvelles larves, qui traversent la barrière intestinale et vont coloniser les muscles du nouvel hôte. La larve de trichine est constituée de nombreuses cellules, mais réussit pourtant à pénétrer dans une cellule musculaire de son hôte. En quelques semaines, la larve de trichine réorganise son « habitat », c'est-à-dire la cellule musculaire de l'hôte. Par des signaux moléculaires codés par son génome, la larve de trichine « dissout » les filaments d'actine et de myosine de la cellule-hôte (qui en constituent l'« ossature ») et

déclenche la croissance d'un ensemble de capillaires qui vont apporter à la cellule infectée et, par conséquent, au parasite, les éléments nécessaires à sa croissance.

On déduit de ce comportement que les gènes de la trichine envoient des instructions à des cellules et à des tissus qui, normalement, sont contrôlés par un autre génome, celui du mammifère, tout comme l'insecte envoyait des signaux à la plante pour qu'une galle adaptée à ses besoins se développe. En activant sélectivement l'expression de certains gènes de l'hôte, les parasites obtiennent les transformations qui satisfont leurs besoins métaboliques. Les interactions de l'insecte et de la plante ou de la trichine et du mammifère diffèrent de celles qui caractérisaient la capture d'un campagnol par un renard. Au simple échange d'énergie s'ajoute une cohabitation de longue durée. Pendant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, des individus ayant deux génomes différents survivent côte à côte : l'interaction durable des génomes devient possible parce que l'un des partenaires (la plante dans le premier exemple, le mammifère dans le second) fournit à l'autre (l'insecte et la trichine respectivement) l'habitat et le couvert.

Les deux associations décrites illustrent le parasitisme au sens strict, où l'association ne bénéficie qu'à un seul des partenaires. Au contraire, dans le mutualisme (ou symbiose), l'association bénéficie aux deux espèces. Il résulte de cette dichotomie que le dialogue entre génomes prend l'aspect d'une dispute parfois violente entre un parasite et son hôte, alors qu'il revêt plutôt celui d'une conversation de salon (qui peut dissimuler quelques trahisures) entre deux mutualistes. Toutefois, même lorsqu'une harmonie de surface paraît régner, la sélection naturelle privilégie dans les génomes les instructions qui optimisent leur probabilité de survie, ce qui signifie que l'égoïsme est toujours sous-jacent aux interactions durables. Ces dernières sont responsables de deux mécanismes dont les conséquences sur le fonctionnement de la biosphère et sur son évolution sont notables : elles favorisent les échanges et les transferts d'informations génétiques.

Les échanges d'informations génétiques

Les génomes des chênes et des guêpes qui se réfugient dans les galles du chêne sont très différents : peu de séquences se ressemblent et l'organisation même du génome varie. Pareille divergence signifie que l'insecte et la plante qui entretiennent une interaction durable sont, en termes d'évolution, des cousins très éloignés, séparés l'un de l'autre depuis des centaines de millions d'années.

Cependant, la multiplication intense des cellules de la plante n'aurait pas eu lieu si l'insecte n'avait pas été présent : c'est le génome de l'insecte qui modifie les caractères (le phénotype) de la plante. Ainsi, un génome peut agir sur des cellules, des tissus, des organes construits sur un autre plan que le sien. En effet, si la divergence génétique est grande entre la plante et l'insecte, le langage de leurs informations génétiques est le même : le code génétique, qui permet de construire les protéines, est quasi universel, et toutes les protéines sont construites avec la même série d'acides aminés (les mêmes briques élémentaires). Le langage des plans de vie est fondamentalement le même : pour tous les organismes, il est écrit avec le même vocabulaire et avec la même syntaxe. Des cousins aussi éloignés que l'insecte et la plante, ou le nématode et le mammifère, utilisent le même langage :

ils peuvent se « parler », et c'est la promiscuité durable de leurs génomes qui autorise le dialogue.

Aujourd'hui, on ignore encore les détails des cascades d'interactions qui conduisent de l'information génétique au caractère exprimé, au sein d'un même organisme. Dès lors, on ne doit pas s'étonner que les connaissances soient encore plus ténues lorsque la communication s'établit entre deux organismes distincts ! On sait pourtant que les instructions codées dans le génome de l'un des partenaires provoquent l'apparition de caractères nouveaux dans le phénotype de l'autre partenaire. Le parasite et l'hôte constituent un « système » doté de nouvelles propriétés. Richard Dawkins, de l'Université d'Oxford, a qualifié ce processus



1. CETTE GALLE sur une feuille de chêne est un exemple des interactions durables qui s'établissent entre des génomes très éloignés : celui du chêne et celui des guêpes qui pondent leurs œufs sur les feuilles de chêne. La larve de l'insecte stimule la prolifération des tissus végétaux sous la forme d'une galle : elle s'y dissimule et dévore cette excroissance végétale de l'intérieur.

de «phénotype étendu». Quand les individus porteurs de mutations qui étaient apparues par hasard et qui modifiaient le phénotype du partenaire tout en leur procurant un avantage adaptatif se sont reproduits davantage que les autres, les gènes mutés se sont multipliés dans les populations concernées : l'extension du phénotype résulte de la sélection naturelle.

Souvent, comme dans le cas des galles et des larves de trichine, l'extension du phénotype profite au parasite. Dans d'autres cas, c'est le génome de l'hôte qui module des caractères du parasite ou du mutualiste. Il existe aussi des associations où l'on a des difficultés à savoir qui influence qui... C'est le cas lorsque deux associés présentent une synchronisation rigoureuse de leurs cycles de reproduction. Tout ce qui précède relève d'échanges d'informations : les phénotypes codés par les génomes «d'origine» s'ouvrent aux phénotypes étendus, parce que les messages émis par les génomes franchissent la frontière physique qui sépare les deux partenaires.

Au cours de l'évolution, la communication entre des cousins éloignés est allée parfois plus loin... Lorsque des organismes ont été associés, génération après génération, des séquences d'ADN de l'un des partenaires ont parfois émigré dans le génome de l'autre. Ce n'est plus un échange d'informations, mais un transfert des supports de l'information eux-mêmes. En théorie, les migrations d'ADN peuvent se produire dans n'importe quel type d'association et dans n'importe quel sens, mais le mécanisme est souvent à sens unique, les migrations se produisant en direction de l'hôte. Elles sont probablement d'autant plus fréquentes que parasites ou mutualistes vivent à l'intérieur même des cellules de leurs hôtes, les barrières à franchir par l'ADN étant moins nombreuses que si le parasite est à l'extérieur des cellules.

On sait aujourd'hui que la cellule eucaryote (pourvue d'un noyau) a été le siège de tels échanges. La plupart des «organites» de la cellule eucaryote, notamment les mitochondries, ont une origine exogène. Ce sont d'anciennes bactéries devenues mutualistes obligatoires. Au cours de

l'évolution, une grande partie de leur génome a été perdue, une autre partie a été conservée, une autre encore a été transférée dans le noyau. D'autres organites cellulaires, tels le flagelle ou le centriole, auraient aussi une origine exogène et la totalité de leur ADN serait aujourd'hui perdue ou incorporée au génome nucléaire. Certains transferts d'information pourraient être l'œuvre des «éléments transposables», ces séquences d'ADN mobiles, capables de quitter les génomes, puis de s'y insérer à nouveau.

Les transferts d'information

De nombreux indices issus de la comparaison des structures des génomes suggèrent qu'aux premiers âges de l'évolution, les transferts ont été fréquents et même entre groupes éloignés. Cela expliquerait que les eucaryotes actuels ont des gènes nucléaires évoquant une origine bactérienne (voire archaebactérienne). Transfert et échange d'information génétique n'ont pas les mêmes conséquences évolutives : le transfert de fragments d'ADN se perpétue dans la descendance, tandis que l'échange d'informations doit être reproduit à chaque génération.

Les phénotypes étendus ne sont pas les seules conséquences des interactions durables. Tout aussi étonnants sont les «phénotypes coordonnés» qui apparaissent dans certaines associations de type mutualiste, où hôte et parasite bénéficient de l'association. Les organes lumineux des poissons des profondeurs en sont un exemple. Certaines espèces de poissons sont dotées des gènes qui codent les substances assurant la bioluminescence. Cette «lumière auto-émise» dans les eaux profondes où ne pénètre aucune lumière solaire a une fonction de reconnaissance interspécifique et d'appât des proies. D'autres espèces doivent leur luminescence à une association avec des bactéries des genres *Photobacterium* ou *Vibrio*.

La localisation de l'organe lumineux varie selon les espèces et, chez les poissons de la famille des *Leiognathidae*, les bactéries qui assurent la luminescence se rassemblent dans l'œsophage. Les muscles entourant l'œsophage sont transparents et jouent le rôle d'une «vitre» ; la vessie natatoire, qui assure l'équilibre du poisson dans l'eau, se transforme en réflecteur, et des cellules spécialisées (les chromatophores) font office d'interrupteur. Le poisson dispose ainsi d'un système optique dont les constituants sont codés par son propre génome, mais dont la source lumineuse est codée par le génome des bactéries. Bien que physiquement distinct, le génome de la bactérie se comporte comme s'il était inséré dans le génome du poisson-hôte, tandis que ce dernier se comporte comme si le génome bactérien lui appartenait. Dans une telle association qui profite aux deux protagonistes, les génomes sont devenus indissociables.

Lorsque les parasites parviennent à modifier les phénotypes de leurs hôtes dans un sens qui leur est favorable, ces «manipulations» leur procurent divers avantages, autorisant notamment l'acquisition de ressources nouvelles, comme c'est le cas dans la relation insecte-plante et dans la relation trichine-mammifère. Dans d'autres cas, la manipulation consiste en un contournement des défenses immunitaires : le parasite sécrète des molécules qui inhibent le système immunitaire de l'hôte et, par conséquent, ses mécanismes de défense. Toutefois, ce procédé présente un risque adaptatif : il permet l'implantation du parasite, mais



2. LES POISSONS LUMINEUX de la famille des *Gonostomidae*, tel ce *Cyclothone*, sont parés d'un organe «lumineux». Des recherches récentes en biologie moléculaire ont montré que ce sont des bactéries qui émettent la lumière. Ces bactéries sont situées dans de petits organes, sous la peau, entre la nageoire pectorale et la nageoire pelvienne. Ainsi, des bactéries ont colonisé des cellules de l'hôte et produisent une lumière dont le poisson tire profit, par exemple lors de la reconnaissance des partenaires de sa propre espèce.

risque d'ouvrir la porte de l'organisme-hôte à des espèces parasites concurrentes.

Dans certains scénarios de transmission, intervient un maillon entre le parasite et son hôte. Le parasite doit alors se développer dans un vecteur intermédiaire, porteur du stade infestant, lequel doit être consommé par l'hôte, où le parasite poursuit son développement. Le comportement du vecteur peut être alors modifié par le parasite dans un sens qui favorise la prédation. Par exemple, les formes infestantes du trématode *Euhaplorchis californiensis* (un ver parasite) envahissent (jusqu'à 3 000 par hôte!) la boîte crânienne du poisson marin *Fundulus parvipennis*. La forme adulte du parasite se développe chez des oiseaux marins qui se contaminent en ingérant les poissons. Les poissons parasités ont un comportement très différent de celui des poissons sains : ils font des séjours fréquents près de la surface et ont des mouvements désordonnés. K. Lafferty et K. Morris, de l'Université de San Diego, ont montré que les poissons parasités sont 30 fois plus nombreux à être capturés par les oiseaux que les poissons sains. Ainsi le parasite déclenche un comportement anormal des poissons qui facilite leur capture par les oiseaux où ils achèvent leur développement.

Les conséquences évolutives

Les vecteurs piqueurs, tels les moustiques qui transmettent le paludisme, peuvent être également «manipulés» : Jacob Koella, de l'Université Paris VI, a montré que les anophèles porteurs des stades infestants du paludisme sont beaucoup plus «tenaces» que des moustiques sains lorsqu'ils font leur repas sanguin sur la peau : restant «accrochés» plus longtemps sur la peau d'un hôte potentiel, ils favorisent probablement la transmission du micro-organisme pathogène.

Notons que la manipulation de l'hôte est quelquefois soupçonnée sans être formellement prouvée. C'est le cas pour les Gordiens : les larves parasitent des insectes, mais à l'état adulte, ces parasites mènent une vie libre en eau douce. Les insectes sont contaminés soit lors de leur phase aquatique (c'est le cas des libellules), soit lorsqu'ils fréquentent occasionnellement un biotope humide (c'est le cas des carabes, des insectes aux reflets métalliques). Pour que le cycle soit complet, c'est-à-dire que le parasite rejoigne le milieu aqueux, il doit se dégager de l'insecte et il faut obligatoirement que cela se produise dans l'eau ! On a observé que les Gordiens provoquent le suicide de leur hôte : manipulé par son parasite, l'insecte plongerait dans l'eau pour s'y noyer... Reste à prouver que quelque neuromédiateur fabriqué par les Gordiens déclenche effectivement le comportement aberrant de l'insecte.

Aujourd'hui, on découvre que la manipulation des hôtes a des conséquences fonctionnelles importantes sur les écosystèmes. Les parasites parviennent à rendre les proies accessibles à un moindre coût, tout en restant assez peu pathogènes pour que les prédateurs ne rejettent pas les proies infestantes. Ensuite, quand une population d'une espèce donnée comporte des individus à comportement normal et des individus à comportement modifié, tout se passe comme si, en termes de comportement, il s'agissait de deux espèces distinctes. Enfin, l'évolution de l'espèce-hôte a toutes les chances d'être modifiée par le parasitisme puisque les pressions sélectives dues à la prédation sont différentes de celles qui s'exerceraient en l'absence du parasitisme.



3. LE VER PARASITE *Euhaplorchis californiensis* est présent, à l'état adulte, dans l'intestin des oiseaux, où ils pondent leurs œufs. Ces derniers tombent dans la mer, où ils éclosent. Les petites larves pénètrent dans des mollusques et s'y multiplient, donnant d'autres larves, les cercaires, qui pénètrent dans des poissons où elles évoluent en métacercaires lesquelles modifient le comportement des poissons qu'elles ont colonisés. Ces derniers ont tendance à nager en surface, de sorte que les oiseaux les capturent plus que les poissons non infectés. Les métacercaires deviennent des vers adultes dans l'intestin de l'oiseau.

Les interactions de type mutualiste jouent également un rôle notable dans la dynamique des écosystèmes, en modifiant les capacités d'exploitation du milieu par certains organismes. Ainsi, la plupart des végétaux supérieurs contractent des associations avec des bactéries ou des champignons : si les Légumineuses peuvent utiliser l'azote atmosphérique et l'incorporer ensuite à leurs protéines, c'est grâce aux bactéries du genre *Rhizobium* qui déclenchent la formation de nodosités sur leurs racines. Ces nodules ne sont rien d'autre que des galles, mais elles sont bénéfiques pour la plante. Selon Jean Dénarié, à l'INRA, le «dialogue moléculaire des symbioses» est ici parfait, car les gènes des deux partenaires échangent d'innombrables messages croisés.

Aujourd'hui, on admet que les cellules eucaryotes animales résultent d'une association entre une cellule nucléée primitive et des bactéries, qui ont pris le nom de mitochondries, tandis que les cellules eucaryotes végétales acquerraient, en plus, d'autres bactéries, les chloroplastes. Tout le devenir ultérieur du vivant aurait été changé si ces associations ne s'étaient pas formées. Et peut-être la sélection naturelle a-t-elle conduit le vivant vers les réseaux de neurones du cerveau humain uniquement parce qu'elle a encouragé, il y a très longtemps, ces mariages entre génomes.

Claude COMBES est professeur de biologie à l'Université de Perpignan.

R. POULIN, *Evolutionary ecology of parasites*, Chapman & Hall, 1998.

Cl. COMBES, *Les associations du vivant*, Flammarion, 2001.

Cl. COMBES, *Parasitism, The Ecology and Evolution of Intimate Interactions*, University of Chicago Press, 2001.

Cl. COMBES, *La vie*, Ellipses, 2002.

La bactérie *Wolbachia*,

FABRICE VAVRE

Le parasitisme de la reproduction est une forme de symbiose, récemment découverte. La bactérie Wolbachia, transmise par les femelles, favorise sa propagation en stérilisant les femelles non infectées, en féminisant les mâles ou en les tuant spécifiquement, et en déclenchant le clonage des femelles.

La symbiose est une relation de longue durée entre deux organismes distincts, un hôte et un symbiote. Selon cette définition, on distingue trois types de relations symbiotiques : le parasitisme, où le symbiote exploite son hôte à son seul profit ; le mutualisme, où le symbiote et l'hôte profitent de l'association ; enfin la situation intermédiaire, le commensalisme, où les deux partenaires coexistent sans subir de dommages ni tirer avantage de l'association.

Les symbioses sont fréquentes dans le monde du vivant, et l'on peut quasiment dire que tout organisme est hôte ou symbiote. Les associations symbiotiques ont des conséquences notables sur la santé publique : les parasitoses, par exemple le paludisme ou les filarioses, sont les principales causes de morbidité chez l'homme. Ces associations jouent également un rôle primordial dans l'évolution des êtres vivants. Le mutualisme correspond à l'acquisition par l'hôte d'une machinerie cellulaire complexe et fonctionnelle, beaucoup plus rapidement que ne l'aurait permis l'évolution graduelle de l'hôte. On compare parfois l'acquisition d'un symbiote à une «prédation génique». En d'autres termes, la symbiose permet à l'hôte d'élargir ses capacités métaboliques et, par conséquent, sa niche écologique presque instantanément.

L'interaction symbiotique installée, quel est son devenir ? Les symbiotes sont-ils toujours sélectionnés pour évoluer vers des associations bénignes ou avantageuses pour l'hôte ? L'évolution de l'association dépend surtout du mode de transmission du symbiote. Quand la transmission est horizontale (c'est-à-dire que le symbiote se propage d'hôte à hôte par contagion), la sélection peut favoriser une augmentation de la virulence. En présence de plusieurs souches, l'augmentation de la compétition favorise les souches à reproduction rapide, c'est-à-dire virulentes. Quand les symbiotes sont transmis verticalement (de parents à descendants), les succès reproducteurs de l'hôte et du symbiote sont intimement liés : moins le symbiote est virulent, mieux il est transmis. L'association peut même évoluer vers le mutualisme, un bénéfice acquis par l'hôte favorisant alors la transmission du symbiote.

On en avait déduit que des symbiotes transmis verticalement évoluaient inévitablement vers le mutualisme. Toutefois, l'étude récente des parasites de la reproduction montre

que d'autres voies évolutives sont possibles pour les symbiotes à transmission verticale. Ces organismes ont su tirer profit de la reproduction de leurs hôtes pour se répandre et se maintenir dans les populations hôtes, qui n'en tirent aucun avantage. Tel est le cas des bactéries du genre *Wolbachia* très répandues parmi les invertébrés et dont les stratégies de dissémination sont particulièrement efficaces.

Les *Wolbachia* ont été observées pour la première fois en 1924 par Burt Wolbach et Marshall Hertig, de l'Université Harvard, à Boston, sur le moustique *Culex pipiens*. Elles sont présentes dans le cytoplasme des cellules de leurs hôtes et sont transmises de mère à descendants par le cytoplasme des œufs. La bactérie *Wolbachia*, une cousine de la bactérie intestinale *Escherichia coli*, a «intérêt» à préserver la vie de l'invertébré qui lui sert d'hôte. Elle vit dans ses cellules et se transmet à la génération suivante en envahissant les ovules de l'hôte, et en «manipulant» son hôte : selon les espèces qu'elle infecte, elle tue la progéniture mâle, transforme les mâles en femelles, rend certains accouplements stériles. Si la plupart des effets de *Wolbachia* lui confèrent le statut d'organisme égoïste, elle semble pourtant avoir joué un rôle bien plus important que celui de simple parasite en raison de ses effets à long terme sur ses victimes. En interférant avec la reproduction de ses hôtes, *Wolbachia* a peut-être favorisé l'apparition de nouvelles espèces.

Transferts horizontaux

Ces bactéries infectent de très nombreux invertébrés, tels certains nématodes et particulièrement des arthropodes (acariens, crustacés et insectes). Avec plus de 20 pour cent des espèces infectées, les insectes sont les hôtes privilégiés de *Wolbachia*. Cette ubiquité fait de *Wolbachia* un des symbiotes les plus répandus du monde animal. En analysant la proximité génétique de nombreux variants de *Wolbachia* par séquençage de leur ADN, on a pu subdiviser les *Wolbachia* en six groupes (ou clades) : les clades A, B, C, D, E et F, qui se sont séparés il y a quelque 100 millions d'années. Les clades A, B, E et F sont spécifiques des arthropodes, alors que les clades C et D sont spécifiques des nématodes. La divergence entre insectes et nématodes étant beaucoup plus

parasite féministe



ancienne (environ 600 millions d'années), un transfert horizontal de *Wolbachia* est certainement survenu entre une espèce d'insecte et une espèce de nématode. Ces transferts interspécifiques de la bactérie existent également au sein des arthropodes, où ils pourraient être fréquents à l'échelle évolutive. L'analyse des clades A et B montre que les phylogénies des *Wolbachia* et de leurs hôtes ne sont pas parallèles : des insectes très éloignés phylogénétiquement hébergent des *Wolbachia* proches, alors qu'une même espèce d'insecte peut héberger des variants bactériens différents. Ainsi *Wolbachia* peut passer d'une espèce hôte à une autre par transfert interspécifique.

Ces transferts nécessitent des relations étroites entre des individus d'espèces différentes. Ainsi, nous avons étudié les drosophiles et leurs parasitoïdes, des guêpes phylogénétiquement éloignées qui pondent leurs œufs dans les larves de drosophiles. Les larves de parasitoïdes se développent à l'intérieur des drosophiles, et les deux partenaires coexistent jusqu'au stade adulte de la guêpe. Quand la dro-

sophile est infectée par *Wolbachia*, elle peut transmettre le parasite aux larves de la guêpe parasitoïde. Les transferts horizontaux, fréquents dans ces systèmes, permettent à *Wolbachia* de conquérir de nouveaux hôtes ; ils expliquent en partie pourquoi la bactérie infecte de si nombreuses espèces. Toutefois, *Wolbachia* n'apportant généralement aucun avantage à ses hôtes, comment colonise-t-elle les populations hôtes et comment s'y maintient-elle ?

Dans les années 1970, on comprit que *Wolbachia* manipule la reproduction de ses hôtes. Puis, on a découvert que cette bactérie peut, selon les espèces qu'elle infecte, tuer spécifiquement les mâles, les féminiser, déclencher une reproduction parthénogénétique des femelles ou favoriser des isolements reproductifs. Examinons comment ces effets confèrent un avantage à la bactérie et lui permettent de se répandre dans les populations hôtes.

1. LA BACTÉRIE *WOLBACHIA* élimine les papillons *Acraea encadon* mâles, parce que seules les femelles peuvent l'héberger et la transmettre à la génération suivante.

L'augmentation de la production de femelles

Puisque *Wolbachia* colonise le cytoplasme, lequel est exclusivement transmis par l'œuf maternel, les mâles, qui ne transmettent pas la bactérie, représentent une voie sans issue pour le parasite. De surcroît, la façon la plus efficace pour améliorer la transmission de la bactérie est d'augmenter la proportion de femelles dans la descendance des femelles infectées. Deux stratégies sont utilisées par *Wolbachia* : la féminisation des mâles et le déclenchement de la parthénogenèse thélytoque.

Thierry Rigaud et ses collègues de l'Université de Poitiers ont montré que *Wolbachia* détermine le sexe chez le cloporte *Armadillidium vulgare*. Les mâles ont tous les gènes nécessaires pour devenir soit des mâles, soit des femelles. Pour devenir des mâles, ils doivent recevoir de l'hormone androgène, laquelle assure la différenciation de la glande androgène à l'origine des caractères mâles. Chez les femelles, la synthèse de l'hormone androgène est inhibée et, en l'absence de développement de cette glande hormonale, les caractères femelles se développent. Or, *Wolbachia* inhibe le développement de la glande androgène, de sorte que des individus génétiquement mâles deviennent des femelles. Ainsi la bactérie peut transformer certains cloportes génétiquement mâles en néo-femelles fonctionnelles. L'infection modifie profondément le déterminisme du sexe, puisque, dans certaines populations de cloportes, tous les individus, qu'ils soient mâles ou femelles, sont génétiquement mâles. Toutefois, les mâles étant toujours nécessaires à la fécondation des femelles, l'invasion par *Wolbachia* risque d'entraîner l'extinction de la population, et il existe de fortes pressions de sélection chez l'hôte pour limiter l'effet de la bactérie ou sa transmission : des gènes de résistance à *Wolbachia* ont été détectés chez *Armadillidium vulgare*.

Pour augmenter la proportion de femelles dans la descendance, *Wolbachia* utilise une autre stratégie : la parthénogenèse thélytoque, observée chez les Hyménoptères. Chez ces insectes, les femelles sont normalement issues d'œufs fécondés diploïdes (qui contiennent deux lots de chromo-

somes), et les mâles d'œufs non fécondés haploïdes (ne contenant qu'un seul lot de chromosomes) : c'est la parthénogenèse arrhénotoque. *Wolbachia* peut déterminer le sexe de l'individu produit par parthénogenèse : Richard Stouthamer, de l'Université de Riverside, en Californie, a montré que *Wolbachia* peut rendre diploïdes des œufs non fécondés en empêchant que les chromosomes ne se séparent durant la première division du noyau, comme cela se produit normalement. Un tel œuf qui contient deux lots de chromosomes en raison de l'intervention de la bactérie se développe en femelle : c'est la parthénogenèse thélytoque. Ainsi, la bactérie peut déclencher la parthénogenèse et l'orienter spécifiquement vers la production de femelles, clones de leur mère.

Cette augmentation de la production de femelles par les femelles infectées entraîne l'expansion rapide de l'infection (puisque les bactéries sont transmises par le cytoplasme des femelles). De plus, les mâles n'étant plus nécessaires (des femelles vierges produisent des femelles quand elles sont infectées), la bactérie peut envahir totalement la population. Dans les espèces où *Wolbachia* est fixée, on peut restaurer la production de mâles en éliminant les bactéries par des antibiotiques, mais dans certaines espèces d'Hyménoptères parasitoïdes, les mâles ne sont plus capables de féconder les femelles : *Wolbachia* a su se rendre indispensable à son hôte. Ainsi la première façon dont *Wolbachia* modifie la reproduction est la surproduction de femelles (qui propagent l'infection). La deuxième est l'élimination des mâles, la troisième étant l'interférence avec le succès des accouplements.

Les femelles au détriment des mâles

De nombreux insectes déposent leurs œufs de manière groupée. Très souvent, la faible quantité de ressources disponibles entraîne une forte mortalité des stades larvaires, en raison de la compétition qui s'installe pour trouver de la nourriture. Dans certains cas, les premières larves qui éclosent dévorent, pour survivre, les œufs situés à proximité. *Wolbachia* poursuit son œuvre de sélection des femelles en tuant de manière spécifique les mâles qu'elle a infectés : d'une part, les femelles ne risquent pas de se faire dévorer par leurs frères et, d'autre part, elles bénéficient d'un repas précieux pour leur survie. Toutefois, on ignore comment *Wolbachia* sélectionne spécifiquement les mâles.

La bactérie perturbe le rapport, normalement équilibré, des populations mâle et femelle de ses hôtes. Ainsi, les mâles sont très rares dans certaines populations de papillons africains *Acraea encedon* et *Acraea encedana* (voir la figure 1). Ces papillons sont parasités par une souche de *Wolbachia* tueuse de mâles, qui se répand partout (plus de 90 pour cent des femelles de ces deux espèces sont porteuses du parasite). Ce phénomène de destruction des mâles a eu des conséquences importantes sur le comportement sexuel d'*Acraea encedana* : alors que ce sont, normalement, les mâles qui courtisent les femelles, ce sont maintenant les femelles qui courtisent les mâles !

Wolbachia manipule aussi son hôte en interférant avec le succès des accouplements. Cette stratégie est connue sous le nom d'incompatibilité cytoplasmique. C'est l'effet le plus répandu de cette bactérie. Lorsqu'une femelle saine s'accouple avec un mâle sain, l'accouplement est fécond ; lorsqu'une femelle saine s'accouple avec un mâle infecté, l'accouplement est stérile ; lorsqu'une femelle infectée s'accouple avec un mâle sain ou infecté, l'accouplement



2. CETTE FEMELLE du parasitoïde *Nasonia vitripennis* est en train de déposer un œuf dans une puppe de mouche. Le parasitoïde se développera jusqu'au stade adulte à l'intérieur de la mouche qu'il finira par tuer. Ce type de développement semble favoriser les transferts horizontaux de la bactérie *Wolbachia*, c'est-à-dire les transferts du parasite d'une espèce à une autre.

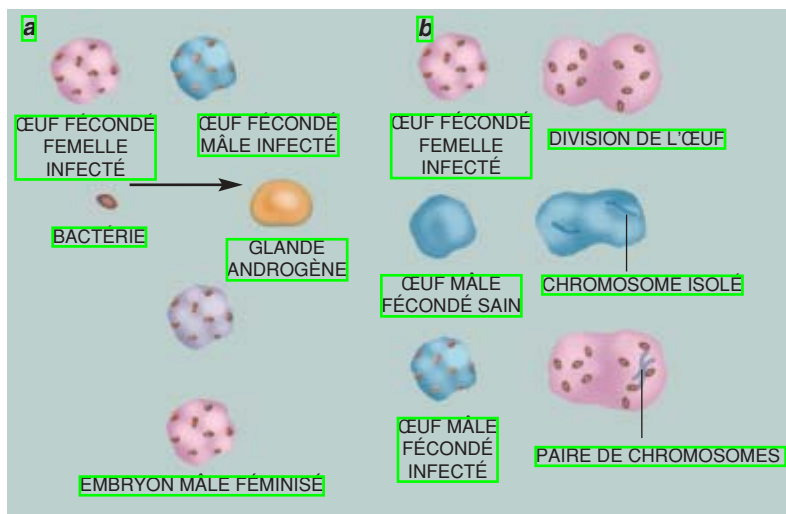
est fécond (voir l'encadré page 38). Cette stratégie confère aux femelles infectées un avantage sur les femelles saines, car elles donnent toujours naissance à une descendance viable. Empêcher la procréation des femelles saines bénéficie indirectement aux femelles porteuses de la bactérie : ces dernières contribuent davantage à la génération suivante que les femelles saines, ce qui permet à *Wolbachia* de se répandre.

L'incompatibilité cytoplasmique

On ignore encore les bases moléculaires de l'incompatibilité cytoplasmique, mais un modèle théorique a été proposé. Il introduit deux fonctions, une fonction «modification» (une sorte de toxine) qui s'exprime chez les mâles et qui nécessiterait un marquage des chromosomes paternels par *Wolbachia* durant la spermatogenèse, et une fonction «sauvetage» (une sorte d'antitoxine) qui intervient chez les femelles infectées et qui élimine le marquage des chromosomes paternels. En l'absence de cette fonction «sauvetage» (c'est-à-dire chez les femelles non infectées), les chromosomes paternels marqués se condensent de manière anormale, et les embryons meurent. L'existence de deux fonctions distinctes est confortée par diverses observations. Certaines *Wolbachia* sont capables de modifier et de sauver l'incompatibilité cytoplasmique (ce sont celles qui ont à la fois la fonction «modification» et la fonction «sauvetage»), d'autres en sont incapables (celles qui n'ont ni l'une ni l'autre des fonctions). Enfin, d'autres *Wolbachia* sont incapables de déclencher l'incompatibilité cytoplasmique, mais peuvent inhiber celle due à une autre bactérie : ce sont des bactéries dépourvues de la fonction «modification», mais pourvues de la fonction «sauvetage».

Comme nous l'avons souligné, l'incompatibilité cytoplasmique entraîne généralement la mort des embryons. Dans notre laboratoire, nous nous intéressons au cas particulier de l'incompatibilité chez les Hyménoptères. Chez ces insectes, les mâles haploïdes se développent à partir d'œufs non fertilisés (ils ne sont donc pas concernés par l'incompatibilité cytoplasmique), et les femelles diploïdes à partir d'œufs fertilisés (les seules touchées par l'incompatibilité cytoplasmique). Le devenir de ces œufs fertilisés est variable selon les associations. Dans le genre *Nasonia*, les chromosomes mâles sont totalement éliminés, ce qui rétablit l'haploïdie et permet le développement des embryons en mâles. L'incompatibilité cytoplasmique se traduit donc uniquement par le fait qu'il y a plus de mâles que de femelles, sans que le nombre de descendants ne diminue. Au contraire, dans d'autres espèces d'Hyménoptères, les embryons incompatibles meurent comme chez les espèces diploïdes. Cette mortalité serait due à une perte incomplète des chromosomes paternels ne permettant pas l'haploïdisation ni le développement de l'embryon. Cette hypothèse «quantitative» est renforcée par l'existence de types intermédiaires où une partie des descendants incompatibles se développe en mâles et où l'autre partie meurt.

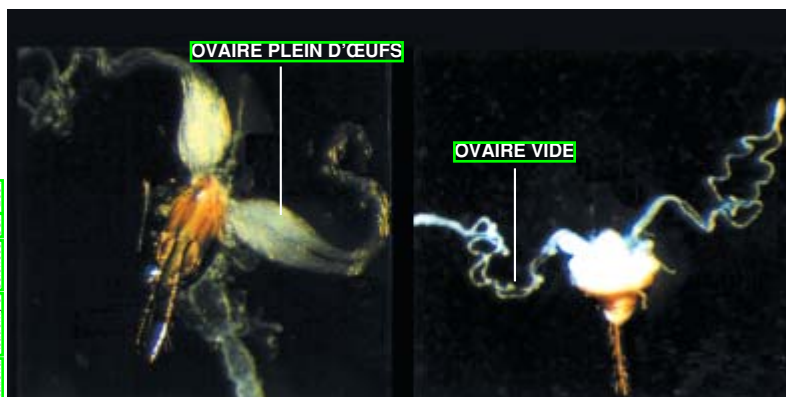
Les systèmes de «modification» et de «sauvetage» évoqués sont également spécifiques : des *Wolbachia* différentes ont des systèmes incompatibles. Les croisements réciproques sont incompatibles, c'est l'incompatibilité cytoplasmique bidirectionnelle (voir l'encadré page 38). Les obstacles au libre brassage des gènes entre populations sont très importants pour la spéciation, c'est-à-dire pour l'apparition de nouvelles espèces. Quand une barrière – physique, par exemple – appa-



3. DEUX STRATEGIES de la bactérie *Wolbachia*, uniquement transmise par les hôtes femelles, visent à transformer les embryons mâles en femelles. Par une stratégie de féminisation, la bactérie empêche le développement de la glande androgène, laquelle fabrique une hormone indispensable à l'obtention d'un mâle, chez les cloportes. En l'absence de cette hormone, l'embryon mâle donne une femelle (a). Par parthénogenèse thélytoque, la bactérie agit sur les chromosomes de certains Hyménoptères. Normalement, un embryon mâle a un seul lot de chromosomes. Lors de la division cellulaire, ces chromosomes sont dupliqués, chaque lot étant redistribué dans une cellule fille issue de la division. Or la bactérie a la capacité d'empêcher cette séparation des chromosomes, lesquels restent par paire après la division. Cet appariement suffit à «féminiser» la cellule initialement mâle.

raît, et qu'elle s'interpose entre deux groupes d'une population auparavant homogène, elle empêche les croisements entre les deux nouvelles populations, qui se différencient alors génétiquement. Les biologistes se sont alors demandé si les entraves au brassage génétique créées par l'incompatibilité cytoplasmique permettaient à une population de diverger génétiquement, même en l'absence d'une barrière physique. Une spéciation par infection peut-elle se produire ?

L'équipe de Jack Werren, à l'Université de Rochester, étudie trois espèces jumelles du genre *Nasonia*, toutes trois infectées, mais par des souches différentes de *Wolbachia*. Ces trois espèces ne produisent pas de descendants hybrides. Rien de surprenant pour des espèces différentes. Toutefois, après élimination des *Wolbachia* par traitement antibiotique, des hybrides apparaissent ! Ainsi, sans *Wolbachia*, ces «espèces»



4. L'APPAREIL REPRODUCTEUR de l'Hyménoptère parasitoïde de drosophile, *Asobara Tabida*, est modifié par *Wolbachia*. Quand la femelle est infectée, les ovaires sont pleins d'œufs (a). Au contraire, quand on élimine *Wolbachia* par un traitement antibiotique la femelle cesse de produire des œufs et ses ovaires sont vides (b). La bactérie est devenue indispensable à la reproduction du parasitoïde.

Sabotage sexuel

La bactérie *Wolbachia* agit sur le succès reproducteur de ses hôtes en rendant certains croisements stériles. De surcroît, en limitant le brassage génétique parmi ses hôtes, la bactérie participerait à l'apparition de nouvelles espèces. Ce phénomène, nommé incompatibilité cytoplasmique, survient quand un mâle infecté et une femelle non infectée s'accouplent : ce croisement est stérile alors que tous les autres sont fertiles.

L'incompatibilité cytoplasmique ferait intervenir un mécanisme de type toxine-antitoxine. Certaines souches de *Wolbachia* introduiraient dans les spermatozoïdes des hôtes mâles une toxine qui endommagerait les protéines se liant à l'ADN. La présence de ce poison expliquerait la condensation anormale des chromosomes du mâle lors de la fusion avec l'ovule, qui empêche l'œuf fécondé de se développer. Cependant, quand le mâle s'accouple avec une femelle infectée, cette condensation anormale n'a pas lieu : *Wolbachia* sécréterait alors dans l'œuf fécondé une antitoxine qui le préserverait.

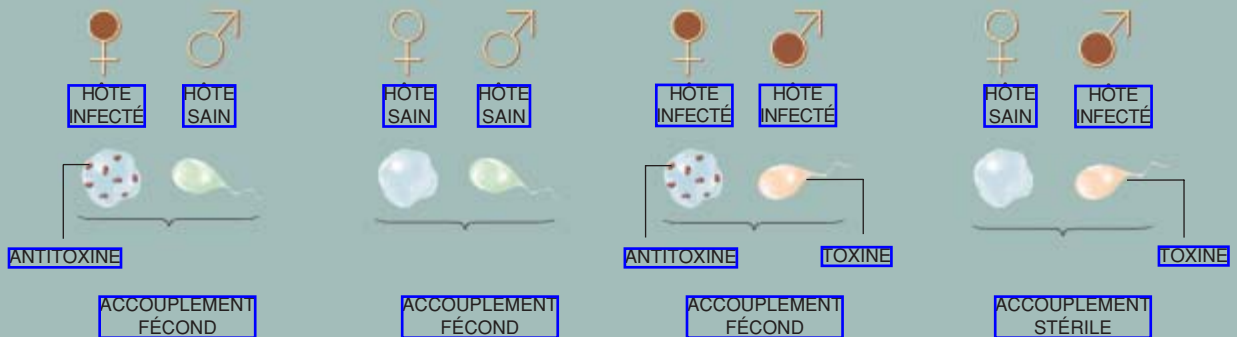
Cette manipulation de l'hôte par la bactérie a été interprétée comme un acte de « malveillance évolutive », parce qu'elle réduit la fécondité des femelles non parasitées sans que les bactéries endommageant les spermatozoïdes n'en profitent. Néanmoins, cette stratégie bénéficie indirectement aux femelles infectées (fertiles quel que soit le mâle) et, par conséquent, à leurs parasites.

À mesure que les femelles infectées donnent naissance à d'autres femelles infectées, la bactérie se répand de plus en plus. Michael Turelli, de l'Université de Davis, et Ary Hoffman, de l'Université australienne de La Trobe, ont confirmé le succès de cette stratégie. Ils ont suivi la souche de *Wolbachia* dite *Riverside*, qui provoque une incompatibilité cytoplasmique et qui se répand, dans l'Est des États-Unis, sur le territoire de sa population hôte, *Drosophila simulans* : le front du territoire conquis progresse de 100 kilomètres par an.

Dans le cas d'une incompatibilité cytoplasmique unidirectionnelle, une seule souche de *Wolbachia* est impliquée. La situation se complique quand une autre souche produit une incompatibilité cytoplasmique – on parle alors d'incompatibilité cytoplasmique bidirectionnelle.

Supposons que deux souches bactériennes, A et B, infectent deux hôtes qui, avant l'infection, étaient féconds. Si l'antitoxine de la souche A destinée à sauver les ovules est inefficace contre la toxine produite par la souche B, et inversement, tous les accouplements entre des individus infectés par des bactéries différentes sont stériles. Si tous les individus de la population sont infectés par l'une ou par l'autre des souches, les seuls accouplements fertiles se font entre individus porteurs de la même souche. Les deux souches de *Wolbachia* ont séparé la population hôte en deux groupes qui ne sont plus interféconds.

INCOMPATIBILITÉ CYTOPLASMIQUE UNIDIRECTIONNELLE



INCOMPATIBILITÉ CYTOPLASMIQUE BIDIRECTIONNELLE



Selon le modèle toxine-antitoxine, les mâles infectés par *Wolbachia* produisent une toxine. Dans le cas de l'incompatibilité cytoplasmique unidirectionnelle, le mâle et la femelle sont infectés par la même souche bactérienne. Dans les femelles infectées, la bactérie libère une antidote ; cette dernière est inutile lorsque le mâle est sain et qu'il ne produit pas de toxine. Au contraire, lorsque le mâle est infecté et produit la toxine, l'antidote de la femelle la neutralise et le croisement

est fertile. En revanche, quand la femelle est saine et ne fabrique pas d'antidote, le croisement est stérile. Dans le cas de l'incompatibilité cytoplasmique bidirectionnelle, le mâle et la femelle sont infectés par des souches différentes. L'antidote produite par la souche A est inefficace contre la toxine de la souche B qui endommage les spermatozoïdes, de sorte que le croisement est stérile. De même, l'antidote B ne protège pas les spermatozoïdes endommagés par la toxine A.

d'Hyménoptères sont interfécondes, fertilité qui disparaît en présence de la bactérie. Cette dernière joue donc un rôle primordial dans l'isolement reproductif de certaines espèces et pourrait avoir été au fil de l'évolution, un facteur supplémentaire des mécanismes de spéciation.

La stabilité des associations avec *Wolbachia*

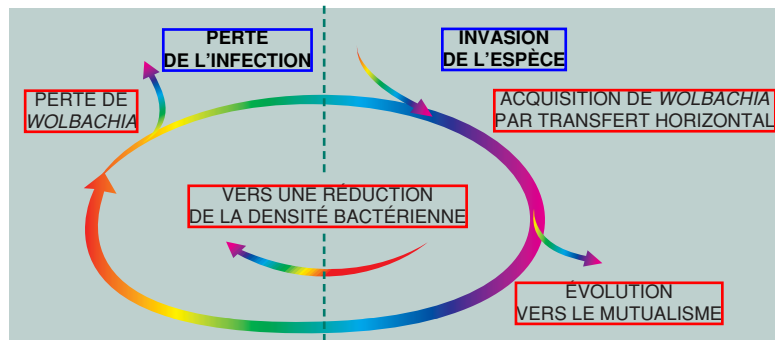
Ainsi, *Wolbachia* peut coloniser de nouveaux hôtes par transfert horizontal, puis se répandre dans les populations grâce à sa capacité de manipuler la reproduction. Ces deux phénomènes expliquent le succès évolutif de la bactérie, mais soulèvent une nouvelle question : pourquoi *Wolbachia* n'infecte-t-elle pas plus d'espèces ? Deux hypothèses sont proposées. Selon la première, toutes les espèces ne sont pas « infectables ». Pour s'installer dans une nouvelle espèce, *Wolbachia* doit museler le système immunitaire de l'hôte, et certaines espèces sont peut-être résistantes à la bactérie.

Selon la seconde hypothèse, simultanément aux acquisitions par transfert, certaines espèces pourraient perdre leur parasite, privant la bactérie d'une espèce hôte. Les associations à *Wolbachia* ne seraient pas stables dans le temps. On a montré qu'une fois une association installée, l'évolution des deux partenaires s'accompagnerait d'une réduction de l'effet de la bactérie sur la reproduction de l'hôte ne permettant plus à la bactérie de se maintenir, et entraînant la disparition de l'infection. Quelques données semblent étayer cette seconde hypothèse. Chez les parasitoïdes de la drosophile, nous avons observé que l'intensité de l'incompatibilité cytoplasmique rencontrée dans une espèce est liée à la prévalence de l'infection dans cette espèce. Ainsi, chez *Leptopilina heterotoma*, la quasi-totalité des individus est infectée et l'incompatibilité cytoplasmique est complète. Au contraire, chez *Pachycrepoides dubius*, la bactérie n'a pas d'effet détectable, et les populations sont peu infectées (35 pour cent des individus en moyenne) : cette espèce serait en train de se débarrasser de l'infection.

Quel scénario peut-on ébaucher quant à l'évolution des associations avec *Wolbachia* ? Une espèce initialement non infectée acquiert *Wolbachia* par transfert horizontal. Seules les bactéries capables d'avoir des effets sur la reproduction se maintiennent dans les populations. Les deux partenaires coévoluent jusqu'à ce que l'infection disparaisse. Ainsi, on s'interroge : la capacité de *Wolbachia* à modifier la reproduction de ses hôtes ne se maintient-elle pas grâce aux transferts horizontaux qui lui permettent de coloniser de nouveaux hôtes, seules les bactéries ayant un effet notable sur la reproduction étant retenues ?

En dehors de cette dynamique d'acquisition et de perte de l'infection, *Wolbachia* peut suivre une autre voie évolutive : elle peut devenir mutualiste. En effet, ce n'est que dans ces conditions, où le symbiote apporte un avantage à son hôte, que l'association pourrait être stabilisée à l'échelle de l'espèce. C'est ce qui s'est produit chez un autre parasitoïde de drosophile, *Asobara tabida*. Chez cette espèce, nous avons montré que la présence de *Wolbachia* est nécessaire à la production d'œufs.

Les nématodes entretiennent aussi des relations mutualistes avec *Wolbachia*, qui infecte la majorité des filaires. Aujourd'hui, les *Wolbachia* des nématodes sont distinctes des *Wolbachia* qui infectent les arthropodes, et l'on n'observe plus de transferts horizontaux de la bactérie, mais uniquement des transferts par la descendance.



5. STABILITÉ DES ASSOCIATIONS avec *Wolbachia*. A l'échelle de l'évolution, certaines associations seraient instables. La bactérie est d'abord acquise par transfert horizontal par une nouvelle espèce. Quand son effet sur la reproduction est intense, elle se répand dans la population infectée. Les partenaires coévoluent et, parfois, l'effet pourrait diminuer, voire disparaître et entraîner la perte de la bactérie. Pour que l'association soit stabilisée, une association mutualiste doit s'installer entre la bactérie et l'hôte.

Wolbachia est un exemple étonnant d'association entre un micro-organisme et un hôte. Toutefois, cette bactérie n'est pas simplement un cas d'école et on étudie comment l'utiliser à des fins agronomiques ou médicales. Pourrait-elle devenir un agent de lutte contre les nématodes, ce qui nous permettrait de lutter contre de nombreuses pathologies humaines difficiles à traiter ? Des antibiotiques qui élimineraient *Wolbachia* détruiraient les filaires (puisque la bactérie est devenue indispensable à leur reproduction). On envisage aussi d'utiliser l'incompatibilité cytoplasmique pour contrôler des populations de ravageurs ou des vecteurs d'agents pathogènes, ou pour répandre des gènes : si l'on parvenait à introduire des gènes dans *Wolbachia* et à relâcher des insectes infectés par cette bactérie, cette dernière envahirait les populations visées et répandrait le gène d'intérêt. Cette technique a été envisagée pour répandre des gènes de résistance à l'agent du paludisme chez les moustiques. Toutefois, ces utilisations imposeraient que l'on sache manipuler avec précision le matériel génétique de *Wolbachia* et que l'on maîtrise les transferts artificiels vers de nouvelles espèces ainsi que les phénomènes d'invasion.

La découverte des bactéries *Wolbachia*, l'un des symbiotes les plus répandus dans le monde animal, a révélé une nouvelle voie de la symbiose : la manipulation de la reproduction. Aujourd'hui, on connaît d'autres organismes qui utilisent cette même voie pour se répandre dans les populations hôtes. Plus de six projets de séquençage complet de *Wolbachia* sont en cours, qui devraient révéler les mécanismes d'action de cette bactérie féministe.

Fabrice VAVRE est chargé de recherche au CNRS dans le Laboratoire Biométrie et biologie évolutive, dirigé par Christian GAUTIER, à l'Université Claude Bernard – Lyon I.

Frank DEDEINE et al., *Removing symbiotic Wolbachia specifically inhibits oogenesis in a parasitic wasp*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, pp. 6247-6252, 2001.

Seth BORDENSTEIN et al., *Wolbachia-induced incompatibility precedes other hybrid incompatibilities in Nasonia*, in *Nature*, vol. 409, pp. 707-710, 8 février 2001.

Claudio BANDI et al., *Wolbachia in filarial nematodes : evolutionary aspects and implications for the pathogenesis and treatment of filarial diseases*, in *Veterinary parasitology*, vol. 98, pp. 215-238, 2001.

Le grand inventaire cosmique

GUNTHER HASINGER • ROBERTO GILLI

Le jour approche où les astronomes connaîtront avec certitude tous les objets susceptibles d'émettre de la lumière dans l'Univers.

Avons-nous vu tout ce qu'il y a à voir dans l'Univers? La réponse à cette question est non, bien sûr, car l'Univers observable et ses 10 000 milliards de milliards de milliards d'années-lumière cubes sont très loin d'avoir été explorés. Nous sommes aussi incapables de cataloguer l'ensemble des corps célestes existants que les entomologistes le sont de connaître chacun des scarabées qui peuplent la Terre. Toutefois, au même titre qu'un biologiste peut prétendre connaître les principales espèces de mammifères terrestres, par exemple, les astronomes sont sur le point de terminer l'inventaire des différentes classes d'objets susceptibles d'émettre ce qu'ils qualifient de lumière – c'est-à-dire, des ondes électromagnétiques du domaine radio au rayonnement gamma, en passant par les micro-ondes, les infrarouges ou les ultraviolets.

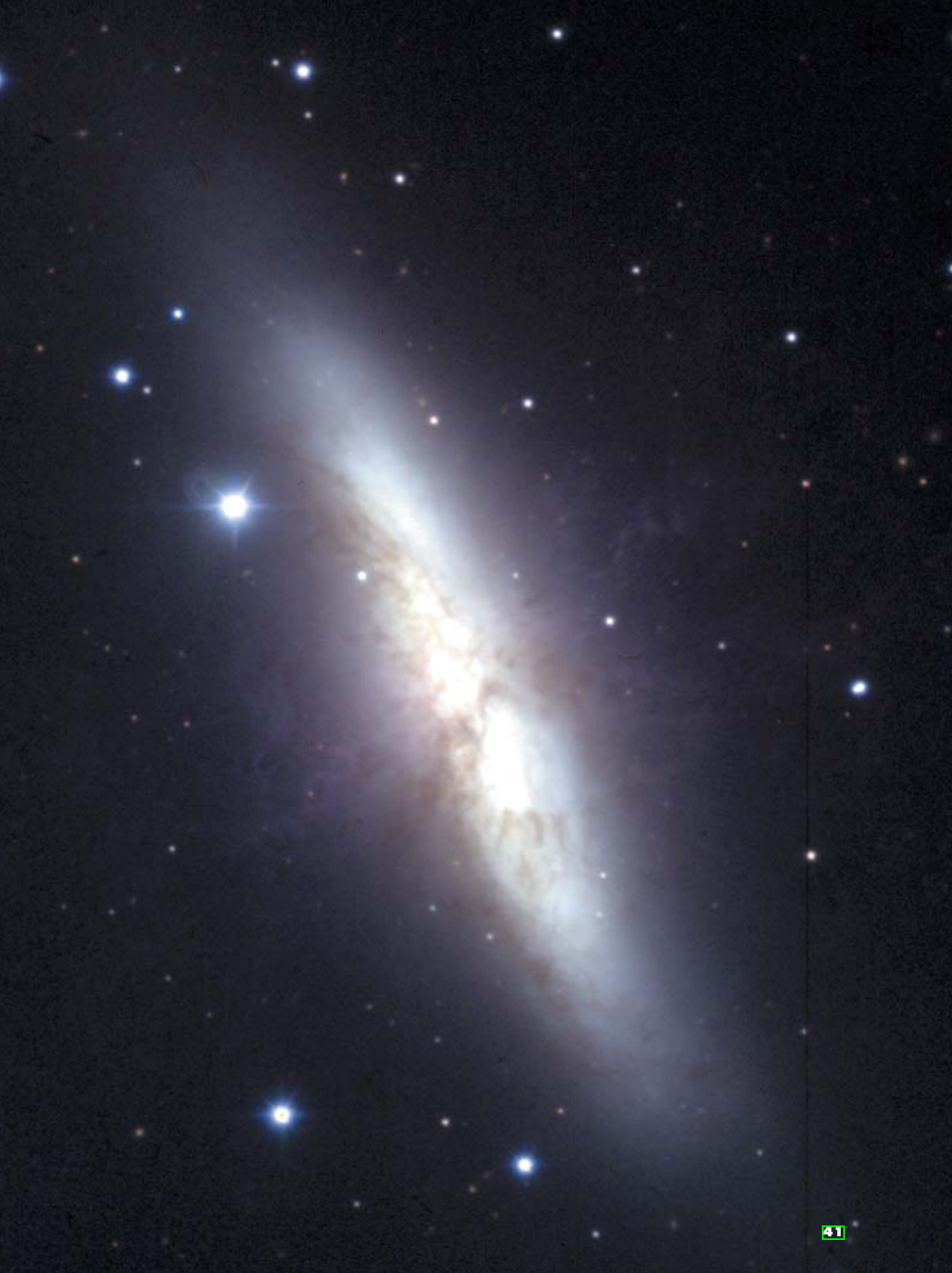
Le principe de cet inventaire consiste à étudier ce que les observateurs considèrent habituellement comme une nuisance : le fond diffus cosmique. Quand les astronomes parlent de fond diffus, ils font allusion à ce que les chercheurs des autres disciplines nomment bruit de fond, c'est-à-dire tout ce qui ne constitue pas l'objet de leur étude. Un télescope qui collecte la lumière provenant d'une étoile donnée ne peut éviter de capturer des photons issus d'autres objets proches ou lointains. Cette lumière superflue ne fait que réduire la précision de la mesure souhaitée. Ceux d'entre nous qui cherchent à établir l'inventaire des différentes classes d'objets célestes étudient précisément ce que leurs collègues négligent. Tout d'abord, nous enregistrons toute la lumière issue d'une région donnée du ciel. Ensuite, nous soustrayons les contributions dues aux objets connus, tels les étoiles, les galaxies et les nuages de gaz. S'il reste une lueur dif-

fuse d'origine non identifiée, nous en déduisons que notre recensement n'est pas encore complet.

Le fond diffus

Le terme de fond diffus évoque en général le fond diffus cosmologique. Ce rayonnement radio et micro-onde omniprésent n'est pas constitué de sources ponctuelles non identifiées, mais semble avoir une origine vraiment diffuse, en l'occurrence un plasma chaud très homogène qui baignait l'Univers 400 000 ans après le Big Bang. Cependant, d'autres fonds s'ajoutent à ce rayonnement fossile pour contribuer à «cette obscure clarté qui tombe des étoiles», notamment les fonds diffus X, infrarouge et visible (parfois qualifié d'optique). Le recensement des sources et l'estimation précise de leur contribution aux diverses composantes du fond diffus sont l'une des tâches les plus ardues de l'astronomie. Comme nous l'avons vu, dans son principe, cette estimation est simple puisqu'elle ne consiste qu'à soustraire de la totalité du signal reçu l'ensemble des sources identifiées entre la Terre et l'Univers profond : le bruit engendré par le détecteur lui-même, le rayonnement issu de notre propre Système solaire, l'émission de notre galaxie, et ainsi de suite. Il faut, de plus, évaluer le signal d'arrière-plan en tenant compte du fait qu'il a pu, lors de son trajet jusqu'à nous, être atténué et partiellement absorbé par la matière intergalactique. Dans la pratique,

1. CERTAINES GALAXIES, telle M82, abritent un trou noir supermassif et produisent des étoiles à un rythme effréné, dix fois supérieur à celui de la Voie lactée. Elles émettent probablement l'essentiel du rayonnement électromagnétique qui emplit l'Univers et qui constitue le fond diffus cosmique.





ROBERT HARRISON/CONTOUR

2. LA VOIE LACTÉE apparaît comme une simple traînée laiteuse à l'œil nu, mais se décompose en 100 milliards d'étoiles lorsqu'on l'observe à l'aide d'un télescope (dans le cartouche, la constellation de l'Autel). Il en va de même du fond diffus, cette faible lueur qui emplit le ciel entre les étoiles et qui est produite par l'ensemble des objets lointains de l'Univers que l'on peut, aujourd'hui, recenser.



VLT/European Southern Observatory

cette méthode se révèle difficile, car la soustraction est une opération qui amplifie les erreurs. Par chance, dans certains domaines du spectre, le fond diffus constitue le signal le plus brillant. En revanche, dans d'autres domaines, notre travail revient à extraire un simple murmure d'une cacophonie cosmique. En général, nos conclusions sont limitées par la précision avec laquelle nous connaissons l'émission d'avant-plan. En dépit de ces obstacles, nous sommes parvenus à caractériser le spectre du fond diffus avec une assez grande précision et sur un domaine spectral assez large (voir la figure 4).

Le grand recensement

La composante du fond diffus dans le domaine des rayons X fut découverte en 1962. Son spectre présente un maximum autour de 30 kiloélectronvolts et s'étend de façon continue vers les énergies plus élevées. En deçà de un kiloélectronvolt, on trouve un grand nombre de raies d'émission provenant de noyaux atomiques, superposées à ce spectre continu, et qui semblent être l'empreinte d'un gaz chauffé à plusieurs millions de kelvins à l'intérieur ou autour de notre galaxie. Dans les années 1970, les premiers satellites sensibles aux rayons X, tels *Uhuru*, *Ariel V* et *HEAO 1*, ont montré que l'émission X de plus forte énergie était répartie de façon uniforme sur

l'ensemble de la voûte céleste. On en déduisit que son origine est extragalactique. En effet, si la matière responsable de ce rayonnement était répartie comme celle de notre galaxie, l'éclat du fond diffus serait plus important dans le plan de la Voie lactée (ou dans le plan de l'écliptique si le rayonnement était émis par le Système solaire). Les satellites sensibles aux rayons gamma, tels *SAS-3*, *COS-B* et *Compton-GRO*, ont confirmé que les rayonnements plus énergétiques encore suivent également cette répartition uniforme.

Le fond cosmologique micro-onde et le fond diffus de rayons X dominent l'éclat du ciel dans leur domaine respectif du spectre électromagnétique. Ce n'est pas le cas pour le reste du fond diffus. Ainsi, sa composante infrarouge n'a été identifiée qu'en 1996 par Jean-Loup Puget et ses collègues de l'Institut d'astrophysique spatiale, à Orsay, et n'a été mesurée de façon précise qu'il y a deux ans. En lumière visible et dans le domaine ultraviolet, les premières mesures du fond cosmique ont été réalisées par Rebecca Bernstein et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie. Avant ces mesures directes, les astronomes se contentaient d'évaluer le fond optique en extrapolant la distribution des galaxies les moins brillantes décelables sur certaines images prises par le télescope spatial *Hubble*. Quant à la composante du fond diffus

dans l'ultraviolet lointain, elle est absorbée par l'hydrogène... qui constitue l'essentiel du milieu interstellaire. En conséquence, dans ce domaine, les astronomes ne disposent que d'estimations fondées sur l'extrapolation des mesures obtenues dans les domaines adjacents du spectre, les ultraviolets moyens et les rayons X de basse énergie.

Quelles sont les sources des différentes composantes du fond diffus? En fait, chaque composante est constituée d'émissions venues de différentes classes d'objets astronomiques. La lumière des étoiles, dont l'énergie est issue de la fusion thermonucléaire, ne contribue qu'aux domaines infrarouge proche, optique et ultraviolet. Cependant, les quasars et autres noyaux actifs de galaxies alimentent tout le spectre électromagnétique, des ondes radios aux rayons gamma. Quant aux nuages de poussière interstellaire, ils absorbent la lumière visible, et les rayonnements ultraviolets et X, mais restituent cette énergie sous forme de rayonnement infrarouge. Pour compliquer encore un peu notre problème, le fond diffus, en chaque point du ciel, est la somme des émissions issues d'objets qui sont situés tout au long de la ligne de visée, c'est-à-dire à des époques différentes de l'histoire de l'Univers. Ainsi nombre de ces objets ont disparu de l'Univers contemporain, tandis que les astres que l'on observe aujourd'hui n'existaient

pas lorsqu'une grande partie du fond a été émise. Pour répondre à notre question, on attaque le problème de deux façons différentes. La première consiste à réaliser des observations avec la résolution spatiale et la sensibilité la plus élevée possible, afin de distinguer le maximum de sources dans le fond diffus. Ensuite, nous utilisons une seconde technique, nommée synthèse de population : nous calculons l'émission attendue pour différentes combinaisons possibles d'objets, et nous comparons ces prédictions aux mesures du fond, en faisant varier les combinaisons jusqu'à obtenir le meilleur ajustement.

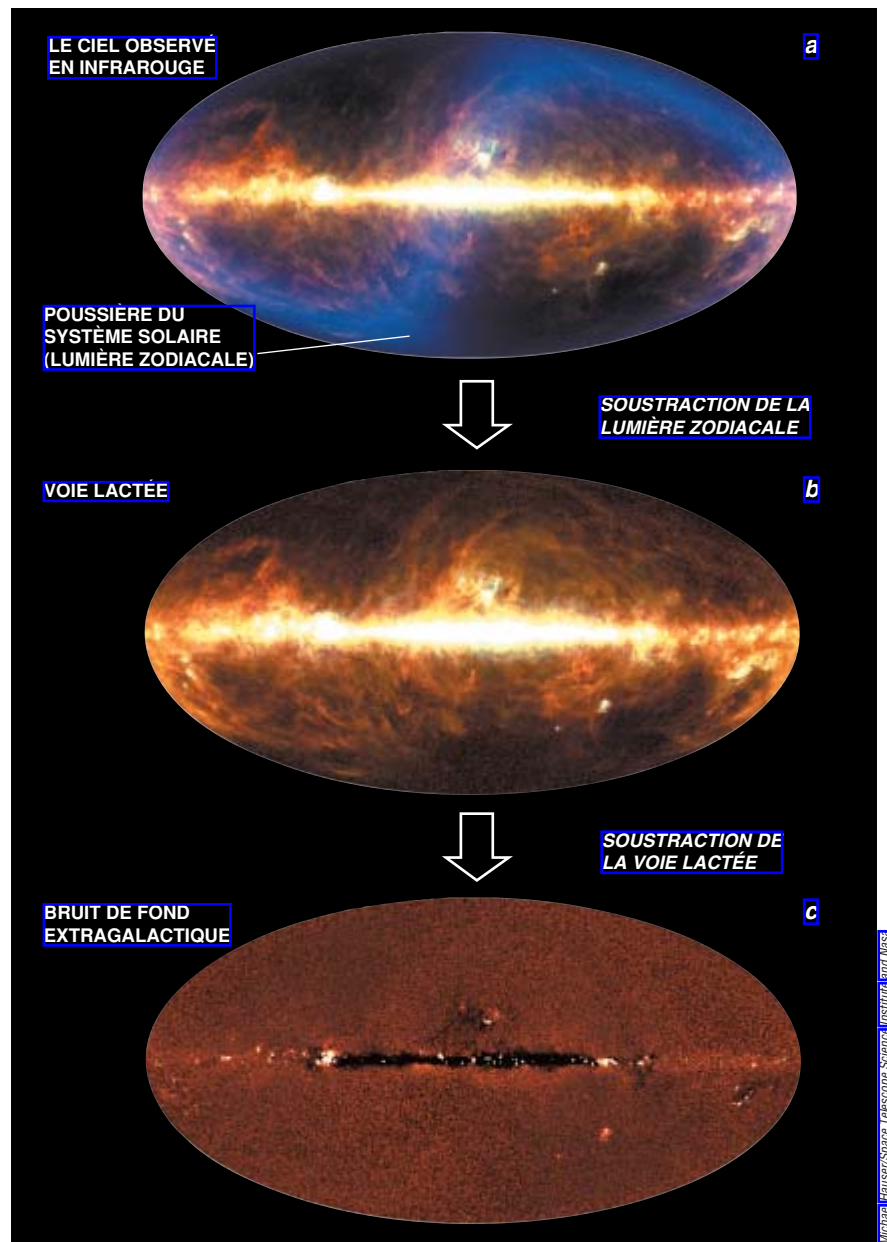
Trous noirs galactiques

La composante X du fond diffus, la première à avoir été identifiée, a fait l'objet de nombreuses études. Pendant 30 ans, on s'est demandé si elle était produite par un ensemble de sources ponctuelles que l'on ne parvenait pas à distinguer ou par une forme de gaz diffus et très chaud baignant l'environnement extragalactique. Dans les années 1990, on est arrivé à un consensus à l'aide d'un raisonnement indirect. Si le milieu intergalactique est rempli d'un gaz chaud assez dense pour rendre compte du fond diffus dans le domaine des rayons X, ce gaz doit se manifester dans d'autres domaines, notamment en masquant partiellement le fond cosmologique micro-onde. Ainsi, la lumière fossile de l'Univers primordial ne devrait pas nous apparaître sous la forme du spectre de corps noir parfait prévu par la théorie du Big Bang. Or, les observations du fond diffus, en particulier celles qui ont été obtenues par le satellite COBE, ont fait apparaître un spectre identique à celui du corps noir. On en déduit que seule une petite fraction du fond dans le domaine des rayons X provient d'un gaz intergalactique chaud : pour l'essentiel, cette composante du fond cosmique doit être constituée de sources discrètes non identifiées. Lesquelles ? Les premiers relevés systématiques ont été réalisés au début des années 1980 par Ricardo Giacconi et ses collègues de l'Université de Pennsylvanie, découvreurs du fond diffus dans ce domaine, à l'aide du satellite *Einstein*. À l'époque, ils sont parvenus à décomposer environ cinq pour cent du fond diffus en sources ponctuelles, parmi lesquelles on trouvait de nombreux quasars. Par la suite, les astronomes ont continué le travail à l'aide du satellite ROSAT. À partir de 1990,

et pendant dix ans, la mise en œuvre des relevés du fond diffus dans le domaine des rayons X a occupé des centaines d'astronomes à travers le monde.

Le satellite ROSAT a effectué des relevés très profonds d'une portion du ciel connue des astronomes sous le nom de «trou de Lockman». Proche de la constellation de la Grande Ourse, il s'agit d'une percée, entre les astres de la Voie lactée, qui nous permet d'observer l'Univers lointain. Les images du trou de Lockman, presque exemptes d'absorption de premier-plan, figurent parmi les observations en rayons X les

plus lointaines jamais réalisées. Elles ont permis de résoudre 80 pour cent du fond diffus à des énergies inférieures à deux kiloélectronvolts (un domaine que les astronomes qualifient de rayons X mous). Ensuite, pour identifier ces sources, il nous fallait comparer ces relevés avec des images prises en lumière visible dans la même région du ciel. La difficulté résidait dans le fait que les contreparties visibles des sources de rayons X sont souvent d'un éclat très faible : or, ces maigres flux lumineux doivent servir à réaliser des spectres optiques afin d'identifier les



3. LE FOND DIFFUS se révèle lorsque l'on soustrait à une image du ciel (a, l'ensemble du ciel observé dans l'infrarouge) la contribution des sources connues situées à l'avant-plan. Une fois ôté le rayonnement diffusé par les poussières du Système solaire autour de 60 micromètres de longueur d'onde, aussi nommé lumière zodiacale (en bleu), seule subsiste l'image des nuages moléculaires et de la poussière de la Voie lactée (b). Le fond diffus (c) apparaît lorsque l'on retire cette dernière contribution.

propriétés physiques de ces objets ainsi que leur décalage vers le rouge. Ce travail a été rendu possible par le télescope géant *Keck*, à Hawaï. Environ 80 pour cent des sources identifiées par ROSAT se sont révélées être des noyaux actifs de galaxies. On a longtemps pensé que ces noyaux étaient des quasars et des galaxies (dites de Seyfert) de type 1 : des sources dont les larges raies d'émission suggèrent que nous observons directement leurs régions les plus centrales, où de pantagruéliques trous noirs font bombance. En aspirant la matière environnante, ils convertissent de façon très efficace son énergie gravitationnelle en rayonnement, provoquant ainsi d'intenses flambées de rayons X.

Vautrés dans la poussière

Dans l'Univers local, nous connaissons d'autres types de noyaux actifs, nommés galaxies de Seyfert de type 2 ou quasars de type 2, qui se manifestent par des spectres dont les raies d'émission sont étroites, voire inexistantes. Aujourd'hui, dans le cadre du «modèle unifié des noyaux de galaxies» proposé au milieu des années 1980, on sait expliquer l'existence d'un second type de noyaux actifs. Ce modèle postule que les noyaux actifs de galaxies possèdent non seulement un trou noir central, mais aussi un tore de gaz et de poussière. En fonction de son orientation par rapport à l'observateur, ce tore peut, dans certains cas, cacher le trou noir. Le modèle a été amélioré, mais ces prévisions de base ont été conservées.

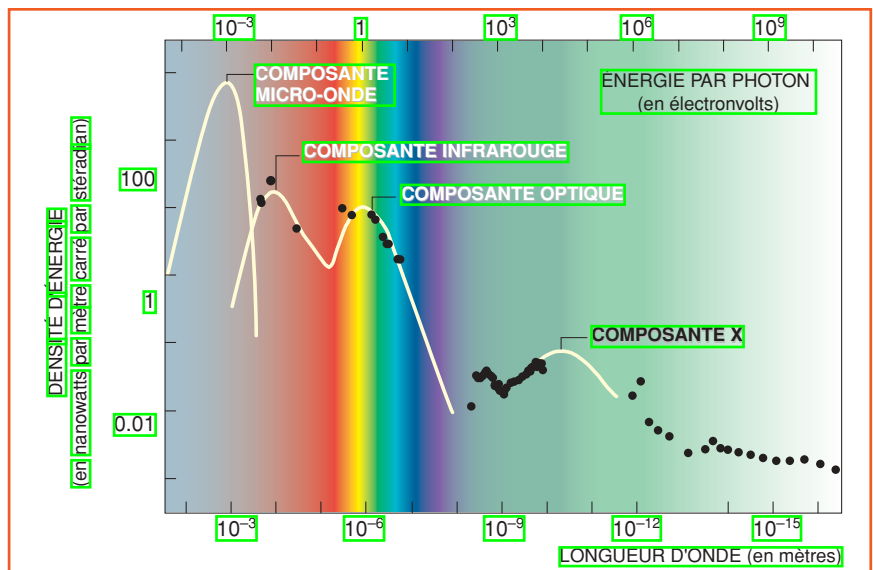
Ce résultat étant acquis, un paradoxe est apparu lorsque les astronomes s'en sont servi pour mettre en œuvre leur seconde stratégie, la synthèse de population. Ils ont combiné les spectres des différents types de noyaux actifs en tenant compte de leur proportion observée dans l'Univers local. Ils espéraient que le spectre résultant correspondrait bien à celui du fond diffus dans le domaine des rayons X. Ce ne fut pas le cas. Les spectres des noyaux actifs de galaxies de l'Univers local sont plats, alors que, comme nous l'avons dit, le fond diffus présente un pic à 30 kiloélectronvolts. En 1989, Giancarlo Setti, de l'Université de Bologne en Italie, et Lo Woltjer, de l'Observatoire de Haute-Provence, en France, ont proposé une solution à ce problème. Selon eux, nos modélisations par synthèse de population étaient fondées sur l'attribution de mauvaises proportions aux différents

types de noyaux actifs de galaxies. G. Setti et L. Woltjer affirmèrent que, contrairement à ce qui avait été supposé, la majorité des sources du fond diffus X est constituée de noyaux actifs de galaxies de type 2 (et non de type 1), obscurcis par la poussière, mais dont les trous noirs centraux, supermassifs, émettent des rayons X très énergétiques pouvant traverser leurs tores de gaz et de poussière (tandis que la partie moins énergétique de leur spectre est absorbée). Ce type de population produirait un spectre différent de celui que l'on calculait et qui, peut-être, correspondrait mieux aux observations.

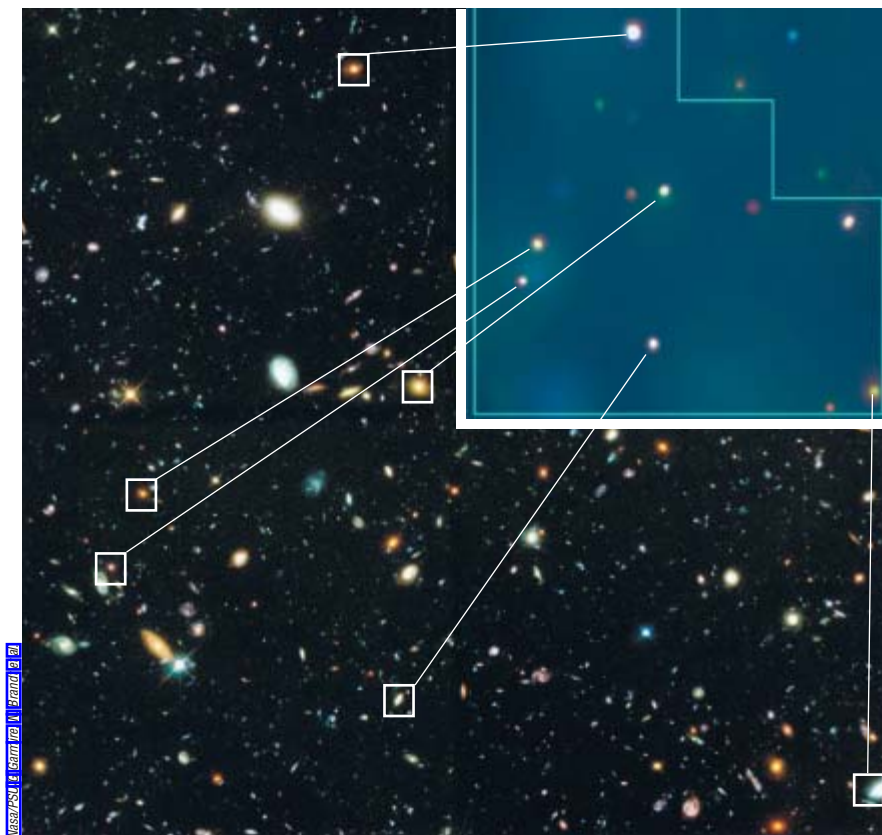
Les théoriciens ont alors utilisé la synthèse de population pour déterminer la combinaison de noyaux actifs de galaxies qui explique le spectre du fond diffus, en tenant compte de la façon dont ces objets évoluent au cours du temps. Ainsi, Andrea Comastri et ses collègues de l'Institut Max Planck de Garching, en Allemagne, ont montré que les modèles de synthèse de population expliquent le spectre du fond diffus en rayons X jusqu'à environ 300 kiloélectronvolts si la majorité (80 à 90 pour cent) de l'énergie produite dans le trou noir est voilée par un nuage épais. En retour, pour expliquer l'intensité de l'émission reçue, on doit considérer que le nombre de trous noirs supermassifs est beaucoup plus grand que prévu. On

pense qu'ils se sont formés dans presque toutes les galaxies. Ces monstres seraient peut-être passés inaperçus sans l'étude du fond cosmique dans le domaine des rayons X.

Signalons qu'un paradoxe semblable a été résolu de façon analogue dans les domaines visible et infrarouge. Le fond diffus visible est la somme des émissions des étoiles, décalées vers le rouge par effet Doppler en raison de l'expansion de l'Univers. Le fond infrarouge a un spectre identique à celui de la poussière chauffée par le rayonnement stellaire à des températures comprises entre 10 et 100 kelvins (et, lui aussi, décalé vers le rouge). L'énergie correspondant à l'émission de poussière doit, au bout du compte, prendre sa source dans les étoiles (et les noyaux actifs de galaxies). Cependant le fond diffus infrarouge est plus brillant que le fond diffus visible... comme si la Lune, qui réfléchit la lumière du Soleil, était plus brillante que le Soleil! Comme précédemment la solution consiste à supposer qu'une fraction notable des sources de rayonnement dans l'Univers est occultée par du gaz et de la poussière : les étoiles formées dans l'Univers jeune sont beaucoup plus nombreuses que prévu, mais elles sont masquées par la poussière, la composante visible du fond diffus ne représentant, pour ainsi dire, que la partie émergée de l'iceberg stellaire.



4. LE FOND DIFFUS est produit par l'ensemble des objets célestes qui ont peuplé l'Univers. Ce spectre, établi par les astronomes à l'aide de leurs observations (les points noirs), présente quatre maxima qui correspondent aux différents rayonnements produits. La lumière fossile du plasma primordial décalée vers le rouge par l'expansion universelle domine la composante dans le domaine des micro-ondes : c'est le fond diffus cosmologique. Le fond infrarouge est produit par les poussières qui emplissent les galaxies et qui sont chauffées surtout par la formation d'étoiles. La partie optique du fond diffus correspond à l'émission des étoiles libres de toute poussière ; enfin, celle du domaine X est engendrée par des trous noirs supermassifs tapis au cœur de nombreuses galaxies.



6. DES GALAXIES DISTANTES dont on sait maintenant qu'elles sont pleines de poussière interstellaire apparaissent sur cette image connue sous le nom de champ profond de Hubble. Sur l'image de la même région réalisée par le satellite *Chandra* sensible aux rayons X (dans le cartouche) apparaissent des sources très brillantes – probablement des trous noirs supermassifs – auxquelles on peut associer des galaxies apparaissant sur l'image reprise dans le domaine visible.

d'entre nous (G. Hasinger) a utilisé le télescope spatial sensible aux rayons X, *XMM-Newton*, et le satellite sensible à l'infrarouge *ISO*, pour estimer que les noyaux actifs contribuent à environ 15 pour cent du fond infrarouge.

Elise Archibald et ses collègues du Centre d'astronomie de Hilo, à Hawaï, ont expliqué ces découvertes par une séquence naturelle de formation galactique. Selon leur scénario, chaque galaxie se forme autour d'un petit trou noir d'environ 1 à 1 000 masses solaires qui lui sert de graine. À ce moment, le flux de la galaxie est essentiellement dû à la lumière stellaire. Par la suite, le trou noir croît rapidement en avalant de la matière. Après environ 500 millions d'années, le trou atteint un milliard de masses solaires et devient si brillant qu'il masque l'éclat des étoiles : un quasar est né. Après une période d'intense activité, ce quasar ayant aspiré le combustible disponible s'endort jusqu'à ce que, à la faveur d'une rencontre rapprochée, une autre galaxie lui fournisse du gaz qui tombera à nouveau vers le centre, où que les deux

trous noirs galactiques fusionnent. Simultanément, ces événements déclenchent d'intenses flambées de natalité stellaire qui enrichissent l'ensemble en poussière et se signalent par une émission infrarouge intense.

Certaines pièces manquent encore à ce puzzle. Aurions-nous, par exemple, oublié, dans notre recensement, des galaxies trop diluées et trop étendues pour que nos instruments les détectent ? Par ailleurs, nous ne savons pas expliquer le fond diffus gamma. Nous ne connaissons principalement qu'un type de source susceptible de le produire : les blazars. Ce sont des noyaux actifs de galaxies, plus gros et plus turbulents encore que ceux qui contribuent au fond diffus X. Toutefois, les synthèses de population que l'on réalise à partir de ce que nous savons des blazars ne rendent pas compte de tout le flux gamma du fond diffus. De nouveaux relevés, plus complets, seront nécessaires. Des instruments dans les domaines infrarouge, radio et X, devraient bientôt voir le jour, qui nous aideront dans cette tâche.

La clarté nocturne

Il n'y a pas si longtemps, les astronomes se demandaient pourquoi le ciel nocturne est noir. En effet, dans un univers infini empli d'étoiles, toute direction prise au hasard devrait, à un moment ou un autre, rencontrer une étoile. Certes, plus cette étoile est lointaine et plus son éclat nous paraît faible. Toutefois, cet effet est exactement compensé par le fait que, si les étoiles sont réparties de façon assez uniforme dans l'Univers, le nombre d'étoiles vues croît comme le carré de la distance à laquelle on regarde. De ce fait, le ciel devrait être aussi lumineux que la surface du Soleil. En 1848, ce mystère, connu sous le nom de paradoxe d'Olber, fut résolu par... Edgar Allan Poe ! Dans un poème en prose intitulé *Eurêka*, il suggéra que la noirceur de la nuit prouve que l'Univers n'a pas toujours existé et que les étoiles n'ont pas eu le temps de l'emplir de leur lumière. Cette hypothèse a résisté à l'épreuve du temps et elle est considérée, désormais, comme une des grandes observations cosmologiques sur lesquelles repose la théorie du Big Bang. Toutefois, nous savons aujourd'hui que le ciel nocturne est imprégné d'un faible fond diffus constitué de toutes les longueurs d'onde. Grâce, en partie, à la théorie du Big Bang et au modèle standard de la cosmologie, nous avons fait beaucoup de progrès dans l'explication de ce fond diffus... mais il est amusant de penser que, tandis que les penseurs du XIX^e siècle ont expliqué pourquoi la nuit n'est pas d'une clarté aveuglante, nous devons, quant à nous, comprendre pourquoi elle n'est pas totalement noire.

Günther HASINGER est astronome à l'Institut Max Planck de Garching, en Allemagne. Roberto GILLI est astrophysicien à l'Observatoire de Florence, en Italie.

G. HASINGER, R. BURG, R. GIACCONI, M. SCHMIDT, J. TRÜMPER et G. ZAMORANI, *The ROSAT Deep Survey I : X-ray Sources in the Lockman Field*, in *Astronomy and Astrophysics*, vol. 329, n° 2, pp. 482-494, janvier 1998.

R. GILLI, M. SALVATI et G. HASINGER, *Testing Current Synthesis Models of the X-ray Background*, in *Astronomy and Astrophysics*, vol. 366, n° 2, pp. 407-417, février 2001.

G. LAGACHE et B. GUIDERDONI, *La face cachée des galaxies*, in *Pour la Science*, n° 296, pp. 52-59, juin 2002.

La correction des erreurs de raisonnement

OLIVIER HOUDE • SYLVAIN MOUTIER • LAURE ZAGO • NATHALIE TZOURIO-MAZOYER

Pour la première fois, on a mis en évidence que les erreurs de raisonnement ont un support cérébral : l'activation des «mauvaises» aires cérébrales entraîne des erreurs. Quand on apprend à inhiber ces activations perturbatrices, la déduction logique se met en place.

Depuis Aristote, on sait que l'essence du raisonnement humain est le *logos*, c'est-à-dire à la fois la raison (logique) et le langage. Toutefois, au XVII^e siècle, René Descartes nous a aussi montré, dans sa *Méthode*, que l'homme doit apprendre à rediriger son esprit, des erreurs de raisonnement vers la pensée logique.

Selon Jean Piaget (1896-1980), psychologue de l'enfant à l'Université de Genève, c'est à l'adolescence, vers 14-15 ans, que se met en place la pensée logique ou formelle, dite hypothético-déductive. Piaget s'est attaché à montrer que la logique est la forme optimale de l'adaptation biologique, construite par étapes successives, du cerveau du bébé à celui de l'adolescent, c'est-à-dire des adaptations sensorielles et motrices élémentaires aux adaptations cognitives, d'abord concrètes, puis formelles. La clé du développement et du fonctionnement cognitifs est alors la coordination logique des informations. Si Piaget, biologiste de formation, mais psychologue de profession, envisageait bien une réalité cérébrale correspondant au stade des opérations formelles, il lui manquait les méthodes d'imagerie cérébrale pour l'observer. Il s'est donc limité à l'étude expérimentale des mécanismes psychologiques des opérations logiques.

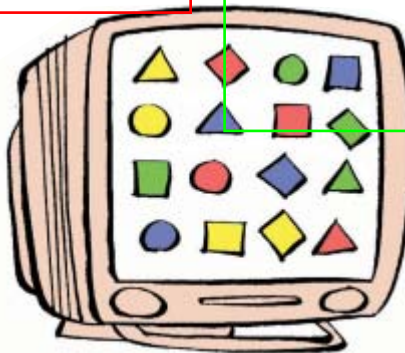
Contrairement à cette théorie, la psychologie cognitive du raisonnement a démontré durant les années 1960-1980 que, dans certaines situations, les adolescents et les adultes – logiques selon Piaget – font systématiquement des erreurs de déduction, nommées biais de raisonnement, ce qu'avait pressenti Descartes. Dès lors, un enjeu important des neurosciences cognitives, de la psychologie du développement et des sciences de l'éducation est l'étude des bases cérébrales des erreurs ou des biais de raisonnement, et celle des mécanismes qui permettent de rediri-

ger l'esprit vers la pensée logique. Pour ce type d'étude, on utilise la procédure de l'apprentissage expérimental – une sorte de «pédagogie de laboratoire», qui modifie la capacité à réaliser une tâche sous l'effet d'une interaction contrôlée avec l'environnement.

Du cerveau perceptif au cerveau logique

C'est ce que nous avons entrepris dans des expériences d'imagerie cérébrale fonctionnelle utilisant la technique de la tomographie par émission de positons, laquelle donne accès à l'activité cérébrale. Ces études ont été réalisées dans le Groupe d'imagerie neurofonctionnelle dirigé par Bernard Mazoyer. On demande, par exemple, aux participants de lire, sur un écran d'ordinateur, une règle déductive du type : «S'il y a un carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite», puis de sélectionner avec la souris de l'ordinateur deux formes parmi diverses figures affichées (des formes géométriques simples de couleurs variées), celles qui rendent la règle vraie : la totalité des personnes placent un carré rouge à gauche et un cercle jaune à droite. On peut aussi introduire une négation dans le conséquent (la deuxième proposition) : «S'il y a un losange bleu à gauche, alors il n'y a pas de carré vert à droite.» Dans ce cas aussi, tous les participants réussissent (voir la figure 2).

Rien d'étonnant. En revanche, on est davantage surpris par le résultat d'un autre test. La nouvelle règle déductive est : «S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite», et l'on doit sélectionner avec la souris deux formes géométriques qui rendent la règle fausse. Les psychologues et les logiciens nomment ce type de test une tâche de réfutation de règles conditionnelles.



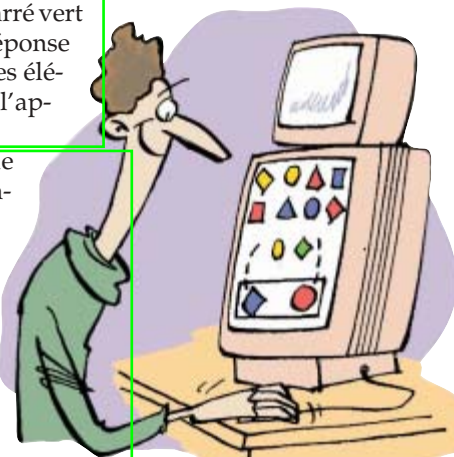
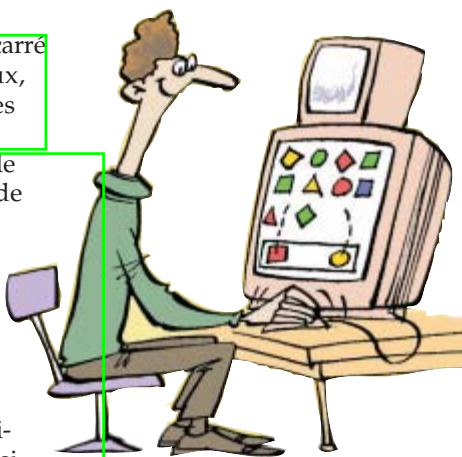
1. LES DIFFÉRENTES EXPÉRIENCES réalisées sur des volontaires par les auteurs utilisent un ordinateur. On doit sélectionner les formes et les couleurs qui répondent à des «règles déductives».

Quelles formes auriez-vous sélectionnées? Un carré rouge à gauche d'un cercle jaune? C'est faux, mais rassurez-vous, plus de 90 pour cent des personnes testées se trompent!

C'est une erreur de logique nommée par le psychologue Jonathan Evans, de l'Université de Plymouth, biais d'appariement perceptif. Pourtant, il s'agit d'un problème élémentaire de déduction. En fait, l'adulte se laisse piéger par la perception des éléments cités dans la règle, ici le carré rouge et le cercle jaune, en oubliant, d'une part, que la première proposition, l'antécédent, est une négation et, d'autre part, que l'on veut rendre la règle fausse. S'il raisonnait selon la table de vérité logique, il choisirait une situation où l'antécédent de la règle est vrai (pas un carré rouge) et le conséquent faux (pas un cercle jaune) : il proposerait, par exemple, un carré vert à gauche d'un losange bleu. Dans ce cas, la réponse logique consiste à aller contre la perception des éléments cités dans la règle, c'est-à-dire contre l'appariement perceptif.

Face à un tel taux d'échec dans une tâche qui ne semble *a priori* pas compliquée, on s'interroge sur les mécanismes aboutissant à ce type d'erreurs de raisonnement. Pour aborder cette question, nous avons postulé que la difficulté pour l'adulte tient ici à ce que deux stratégies de raisonnement entrent en compétition, se télescopant dans «l'espace mental de travail». Nous pensions – et nous verrons comment nous l'avons montré – que l'une des stratégies est «perceptive» et l'autre «logique»; les erreurs surviennent quand on ne parvient pas à inhiber la stratégie perceptive – sans qu'il s'agisse pour autant d'un problème de logique.

Pour le montrer, nous avons d'abord testé par des études de psychologie expérimentale l'efficacité de différentes conditions d'apprentissage (voir l'encadré pages 50 et 51) :



2. LORS DES TESTS HYPOTHETICO-DEDUCTIFS, on demande aux volontaires de déplacer des formes colorées présentées sur un écran d'ordinateur pour répondre à des règles déductives du type : «S'il y a un carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite (*en haut*) ou «S'il y a un losange bleu à gauche, alors il n'y a pas de carré vert à droite (*en bas*). La totalité des personnes testées réussit ces deux problèmes.



Tous les dessins sont de Jean-Marie Tine

3. POUR RESOUDRE ce test déductif, on doit rendre fausse la règle : «S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite.» Ici, le personnage s'est trompé, mais il est dans la norme, puisque 90 pour cent des personnes testées proposent comme réponse : un carré rouge à gauche d'un cercle jaune. C'est une

erreur d'appariement perceptif. Pour rendre la règle fausse, il faut rendre l'antécédent vrai, c'est-à-dire ne pas mettre de carré rouge à gauche (on met, par exemple, un carré vert) et rendre la conclusion fausse, c'est-à-dire ne pas mettre un cercle jaune à droite (on place, par exemple, un losange bleu à droite).

l'inhibition de la stratégie perceptive, l'explication logique et la simple répétition de la tâche.

Lors de l'inhibition de la stratégie perceptive, on tente d'inhiber les appariements perceptifs impulsifs en prévenant le participant des pièges de raisonnement qui lui sont tendus. On le met en garde afin qu'il ne se laisse pas abuser par les formes ni par les couleurs, mais qu'il porte toute son attention sur la consigne logique. On constate que seul cet apprentissage est efficace : le taux de réussite, initialement inférieur à 10 pour cent, devient supérieur à 90 pour cent. Les deux autres stratégies (la seule explication logique et la simple répétition de la tâche) n'améliorent pas les scores initiaux. Ceci indique que c'est bien le

mécanisme de blocage qui faisait défaut aux personnes interrogées et non pas la logique.

Nous avons alors repris la même procédure en utilisant la tomographie par émission de positons pour observer ce qui se passe dans le cerveau des personnes avant et après l'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive. Les résultats révèlent une reconfiguration des réseaux cérébraux, de la partie postérieure du cerveau à sa partie antérieure, préfrontale (voir la figure 4). Il ne suffit donc pas d'avoir atteint, à l'adolescence, le «stade des opérations logiques formelles» défini par Piaget pour être «préfrontal» et logique.

Si la logique est bien la forme optimale de l'adaptation biologique, on constate que dans le cerveau en action, à tout

Les conditions d'apprentissage : une pédagogie expérimentale

Reprenons la tâche mentionnée au début de l'article. La règle déductive est : «S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite», et l'on doit sélectionner sur un écran d'ordinateur deux formes géométriques qui rendent la règle fausse. Pour améliorer le mauvais score des participants à ce test (90 pour cent de réponses fausses), on dispose de trois types de stratégies d'apprentissage : l'inhibition de la stratégie perceptive, l'explication logique et la répétition de la tâche.

Éliminons d'emblée la troisième qui ne donne aucun résultat : la répétition d'une «tâche piège», pour laquelle on ne comprend pas l'origine de l'erreur, ne corrige pas l'erreur.

Dans la condition d'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive, on tente d'inhiber les biais de raisonnement, c'est-à-dire les appariements perceptifs sources d'erreur. Pour ce faire, on émet des «alertes» qui préviennent le participant des pièges de raisonnement. On lui explique d'où vient l'erreur, on le met en garde pour qu'il ne tombe pas dans le piège, c'est-à-dire qu'il ne se laisse pas abuser par les formes et par les couleurs en oubliant la consigne logique. Dans la troisième stratégie (l'explication logique), on se contente d'expliquer la logique de la tâche sans expliciter les causes des erreurs. Dans ces procédures, on veille à ce que l'apprentissage ne soit pas simplement une instruction spécifique des bonnes et des mauvaises réponses (un apprentissage de type «perroquet»), mais qu'il porte sur un mécanisme cognitif plus général.

Comment procède-t-on ? Nous présentons quatre cartes (A, D, 3 et 7) chacune ayant, d'un côté une lettre, de l'autre un chiffre. Les quatre cartes sont disposées face aux personnes testées qui doivent indiquer quelle(s) carte(s) il est indispensable de retourner pour vérifier la règle : «S'il y a un A d'un côté d'une carte, alors il y a un 3 de l'autre.» La réponse erronée correspondant à un biais d'appariement perceptif serait A et 3. Ce problème est connu sous le nom de test de Wason.

Pour vérifier la règle, on doit effectivement retourner A pour savoir si oui ou non il y a un 3 au dos, mais il est inutile de vérifier ce qu'il y a au dos du 3 : ou bien c'est un A et la règle n'est pas mise en défaut ; ou bien c'est un D et la condition requise (il y a un A d'un côté) n'est pas remplie : dès lors, la carte 3 ne peut pas rendre la règle fausse. En revanche, la seconde carte à tirer est le 7 : si de l'autre côté du 7, on a un A, la règle est fausse ! Ainsi, la réponse correcte est A et 7, car seules ces deux cartes sont susceptibles de rendre la règle fausse, c'est-à-dire de présenter un cas où l'antécédent est vrai (A) et le conséquent faux (non-3).

Au début de l'apprentissage, tous les participants font l'erreur et proposent la paire A et 3 (voir la figure a). On procède alors aux deux procédures d'apprentissage choisies : l'explication logique (voir le scénario b) et l'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive (voir le scénario c). Dans l'explication logique, on explique de façon très «froide» la façon de réfléchir pour réussir ce test (b₁).



Lors des tests d'apprentissage, on demande de choisir parmi quatre cartes celles qu'il faut retourner pour vérifier l'application de la règle : «S'il y a un A d'un côté d'une carte, alors il y a un 3 de l'autre.» Avant l'apprentissage, la quasi-totalité des sujets se trompent.

moment, y compris chez l'adulte, plusieurs stratégies de raisonnement peuvent se télescoper, entrer en compétition, les réponses perceptives prenant alors souvent le pas sur les réponses logiques ; de surcroît, c'est l'inhibition cognitive, déclenchée ici par un apprentissage expérimental, qui se révèle être la clé de l'accès à la logique déductive. Ainsi, la clé de l'énigme du fonctionnement cognitif n'est pas à chercher uniquement dans la coordination logique des informations, mais aussi dans une fonction d'inhibition et de filtrage de certaines de ces informations. À l'issue d'un apprentissage strictement logique – généralement inefficace – on n'observe pas de reconfiguration des activations cérébrales, de l'arrière du cerveau vers l'avant.

Les bases cérébrales de l'erreur humaine

Plus précisément, les régions activées avant l'apprentissage, lorsque les participants font l'erreur d'appariement perceptif dans plus de 90 pour cent des cas, correspondent à un réseau neuronal postérieur bilatéral incluant à la fois des aires unimodales, c'est-à-dire liées à une modalité sensorielle particulière, notamment la vision, et à des aires hétéromodales (où plusieurs sens sont traités). Il s'agit de zones situées à l'arrière du cerveau (régions occipito-temporales) et sur le dessus (régions pariétales) et, enfin, de régions situées dans les gyrus temporaux moyen et supérieur gauches et dans le gyrus angulaire gauche (voir la

Dans l'autre méthode d'apprentissage (c_1), le «professeur» ne se contente pas de cet enseignement froid, mais donne en plus des «conseils d'inhibition», prévient lorsque l'«élève» risque de se laisser abuser par ses perceptions, fait intervenir une dimension émotionnelle dans son enseignement qui n'apparaît pas dans la méthode précédente. La procédure se termine lorsque les sujets atteignent le critère d'apprentissage, c'est-à-dire lorsqu'ils sont capables d'expliquer de façon autonome la résolution correcte de la tâche de

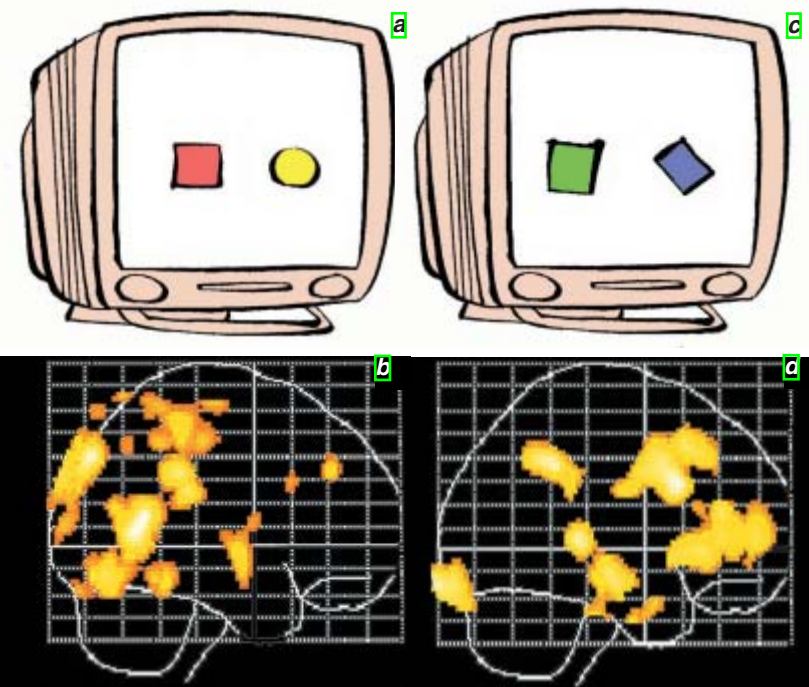
sélection de cartes. Ils finissent par réussir par l'une ou l'autre des procédures (b_2 et c_2). Sont-elles pour autant équivalentes ? Non, car dans la dernière étape de l'expérience, on refait le test avec la tâche initiale (rendre fausse la règle : «S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite») et l'on constate que la méthode d'explication logique échoue (b_3) tandis que la méthode d'apprentissage de l'inhibition des biais de raisonnement donne des résultats nettement meilleurs (c_3).

Pendant l'apprentissage

Après l'apprentissage



Pour améliorer les performances des sujets testés, on utilise soit l'apprentissage logique (b_1 à b_3), soit l'apprentissage de l'inhibition des biais de raisonnement (c_1 à c_3). La seconde méthode, où l'on met en garde contre les erreurs de raisonnement possibles, est plus efficace.



4. L'APPRENTISSAGE de l'inhibition des erreurs de raisonnement se traduit par une modification du débit sanguin cérébral. Lorsque les sujets se trompent quand on leur demande de rendre fausse la règle logique : «S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite» (a, mauvaise réponse), le débit sanguin est plus élevé dans les régions postérieures et perceptives du cerveau (b). Quand ils ont appris à inhiber leur erreur (c, bonne réponse), le débit sanguin est modifié, les régions antérieures (préfrontales) étant davantage activées (d).

figure 6). En comparant les images du cerveau avant et après apprentissage, on constate que certaines régions sont plus activées avant l'apprentissage. En faisant la soustraction des images obtenues avant apprentissage et après, on met ainsi en évidence les aires qui seront spécifiquement inhibées par l'apprentissage.

Ce réseau neuronal postérieur, impliqué dans les fonctions perceptives, démontre, pour la première fois, que les biais de raisonnement et les erreurs de logique ont des bases cérébrales. Aujourd'hui, on peut savoir, grâce à l'imagerie cérébrale fonctionnelle, ce qui se passe dans le cerveau humain quand il se trompe.

Ainsi, nous pensons que l'activation de la partie postérieure des gyres temporaux moyen et supérieur gauches (l'aire de Wernicke) et du gyrus angulaire gauche correspond à la lecture silencieuse de la règle. Toutefois, lors de cette lecture, le sujet se focalise trop sur les mots qui évoquent les formes colorées (le carré rouge et le cercle jaune, par exemple), de sorte que ces régions du cerveau sont plus activées avant l'entraînement qu'après. Ce résultat est particulièrement intéressant, car J. Evans avait fait l'hypothèse selon laquelle, quand nous découvrons un texte lu, dans la vie courante, nous nous focalisons, en présence d'une négation, sur la proposition qui est niée : nous ne retenons que la chose à éviter dans les interdictions (ne pas prendre la première à droite), ou l'objet qui n'est pas disponible (il ne reste plus de glace à la vanille).

De même, l'aire visuelle V4 sur la voie ventrale, spécifiquement impliquée dans la perception de formes colorées, serait activée par une focalisation «visuelle» sur les deux formes, ce qui aboutirait à leur sélection systématique

et erronée (on se focalise sur les deux formes et sur les deux couleurs en oubliant les consignes véhiculées par la règle logique). À cela s'ajoute la participation des régions occipito-pariétales de la voie dorsale, connues pour leur rôle dans le traitement perceptif de l'espace, en l'occurrence lorsqu'il faut distinguer la gauche de la droite. Puisque la règle logique fait appel à ces notions, il n'est pas étonnant que ces aires soient activées. On verra que le traitement logique de ces mêmes relations active, après l'apprentissage, d'autres régions du cerveau.

Autant d'éléments qui nous montrent que, dans une tâche de logique déductive, notre cerveau fonctionne spontanément à l'économie, c'est-à-dire en recrutant un réseau situé dans sa partie arrière, fortement impliqué dans la perception des mots, des formes et de l'espace, plutôt qu'en activant des régions préfrontales. Ceci explique pourquoi nous pouvons commettre des erreurs, tout en croyant répondre correctement. Ainsi, il existe bien une réalité biologique de l'«irrationalité», mais, ici, ce fonctionnement à l'économie, souvent efficace, est inadapté, car il s'agit d'une tâche de logique déductive et non d'appariement perceptif.

La correction des erreurs

Dans nos expériences, on enregistre des images par la caméra à positions avant et après l'apprentissage. Or, après l'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive, les participants donnent une réponse logique pour plus de 90 pour cent des tests. La comparaison des régions du cerveau qui sont plus activées après que le participant a appris à inhiber le biais de raisonnement qu'avant révèle, pour les mêmes individus soumis à la même tâche, l'activation d'un nouveau réseau neuronal préfrontal. Plus précisément, les régions activées correspondent à des zones hétéromodales (plusieurs sens sont traités) et à des zones paralimbiques, liées aux émotions (voir les figures 4 et 5). Chaque composante neuroanatomique du réseau activé peut être mise en relation avec une composante psychologique des mécanismes utilisés lorsqu'on apprend à inhiber le biais d'appariement perceptif et que l'on améliore l'accès à la réponse logique.

Ainsi, à droite, le cortex préfrontal ventromédian et le cingulum antérieur sont impliqués dans les rapports entre émotion et raisonnement, lorsque l'on prend conscience de ses erreurs et lorsque se manifestent des conflits entre les réponses possibles (ici l'erreur d'appariement résultant d'un conflit entre la perception et la logique). On reviendra sur ce point en analysant les résultats d'une autre expérience décrite ultérieurement.

Par ailleurs, à gauche, le gyrus frontal moyen, siège de la mémoire de travail, est activé (les informations sont stockées temporairement dans cette partie de la mémoire). Cette activation est imputable, après l'apprentissage, à la manipulation logique des propriétés des objets (formes et couleurs) et de l'espace (à gauche et à droite) ; avant l'apprentissage, le traitement perceptif direct l'emporte sur le traitement logique. Avec l'apprentissage, la stratégie change, le traitement perceptif spontané étant inhibé au profit d'un raisonnement logique. En atteste l'activation de la partie antéro-inférieure du gyrus frontal moyen, connu pour son rôle dans l'inhibition. Enfin, on constate que le gyrus frontal inférieur gauche, qui recouvre l'aire de Broca (l'aire du langage) est activé ainsi que l'insula antérieure gauche.

Or, dans la tâche proposée, le participant ne parle pas : pourquoi l'aire du langage est-elle activée ? Nous pensons qu'il s'agit de la trace d'un « langage intérieur » régulateur, intimement lié au raisonnement déductif : lorsque l'on est confronté à une tâche logique, on « se parle » pour la résoudre. Ce langage régulateur est sans doute lié ici à l'activité d'inhibition du traitement perceptif. En fait, dans le cortex préfrontal inférieur gauche, langage, logique et inhibition semblent étroitement liés ; la logique déductive exige, dans un cas comme celui qui nous préoccupe, l'inhibition de la perception, c'est-à-dire une abstraction.

Enfin, la pré-aire motrice supplémentaire (pré-AMS), dont on sait qu'elle participe à la sélection d'une réponse motrice en situation de compétition, est activée, car elle assure l'inhibition de la réponse d'appariement perceptif direct (carré rouge à gauche et cercle jaune à droite) et la sélection, avec la souris de l'ordinateur, de deux formes logiquement correctes (carré vert à gauche et losange bleu à droite).

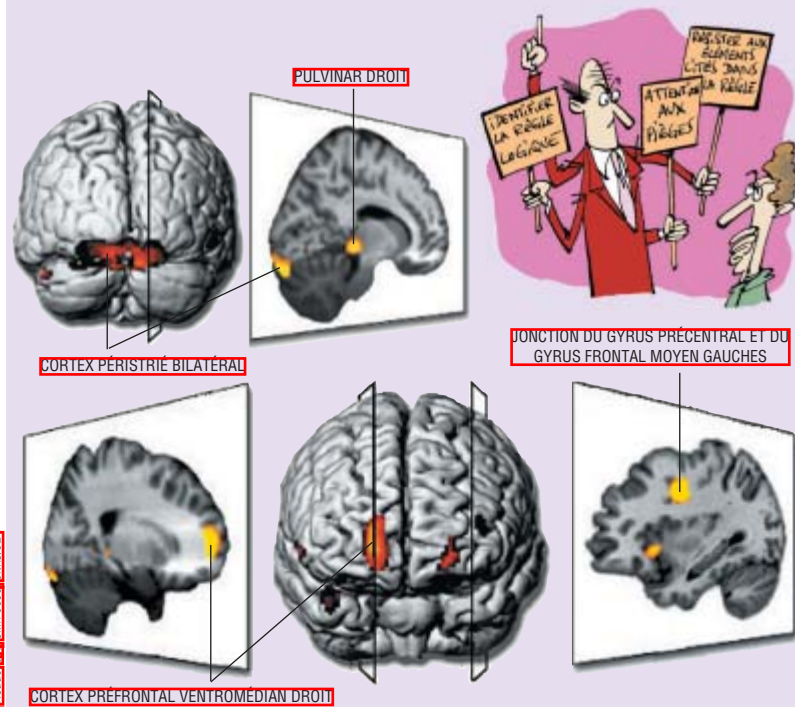
Quant aux autres régions, plus postérieures, notons que le gyrus parahippocampique est très certainement lié à la mémorisation des instructions de l'apprentissage, et le pulvinar, ainsi que le cortex péristrié, au filtrage des informations visuo-spatiales non pertinentes (carré rouge et cercle jaune). On sait qu'une lésion du pulvinar entraîne un déficit spécifique de cette fonction de filtrage.

La nouveauté introduite ici par l'imagerie cérébrale fonctionnelle est d'avoir démontré, pour la première fois, non seulement que les biais de raisonnement ont un support matériel, mais surtout que le cerveau humain, sous certaines conditions d'apprentissage, est capable de surmonter un tel biais. Toutefois, cette première expérience ne permet pas de dissocier, dans l'impact neuronal de l'apprentissage, ce qui relève spécifiquement de la composante exécutive (c'est-à-dire des alertes qui apprennent à inhiber le biais), de ce qui relève de la logique incluse dans toute tâche de raisonnement déductif.

Apprentissage froid et apprentissage émotionnel

Nous avons alors réalisé une nouvelle expérience d'imagerie cérébrale, toujours avec la technique de la tomographie par émission de positons, mais cette fois avec un groupe de personnes soumises seulement à la condition d'explication logique (et non plus à la condition d'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive). La condition d'apprentissage était strictement identique à celle de l'étude précédente, mais les alertes (les mises en garde des pièges, notamment) ont été enlevées de façon à soustraire la composante d'apprentissage de l'inhibition. Dans ces conditions, seule restait l'explication logique de la tâche, c'est-à-dire une condition que nous avons baptisée « apprentissage froid » par opposition au caractère émotionnel des alertes de l'apprentissage de l'inhibition.

Dans cette nouvelle expérience, nous voulions déterminer l'image correspondant à l'émotion seule. Nous disposons, par les expériences précédentes, de l'image correspondant à la somme de l'apprentissage à la logique et de la composante émotionnelle. En faisant ensuite la différence des deux, on devait isoler les signaux « émotionnels » spécifiques dus aux alertes émises lors de l'apprentissage de l'inhibition. Dès lors, on compare les

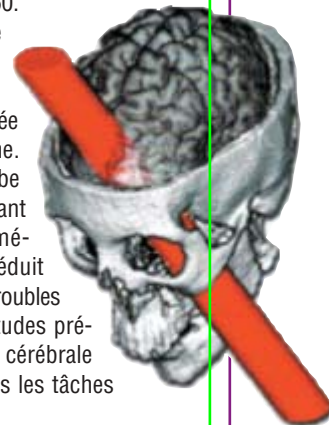


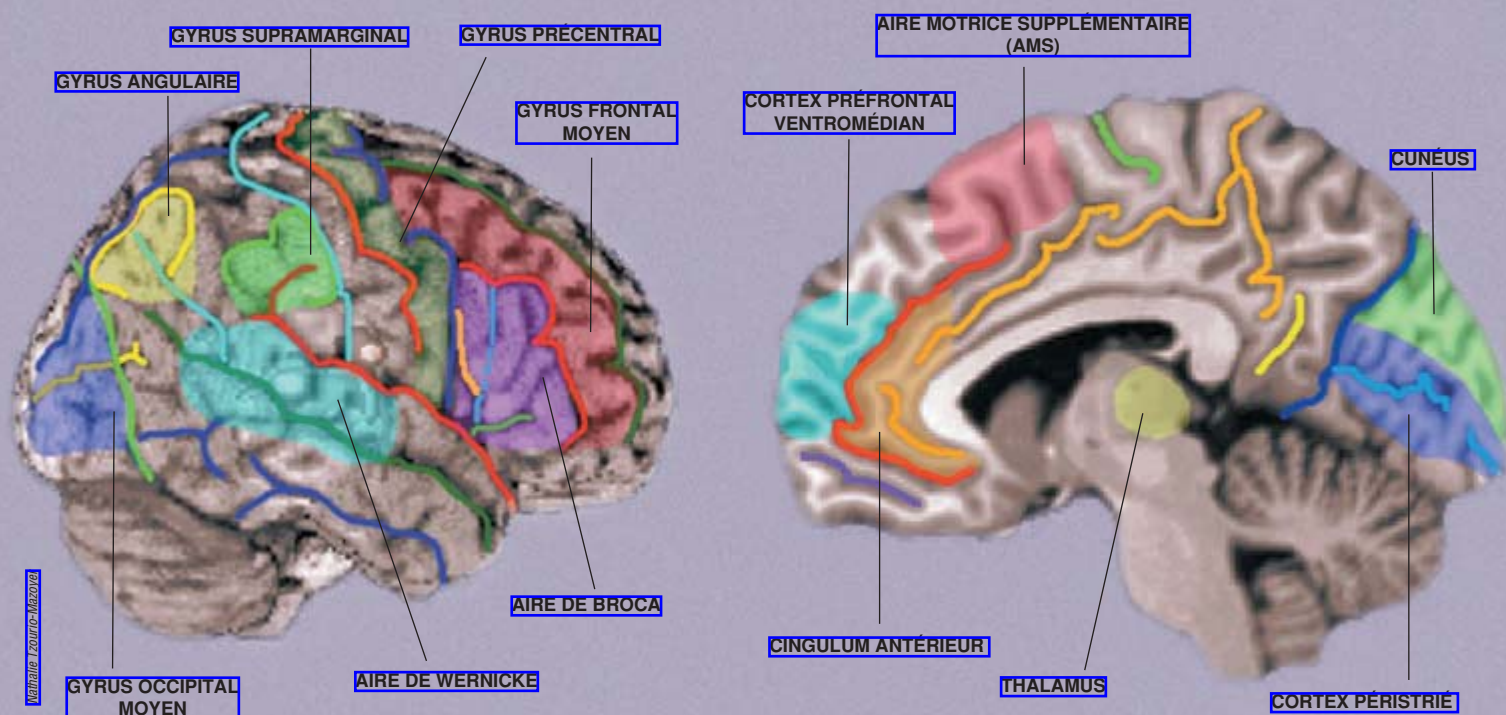
5. LES IMAGES obtenues par tomographie par émission de positons confirment que l'émotion joue un rôle important dans l'apprentissage, notamment lorsqu'il s'agit d'apprendre à corriger les erreurs de raisonnement. Ces cartographies de l'activation cérébrale ont été enregistrées sur des personnes ayant reçu l'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive, comparées aux personnes n'ayant reçu que l'apprentissage logique. Elles révèlent que certaines zones sont spécifiquement activées chez les sujets qui subissent le premier type d'apprentissage (chez les personnes recevant un apprentissage strictement logique et « froid », ces zones ne sont pas activées). Il s'agit du cortex préfrontal ventromédian droit, de la jonction des gyrus précentral et frontal moyen gauches, du pulvinar droit et du cortex péristrié bilatéral.

Un accident plein d'enseignements

En septembre 1848, Phineas Gage travaillait à la construction d'une voie ferrée en Nouvelle-Angleterre ; il fut victime d'une explosion au cours de laquelle une barre à mine de près de deux mètres de longueur lui transperça le crâne et le cerveau. Il survécut et, très rapidement après l'accident, Gage retrouva sa motricité, ses capacités linguistiques, sa mémoire et son intelligence générale. Toutefois, malgré cet apparent retour à la normale, il devint très vite irresponsable, grossier et capricieux, alors qu'il était auparavant responsable, socialement bien intégré et apprécié. Tout se passa comme s'il ne ressentait plus les émotions qui lui permettaient, avant son accident, de choisir les comportements appropriés. Il perdit son emploi et passa les 12 années qui suivirent à vagabonder, à s'exhiber dans un cirque, avant de mourir en 1860.

Dans les années 1990, à partir du crâne de Gage conservé à l'Université de Harvard, Hanna et Antonio Damasio ont reconstitué, grâce aux techniques d'imagerie assistée par ordinateur, le trajet de la barre à mine. Le résultat de cette autopsie d'outre-tombe est que Gage présentait des lésions touchant notamment le cortex préfrontal ventromédian droit. L'équipe d'A. Damasio en a déduit qu'une lésion de cette région provoque des troubles des émotions et du raisonnement. Les études présentées ici renforcent l'idée que cette aire cérébrale participe aux émotions mises en jeu dans les tâches de déduction logique pure.





6. UNE MODIFICATION DE L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE lors de l'apprentissage de l'inhibition a été mise en évidence par les auteurs. Dans les tests proposés, l'activité est plutôt localisée, avant l'apprentissage, dans les régions occipito-temporales (gyrus lingual gauche et gyrus fusiforme bilatéral ou aire visuelle V4), occipito-pariétales (gyrus occipital moyen bilatéral, cunéus droit, gyrus angulaire gauche, ou GA, et gyrus supramarginal bilatéral, ou GSM) et, enfin, temporales (gyrus temporal moyen gauche, gyrus temporal supérieur gauche ou aire de Wernicke). Toutes ces régions sont plus activées avant l'apprentissage qu'après. Au contraire, après l'apprentissage, on constate une reconfiguration de

l'activité cérébrale qui passe des régions postérieures dédiées en grande partie à la perception des mots, des formes, des couleurs et de l'espace, à des régions préfrontales, davantage liées aux émotions, à l'inhibition et à la logique. Les zones activées sont alors essentiellement, à droite, le cortex préfrontal ventromédian, le cingulum antérieur et, à gauche, le gyrus frontal moyen, le gyrus frontal inférieur (l'aire de Broca), l'insula antérieure, l'aire pré-AMS et le gyrus parahippocampique. On note aussi une activation bilatérale du cortex péristrié impliqué, avec le pulvinar (une région du thalamus), dans le filtrage visuel des informations. En couleur, les sillons qui séparent les territoires cérébraux.

résultats obtenus sur un groupe de participants soumis à l'apprentissage de l'inhibition (groupe inhibition) et un groupe soumis à l'apprentissage logique (groupe logique) et l'on fait la différence des deux.

Du point de vue comportemental, les résultats obtenus ont confirmé ceux de nos expériences psychologiques antérieures, à savoir que l'apprentissage strictement logique est inefficace, les participants continuant à se tromper, dans 90 pour cent des cas, après l'apprentissage. Cet apprentissage, trop «froid», ne déclenche pas une remise en question de la stratégie initiale de raisonnement ni la correction des erreurs perceptives.

Raison et émotion

Par la tomographie par émission de positons, nous avons montré que certaines zones sont spécifiquement activées dans le groupe ayant subi l'apprentissage de l'inhibition et qui, après cet apprentissage, réussit la tâche dans 90 pour cent des cas. Ces zones sont le cortex préfrontal ventromédian droit, la jonction des gyrus précentral et frontal moyen gauches, le pulvinar droit et le cortex péristrié bilatéral. Ces aires ne sont pas activées chez les participants qui reçoivent l'explication logique et qui persistent dans l'erreur (voir la figure 5).

Au regard de ces nouveaux résultats, plus circonscrits que les précédents, rappelons que, depuis le cas de Phineas Gage au XIX^e siècle jusqu'aux patients suivis aujourd'hui

par Antonio Damasio, à l'Université de l'Iowa, les données neuropsychologiques indiquent qu'une lésion du cortex préfrontal ventromédian droit provoque des troubles du raisonnement, de la prise de décision, des émotions et du «sentiment même de soi», selon l'expression d'A. Damasio. C'est en référence à ces données cliniques que ce dernier a suggéré que le bon usage de la raison, en particulier de la logique, dépend des émotions et du sentiment de soi. Selon lui, dans le fonctionnement normal, les émotions interviennent dans le raisonnement, notamment lors des tâches à connotation personnelle ou sociale qui impliquent des risques et des conflits. Toutefois, A. Damasio n'a jamais démontré l'implication directe du cortex préfrontal ventromédian droit dans une tâche de pure logique déductive, réellement cartésienne, réalisée par des sujets neurologiquement sains.

Compte tenu de la structure spécifique de la procédure d'apprentissage utilisée dans nos expériences, tout porte à croire que cette région du cerveau est ici impliquée dans l'émotion et le «sentiment même de soi» associés à la prise de conscience de l'erreur de raisonnement et au conflit qui naît entre perception et logique déductive. Autant d'éléments «infralogiques», déclenchés par les alertes de l'apprentissage, qui semblent indispensables pour inhiber le biais d'appariement perceptif, comme en atteste l'absence systématique d'activation du cortex préfrontal ventromédian droit chez tous les individus du groupe logique avec apprentissage «froid», où l'erreur n'est pas corrigée.

Du point de vue de la psychologie évolutionniste, ce résultat neurofonctionnel est à rapprocher du rôle classiquement imputé à l'émotion dans la survie, à savoir que la peur face à un danger conduit les animaux, dont l'homme, à fuir et à l'éviter. On peut dès lors avancer, en termes darwiniens, que l'évolution a dû façonner un cerveau qui ressent des émotions nécessaires pour inhiber les comportements inadaptés, y compris lorsqu'il s'agit de logique déductive. Contrairement à ce que pensait Piaget, le cerveau humain n'est pas, à l'image d'un ordinateur, un calculateur froid et logique.

Les résultats de cette seconde expérience d'imagerie cérébrale, associés à ceux de l'équipe d'A. Damasio, indiquent que l'émotion peut aider le raisonnement. L'un des rôles essentiels de l'hémisphère droit, fortement impliqué ici, résiderait dans le «traitement spatial des émotions», c'est-à-dire dans une sensibilité aux relations entre les émotions qui détermine le comportement approprié à une situation particulière.

De l'imagerie cérébrale à la pédagogie

Soulignons que ces résultats ne sont que les tout premiers sur les bases cérébrales de la correction d'erreurs et du changement de stratégie dans le raisonnement humain. Toutefois, ils apportent déjà quelques éléments de réponse aux trois questions clés débattues en psychologie cognitive du raisonnement : raisonnons-nous logiquement ? Pourquoi commettons-nous des erreurs de raisonnement ? L'émotion peut-elle aider le raisonnement ? À propos des deux premières questions, nous avons

constaté que, dans certains cas, le cerveau fonctionne spontanément à l'économie, en recrutant par exemple un réseau neuronal fortement ancré dans la perception, ce qui démontre la matérialité des biais de raisonnement. L'imagerie cérébrale a ici permis de comprendre comment le cerveau humain, si sophistiqué soit-il, peut commettre des erreurs de logique. Nos résultats ont également conduit à découvrir la plasticité du cerveau, en l'occurrence sa capacité à inhiber un biais de raisonnement pour accéder à la logique déductive : pour que nous raisonnions correctement, des stratégies d'inhibition du fonctionnement «spontané» du cerveau doivent se mettre en place. Il s'agit de la démonstration neuronale de la flexibilité intellectuelle. Quant à la dernière question, celle du rôle de l'émotion, on y répond en montrant que certaines régions cérébrales dédiées aux émotions et au sentiment de soi participent à l'inhibition d'un biais de raisonnement, ce qui permet d'accéder à la logique.

Comme l'a récemment souligné Mark Johnson, de l'Université de Londres, les nouvelles données d'imagerie cérébrale fonctionnelle sur l'apprentissage chez l'adulte nous apportent des indications intéressantes sur les mécanismes qui sont sans doute à l'œuvre dans le développement neurocognitif de l'enfant. De ce point de vue, les résultats exposés ici nous conduisent à tenir compte, en psychologie de l'enfant et en pédagogie, de deux mécanismes sous-estimés par la théorie de Piaget : l'inhibition des stratégies compétitives et l'émotion, indispensables au cerveau pour qu'il corrige ses erreurs de raisonnement.

Olivier HOUDÉ, professeur de psychologie cognitive à l'Université Paris-5 (Sorbonne) et à l'Institut universitaire de France (IUF), est responsable de l'équipe Développement et fonctionnement cognitifs dans le Groupe d'imagerie neurofonctionnelle, UMR 6095, CNRS-CEA, Universités de Caen et Paris-5, dirigé par Bernard MAZOYER, et où travaillent également Sylvain MOUTIER, Laure ZAGO et Nathalie TZOURIO-MAZOYER.

Antonio DAMASIO, *L'erreur de Descartes*, Éditions Odile Jacob, 1995.

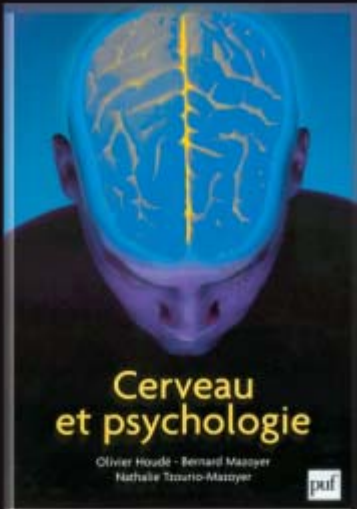
Antonio DAMASIO, *Le sentiment même de soi : Corps, émotions, conscience*, Éditions Odile Jacob, 1999.

Olivier HOUDÉ, *Inhibition and cognitive development : Object, number, categorization, and reasoning*, in *Cognitive Development*, vol. 15, pp. 63-73, 2000.

Olivier HOUDÉ et al., *Shifting from the perceptual brain to the logical brain*, in *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 12, pp. 721-728, 2000.

Olivier HOUDÉ et al., *Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling*, in *NeuroImage*, vol. 14, pp. 1486-1492, 2001.

Olivier HOUDÉ, Bernard MAZOYER et Nathalie TZOURIO-MAZOYER, *Cerveau et psychologie*, PUF, 2002.



Cerveau et psychologie
Olivier Houde - Bernard Mazoyer
Nathalie Tzourio-Mazoyer
puf

614 pages - 28 €

"La première synthèse française des données d'imagerie cérébrale et de psychologie expérimentale. Splendides images. Un ouvrage qui a sa place dans la bibliothèque de tout homme cultivé. Indispensable à lire et à méditer."
Jean-Pierre Changeux,
La Recherche

"Une brillante réussite. L'ouvrage est cohérent, le style clair et précis, les références toujours pertinentes."
Michel Imbert,
Pour la science

"Tous ceux qui s'intéressent aux énigmes du cerveau apprécieront l'exhaustivité de l'ouvrage."
Kheira Betayeb,
Science et vie

"Un événement !"
Hervé Ponchelet,
Le Point

"Un livre très richement illustré. Une référence."
Impact Médecin

puf

La taxonomie des courbes

MARCEL BERGER

Des mathématiciens explorent la diversité des courbes à la recherche de caractéristiques de classement. Vladimir Arnold a enrichi leur tâche en identifiant une nouvelle spécificité des courbes : l'«étrangeté».



L'univers des courbes a été profondément restructuré : le mathématicien russe, Vladimir Arnold, a découvert des liens de parenté insoupçonnés entre les courbes qui en précisent le classement.

De quelles courbes s'agit-il ? De celles que l'on peut dessiner à la main sur une feuille sans s'arrêter et qui se referment sur elles-mêmes ; par exemple, un cercle, un huit, un trèfle à quatre feuilles..., en bref les courbes fermées planes sans «angle». Ainsi les rectangles, les polygones, ou toute figure possédant un angle sont exclus, car pour leur tracé il faut stopper le crayon aux points angulaires. Il existe bien entendu une infinité de telles courbes fermées que les mathématiciens cherchent à classer.

Comme les entomologistes trient les espèces animales, les mathématiciens ont commencé par explorer l'espace des courbes à la recherche de caractéristiques communes : le nombre de fois où la courbe se recoupe, le nombre de régions qui la composent..., mais ces renseignements se sont révélés insuffisants pour singulariser les courbes. Les mathématiciens ont tenté alors une autre approche : transformer géométriquement les courbes afin d'identifier celles qui recèlent une similarité. Ainsi est apparue la notion d'«invariant», une propriété de la courbe conservée lors des transformations autorisées. L'invariant sert à identifier ces courbes ; c'est en quelque sorte leur nom de famille.

À la fin du XX^e siècle, les invariants mis au jour ne suffisaient pas à pleinement distinguer l'ensemble des courbes

planes. À partir de 1994, V. Arnold a fait progresser la discipline en élaborant un nouvel invariant, «l'étrangeté». Grâce à lui, les courbes ont gagné une nouvelle identité ; elles portent désormais un nom et un prénom.

Les cercles et les autres

Imaginons un quincailleur d'un genre un peu particulier qui vendrait les courbes fermées planes précédemment définies. Ses clients seraient des publicitaires à la recherche de sigles ou des architectes en mal d'inspiration. Afin de satisfaire rapidement ses clients, le quincailleur range l'infinité de courbes qu'il a en stock en catégories de même forme, ou «classes». Selon lui, deux courbes ont la même forme si en déformant l'une, on retrouve l'autre. En mathématique, ces déformations relèvent de la topologie, la branche des mathématiques où l'on ne se soucie pas du détail des formes, comme par exemple leur longueur ou leur courbure, mais où l'on veut déterminer si les formes sont transformables les unes dans les autres.

Quelles déformations le quincailleur-mathématicien autorise-t-il ? Seulement certaines, sinon toutes les courbes seraient équivalentes. On pressent, par exemple, qu'un huit et un cercle sont deux courbes différentes. Deux courbes ne seront pas équivalentes quand on ne peut passer de l'une à l'autre que par une étape de déformation interdite – une courbe à angle ou à point de rebroussement (voir la figure 2). Cette interdiction

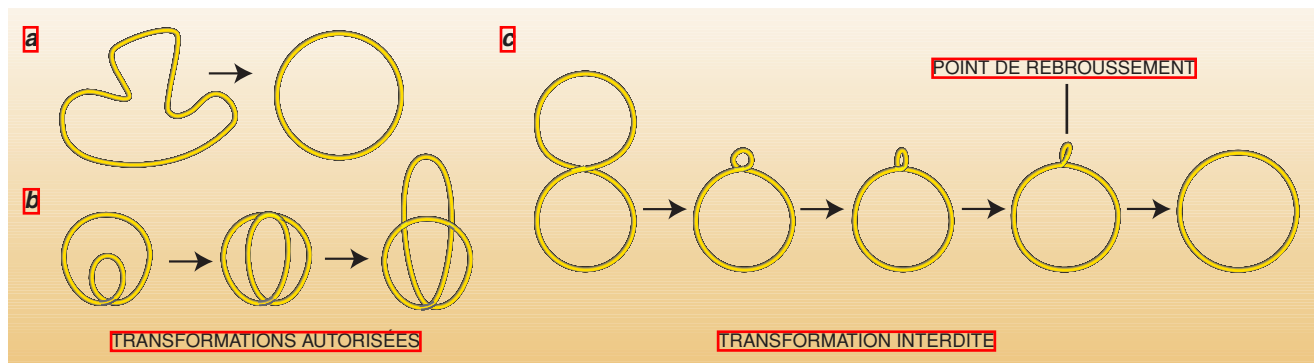
s'applique aussi aux courbes de départ ; en termes mathématiques, elles doivent avoir une dérivée non nulle par rapport aux deux variables du plan.

Par quelle catégorie de courbes le quincailleur commence-t-il ? Par celle dont nous avons le sentiment qu'elle est la plus simple : le cercle. L'ensemble des figures géométriques fermées qui ne se recoupent pas, tel le cercle, sont dites «simples». Camille Jordan, en 1900, en démontrant qu'«une courbe fermée simple possède un intérieur, qui est du point de vue de la forme, le même que celui d'un cercle, à savoir un disque», a mis un point final à leur étude. Ce qui est vrai pour l'intérieur des courbes l'est aussi de leur pourtour : si la surface intérieure est de la même forme qu'un disque, la courbe est de même forme que le cercle. Conclusion : il n'existe qu'une seule forme possible pour les courbes simples, celle du cercle.

Attaquons maintenant le cas général des courbes qui se croisent. Nous ramènerons le problème à des courbes particulières, que nous nommerons «stables». Cette notion est fortement suggérée par un résultat dû au mathématicien américain Hassler Whitney en 1937 : toute «petite» déformation (aussi petite que l'on veut) déforme

1. AFIN DE CLASSER l'ensemble infini des courbes planes, les mathématiciens ont élaboré, à partir des caractéristiques des courbes, des «invariants», des nombres qui se conservent lorsqu'on transforme une courbe en une autre. Toutes les courbes qui ont les mêmes invariants se rangent dans la même catégorie, le même tiroir.





2. LES TRANSFORMATIONS que l'on autorise pour déformer les courbes sont celles qui ne mènent ni à un angle ni à un point de rebroussement. En procédant ainsi, on permet à n'importe quelle courbe «simple»

– sans intersection – de se transformer en cercle (a), et à une boucle de traverser les branches de la courbe mère (b). En revanche, on interdit à une boucle de disparaître (c).

n'importe quelle courbe fermée en une courbe n'ayant que des points doubles simples, c'est-à-dire des points où ne passent que deux branches de la courbe, et où ces branches ne sont pas tangentes. Prenons l'exemple d'une courbe qui se coupe trois fois en certains points. Nous les nommerons points triples :



Quand nous écartons légèrement une branche, le point triple devient trois points doubles :



De même, un point double autotangent (où les deux branches sont tangentes) :



se transforme en deux points doubles simples :



ou en deux parties de courbe sans intersection :



Grâce à Whitney, toutes les courbes, aussi compliquées soient-elles du point de vue des intersections, se ramènent à des courbes n'ayant que des points doubles simples, les courbes stables. La dénomination «stable» est justifiée : après une petite déformation, une courbe stable demeure stable (ses points doubles simples ne se transforment pas en points triples, autotangents, ou autres), tandis qu'une courbe non stable devient nécessairement stable (elle perd ses intersections complexes). Remarquons que ce théorème de Whitney entraîne une propriété intéressante d'un point de vue probabiliste : si nous tra-

çons de façon aléatoire des courbes fermées sans angle, nous avons 100 pour cent de chances qu'elle soit stable, puisque les courbes non stables forment un ensemble de probabilité nulle.

Le territoire des courbes étant ainsi défriché, tentons de trouver des caractéristiques communes aux courbes stables. Deux caractéristiques des courbes stables sautent aux yeux : le nombre N de points doubles et le nombre de régions en lesquelles la courbe partage le plan. En fait, ces deux caractéristiques ne sont pas indépendantes : le nombre de régions est égal au nombre de points doubles additionné de deux.

Le compte-tours

Cependant, regardons les deux courbes de la figure 3. Elles ont deux points doubles et pourtant elles n'appartiennent pas à la même classe, comme nous le verrons rigoureusement par la suite. Le nombre de points doubles se révèle donc insuffisant pour distinguer certaines courbes.

Pour continuer la classification des courbes, les mathématiciens ont cherché des traits conservés durant les transformations, des «invariants». Les invariants sont essentiels dans tous les problèmes de classification, quelle que soit la discipline scientifique. Le nombre de points doubles n'en est pas un, puisque, par certaines transformations, nous pouvons ajouter des boucles (voir la figure 2). Le premier invariant que les mathématiciens ont trouvé est le nombre de rotation (ou d'enroulement) ; il est noté R et est égal, si nous ne demandons pas trop de rigueur, au nombre de fois dont la tangente à la courbe tourne le long du tracé. Puisque la courbe est fermée, en divisant ce nombre R par 2π , nous obtenons un nombre entier, plus agréable à manipuler ; il est tou-

jours pris positif (au besoin, on change le sens de parcours de la courbe). Pour le cercle, il est égal à 1 puisque la tangente tourne de 2π . Il en est de même pour la courbe tortueuse de la figure 4.

En fait, le théorème «de la tangente qui tourne» affirme que ce nombre de rotation est égal à 1 pour toutes les courbes simples (les courbes sans point double) : dans des courbes simples, mais sinueuses, la tangente paraît tourner plus, toutefois il y a finalement compensation quand elle «revient en arrière» (voir la figure 4). Une conséquence amusante est le «théorème du boulevard périphérique» : quelles que soient les contorsions du boulevard périphérique, la longueur de la voie extérieure n'excède celle de la voie intérieure que du produit de l'espacement entre les deux files par 2π . Si vous avez à parcourir la moitié du périphérique, inutile de prendre la voie intérieure pensant gagner du temps, vous ne gagneriez qu'une dizaine de mètres !

Bien que d'apparence simple, le théorème de la tangente qui tourne n'a été démontré qu'au XX^e siècle, la première fois de façon complexe en 1916 par Watson. En 1935, dans la même revue mathématique, Alexander Ostrowski et Heinz Hopf en ont publié chacun une autre preuve. Ostrowski a procédé en approximant la courbe par des polygones, en démontrant le théorème pour ceux-ci, puis en passant à la limite. Hopf, lui, a construit une déformation entre les tangentes à la courbe et les points d'un cercle parcouru à vitesse constante. Des deux démonstrations, celle de Hopf est la plus conceptuelle, celle d'Ostrowski, la plus simple.

Il existe un moyen simple d'évaluer le nombre de rotations d'une courbe à partir du nombre de points doubles. Il faut pour cela donner un

sens de parcours à la courbe et distinguer les points doubles orientés ainsi :



les points doubles dits positifs, en nombre N^+ , et ceux-là :



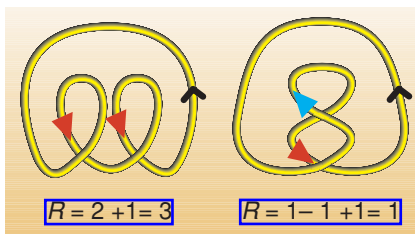
les points doubles négatifs, en nombre N^- . Comme ils correspondent tous deux à des boucles parcourues dans des sens différents, on sent bien que les contributions à R des points doubles positifs et négatifs se compensent. Whitney a démontré que le nombre de rotation de la courbe est égal à $N^+ - N^- + 1$ (l'ajout de 1 tient compte du fait que si la courbe n'a aucun point double, le nombre de rotation vaut déjà un). La figure 3 montre l'application de cette méthode à deux exemples.

Pourquoi le nombre de rotation est-il un invariant des transformations ? Puisque les déformations appliquées aux courbes sont continues, le nombre de rotation, s'il change, doit lui aussi évoluer continûment. Or c'est un nombre entier, donc condamné à varier par sauts. Il doit alors conserver sa valeur lors des déformations autorisées des courbes. Cela étant, pour être pertinent, le nombre de rotation ne doit pas être équivalent à l'autre nombre entier attaché aux courbes, le nombre de points doubles : deux courbes ayant le même nombre de points doubles doivent pouvoir posséder des nombres de rotation différents. C'est bien le cas des deux courbes de la figure 3.

Le quincaillier a maintenant classé ses courbes dans des piles en fonction du nombre de points doubles et du nombre de rotation (voir la figure 5). La pile des courbes à nombre de rotation nul et à un point double, par exemple, contient un seul exemplaire, le huit ; celle à deux points doubles et à nombre de rotation égal à 1, en contient trois :



Remarquons que si le quincaillier rangeait ces courbes dans des tiroirs étiquetés avec tous les couples (R, N) possibles, certains tiroirs resteraient vides, car pour une même courbe, R et N ne sont pas indépendants. Puisque $R = N^+ - N^- + 1$ et que N est la somme des points doubles positifs et négatifs, R ne dépasse jamais $1 + N$. Il est par exemple inutile d'essayer de tracer une courbe dont le nombre R est égal à quatre n'ayant que deux points doubles.



3. LE NOMBRE DE ROTATION se calcule à partir des nombres de points doubles positifs, N^+ (en rouge) et négatifs, N^- (en bleu) : $R = N^+ - N^- + 1$. Présentant deux points doubles, ces courbes au nombre de rotation différent n'appartiennent donc pas à la même classe.

Le quincaillier reste perplexe : certaines piles sont trop importantes, et de toute façon, il préférerait que chacune des piles ne contienne qu'une seule courbe, c'est-à-dire que l'ensemble des caractéristiques qui définissent la pile déterminent sans ambiguïté une seule courbe. Les vis que je vends, se dit le quincaillier, sont classées selon leur diamètre, leur longueur et le type de leur tête (un écrou ou une tête lisse) : j'aimerais qu'il en soit de même avec les courbes. Les deux courbes :



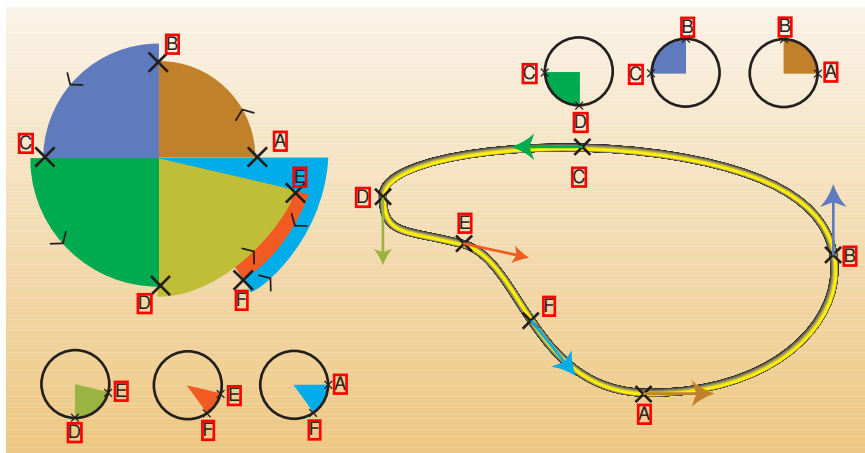
ont le même nombre de rotation - trois -, et le même nombre de points doubles - deux -, mais n'ont pas la même forme (encore une fois, on ne peut les transformer l'une dans l'autre avec les règles permises). Un moyen de les distinguer existe certainement.

L'étrangeté

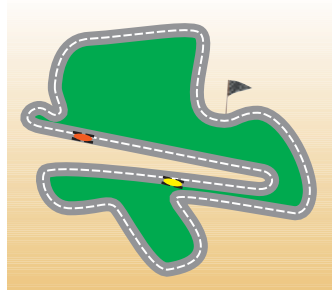
V. Arnold, des Universités de Paris-Dauphine et de Moscou, qui réfléchissait à des débouchés de la théorie des nœuds sur les mathématiques des courbes planes (voir la figure 7), a conçu un tel troisième invariant en 1994. Initialement obtenu par un savant calcul, la signification géométrique de ce nombre s'est révélé simple dans le cas de certaines courbes dites minimales. Les courbes minimales sont celles qui, pour un nombre de rotation donné, ont le moins de points doubles possibles. Par exemple, parmi les courbes à nombre de rotation égal à deux, il n'y a qu'une courbe minimale,



toutes les autres ont plus d'un point double. Pour se représenter géométriquement l'étrangeté chez cette famille de courbes, V. Arnold s'est inspiré des diagrammes du prince des mathématiciens, Carl Friedrich Gauss, au XIX^e siècle. Gauss avait imaginé ces diagrammes pour étudier les nœuds. Les courbes y sont représentées par des cercles : on parcourt le cercle en même temps que la courbe, et dès qu'on parvient à un point double, on marque un point sur le cercle, de sorte que chaque point double donne deux points sur le cercle ; on relie ensuite ces deux points par un segment. Le résultat obtenu est



4. LE NOMBRE DE ROTATION D'UNE COURBE SIMPLE vaut 1. Dans cet exemple, l'angle que fait la tangente à la courbe par rapport à l'horizontale augmente continûment entre les points A à E (la variation de l'angle entre chaque point est indiqué dans les cercles). Il diminue ensuite jusqu'au point F, à partir duquel il augmente à nouveau. La somme des variations de l'angle sur toutes les sections de la courbe (en haut à gauche) montre qu'après un tour de la courbe la tangente a tourné exactement de 2π , ce qui signifie que le nombre R de rotation est 1. Ce résultat est valable pour toutes les courbes simples, même si celles-ci sont très sinueuses, comme ici le circuit de formule 1 de Sepang en Malaisie (en bas à droite).



R \ N	0	1	2	3	4
0					
1					
2					
3					

5. ENSEMBLE DES COURBES qui possèdent de zéro à trois points doubles (N) et dont le nombre de rotation (R) est compris entre zéro et quatre. On voit que le nombre de courbes à N donné augmente rapidement avec N . Il a été démontré qu'il croît exponentiellement avec N .

un cercle traversé de cordes. Le diagramme de Gauss de la courbe précédente est ainsi :



V. Arnold (voir la figure 6) a transformé ces cercles en arbres de points où

chaque point correspond à une région intérieure au cercle comprise entre deux cordes. Par exemple, le diagramme précédent donne l'arbre :



Arnold a découvert sur cet arbre un

point qui joue un rôle particulier, qu'il a nommé la racine de l'arbre. On a l'habitude de marquer ce point en noir et de noter l'arbre de la courbe avec la racine en bas :

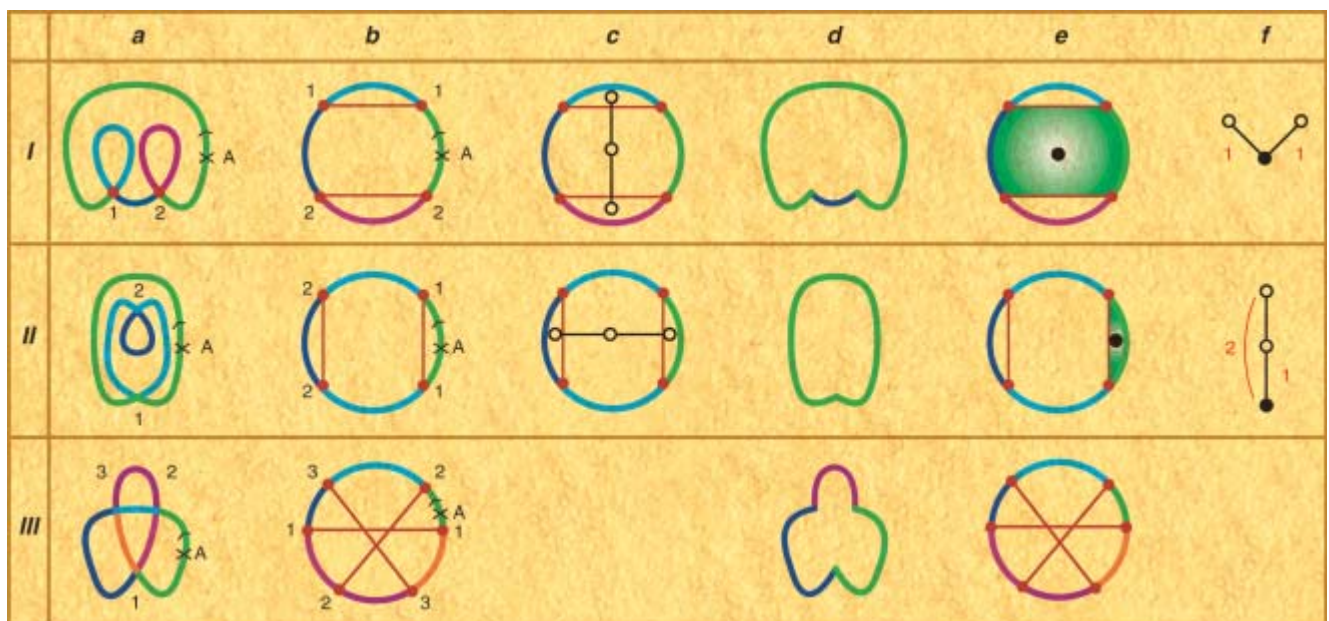


L'étrangeté se calcule ensuite comme la somme des distances (nombre de points à passer) séparant chacun des points de l'arbre à la racine.

La construction donnant l'étrangeté est détaillée sur la figure 6. Quand les branches des arbres n'ont qu'un seul point, comme dans le cas précédent, l'étrangeté est égale au nombre total de points, donc au nombre de points doubles N de la courbe. Quand l'arbre n'a pas d'embranchement, comme :



elle vaut $1 + 2 + 3 + \dots + N = N(N+1)/2$. L'étrangeté permet de distinguer les deux courbes que ni le nombre de points doubles ni le nombre de rotation ne suffisaient à différencier. Elle vaut deux pour la courbe (voir la figure 6) :



6. L'ARBRE D'UNE COURBE est établi en plusieurs étapes à partir d'une version découpée de la courbe en sections (a) indiquées par des couleurs différentes. Chaque section est une portion de la courbe comprise entre deux intersections. Ces sections sont ensuite mises bout à bout sur un cercle qui représente une version « dépliée » de la courbe. Puis on joint par des cordes les points du cercle qui correspondent aux mêmes intersections (b). Les cordes délimitent des régions de l'intérieur du cercle (les petits cercles de la figure c) que l'on relie ensemble quand elles sont adjacentes. Ces points reliés constituent l'« arbre » de

la courbe, dont l'un d'eux joue le rôle de racine. La racine est le point qui appartient à la région bordée par les cordes correspondant au pourtour extérieur de la courbe (d). Cette région est indiquée en vert (e). Perché sur sa racine, l'arbre devient la figure f et l'étrangeté est égale à 2 (somme des distances des points à la racine : $1 + 1$). Un autre exemple de ces opérations est représenté sur la ligne II, pour une courbe d'étrangeté 3 ($1 + 2$). Dans le cas d'une courbe non minimale (III) cette construction ne permet pas de trouver une racine de l'arbre et l'étrangeté n'a pas d'interprétation aussi simple.

7. Les courbes : le nœud de l'affaire

V. Arnold est parvenu à ses résultats sur les courbes par le biais de la théorie des nœuds. Les nœuds sont le pendant à trois dimensions des courbes : des cordes repliées sur elles-mêmes et qui sont nouées par endroits. V. Arnold pensait trouver dans la théorie des nœuds – où l'on cherche aussi à classer les nœuds en catégories – une source d'inspiration pour trouver de nouveaux invariants des courbes. Le lien théorique qu'il voulait établir entre ces deux types d'objets mathématiques provient d'une méthode précédemment découverte consistant à construire un nœud à partir d'une courbe plane. La méthode est peu intuitive : si l'on se contentait de «déplier» à trois dimensions la courbe plane, on obtiendrait une courbe non nouée. Cette méthode consiste à placer sur la troisième direction de l'espace (en plus des deux de la courbe), un axe gradué en degrés. Ensuite, on déplace la courbe le long de cet axe, et l'on marque les points de la courbe dont la tangente par rapport à l'horizontale est égale à la valeur de l'axe où l'on se trouve.

Prenons l'exemple présenté ci-dessous du cercle. Partons du point A, situé en bas du cercle. Puisque la tangente y est nulle, nous plaçons la courbe à la valeur 0° sur l'axe des tangentes et marquons d'un point rouge le point A. C'est le premier point du nœud. Ensuite, parcourons le cercle dans le sens trigonométrique : la tangente s'incline, si bien que nous devons avancer en même temps la courbe le long de l'axe des tangentes. Nous traçons ainsi les points rouges situés à droite de A sur la figure. Quand nous sommes au point B du cercle, la tangente est verticale, puis au point C, elle vaut 180° . Comme une tangente n'est pas

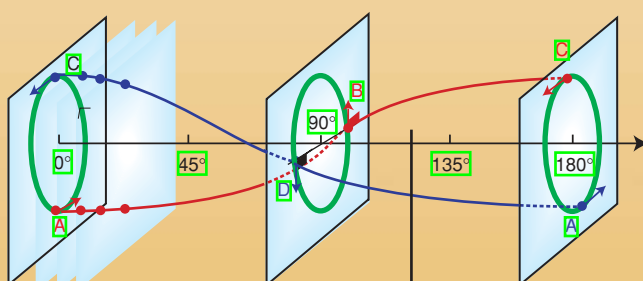
une droite orientée, 180° et 0° sont équivalents. Nous repartons donc à 0° pour recommencer l'opération le long de l'axe et continuer le tracé du nœud (courbe bleue). Ce dessin de la partie bleue nous fait revenir au point A. Pour obtenir le nœud, il nous reste à refermer l'axe des angles sur lui-même afin de superposer 0° et 180° : les différentes parties de la courbe se rejoignent et forment un nœud continu. En suivant ce procédé, un cercle donne une corde à deux boucles.

Le second exemple de nœud, dessiné à partir d'une courbe à un point double, a été tracé avec l'axe des angles déjà replié sur lui-même. Comme pour le cercle, les points A, B et C sont les points de la courbe dont la tangente est respectivement inclinée de 0° , 90° et 180° .

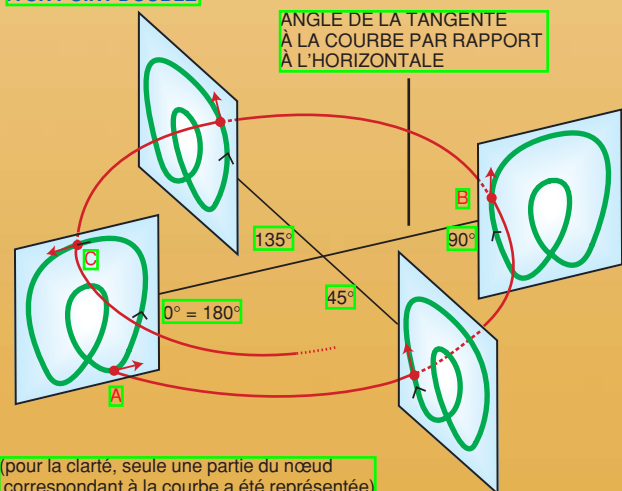
Nous pouvons préciser le volume de l'espace dans lequel les nœuds ainsi conçus se retrouvent. Puisqu'en définitive nous avons fait évoluer la courbe le long d'un cercle, le nœud est contenu dans l'enveloppe de la courbe (son pourtour) «multipliée» par le cercle, ce qui donne un volume délimité par un tore. L'analogie entre courbes et nœuds est telle que pour dénouer le nœud, il nous faut rester à l'intérieur de ce tore. Ainsi, bien que les deux nœuds de la figure soient dénouables dans l'espace tout entier, ils sont indénuables à l'intérieur du tore.

Ce lien entre courbes et nœuds ne fut pas aussi fructueux que V. Arnold l'escomptait, aussi dût-il explorer des voies inédites. Selon lui, malgré les apparences, l'univers des courbes planes est plus complexe que celui des nœuds dans l'espace.

CAS DU CERCLE

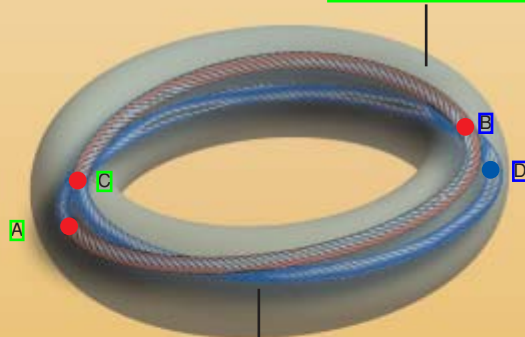


CAS D'UNE COURBE À UN POINT DOUBLE

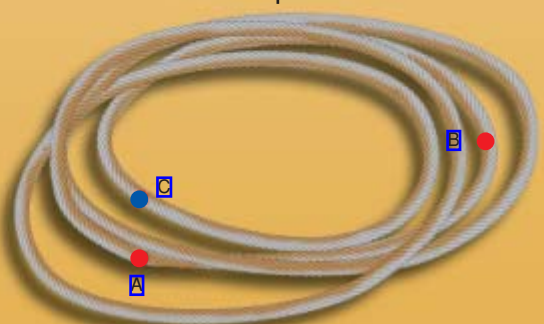


(pour la clarté, seule une partie du nœud correspondant à la courbe a été représentée)

TORE DANS LEQUEL S'ENROULE LE NŒUD



NŒUDS CORRESPONDANT AUX COURBES



R = 1																	
	St	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	4			
	J ⁺	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2	-8			
	J ⁻	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-9	-6	-6	-6	-6	-12			
	St	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3
	J ⁺	2	2	2	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-4	-4	-4	-6	-6
	J ⁻	-2	-2	-2	-4	-4	-4	-4	-4	-6	-6	-6	-8	-8	-8	-10	-10
	St	0	0	0	0	1	1	1	St	-2	1	1	1	2	2	St	0
	J ⁺	2	2	2	2	0	0	0	J ⁺	4	-2	-2	-2	-4	-4	J ⁺	0
	J ⁻	-2	-2	-2	-2	-4	-4	-4	J ⁻	0	-6	-6	-6	-8	-8	J ⁻	-4
R = 3																	
	St	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6			
	J ⁺	-4	-4	-4	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-12			
	J ⁻	-8	-8	-8	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-16			
	St	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5			
	J ⁺	-2	-4	-4	-4	-6	-6	-6	-8	-8	-8	-10	-10	-10			
	J ⁻	-6	-8	-8	-8	-10	-10	-10	-12	-12	-12	-14	-14	-14			
	St	2	3	3	St	0	3	4	4	St	2	2	2	2			
	J ⁺	-2	-4	-4	J ⁺	0	-6	-8	-8	J ⁺	-4	-4	-4	-4			
	J ⁻	-6	-8	-8	J ⁻	-4	-10	-12	-12	J ⁻	-8	-8	-8	-8			
R = 5																	
	St	6	7	10	St	5	6	8	9	St	4	7	7	7			
	J ⁺	-12	-14	-20	J ⁺	-10	-12	-16	-18	J ⁺	-8	-14	-14	-14			
	J ⁻	-16	-18	-24	J ⁻	-14	-16	-20	-22	J ⁻	-12	-18	-18	-18			

8. ENSEMBLE DES COURBES à quatre points doubles. On a indiqué leur nombre de rotation R , leur diagramme de Gauss (en mar-
ron), leur étrangeté St , et leurs deux autres invariants J^+ et J^- . Pour toutes les courbes, $J^+ - J^- = N$. Pour les courbes minimales, on a de surcroît $J^+ = -2 St$.

et trois pour la courbe :



Nous savons que cette construction ne concerne que les courbes minimales. Le diagramme de Gauss d'une courbe non minimale existe, mais on ne peut lui associer un arbre.

Le sens de l'étrangeté

La définition de l'étrangeté est relativement simple, mais en est-il autant de sa signification? Celle des deux premiers invariants était claire : le nombre de points doubles correspond à peu près au nombre de boucles de la courbe, tandis que le nombre de rotation exprime combien de fois on tourne sur soi-même en suivant la courbe. Quel sens attribuer à l'étrangeté? Rappelons que Whitney avait montré que deux courbes ayant même nombre de rotation se déduisent l'une de l'autre par une déformation où, à chaque instant de la déformation, la courbe n'a ni angle ni point de rebroussement. Cependant, dans le cas où les courbes n'ont pas la même forme, on rencontrera nécessairement des courbes intermédiaires ayant au moins l'une des intersections atypiques suivantes : des points triples, des points quadruples... des points doubles d'autotangence, des points triples d'auto tangence... Par exemple, pour faire disparaître une boucle, on passe nécessairement par une figure qui comporte un point d'autotangence (voir la figure 2b).

En fait, Whitney a démontré que l'on peut choisir la déformation de façon à ne rencontrer que des courbes ayant comme singularités au plus des points triples et des points d'autotangence, courbes nommées sous-stables. Par exemple, pour passer la boucle rouge de la courbe suivante :



par-dessus la première boucle, nul besoin de faire coïncider les deux points doubles en un point quadruple : on a toujours la possibilité de passer un seul brin de courbe à la fois par-dessus un point double (auquel cas le point

double se transforme en point triple) :



V. Arnold a montré que lorsqu'une courbe se déforme en une autre, le nombre minimum de points triples par lesquels elle passe est égal à la différence des étrangetés des deux courbes (en valeur absolue).

Deux autres invariants définis par V. Arnold ont une signification dans le contexte des transformations. Il s'agit de deux nombres, J^+ et J^- , qui se calculent à partir du nombre de points doubles positifs et négatifs, et du nombre de rotation de sous-parties de la courbe. La moitié de la différence des J^+ de deux courbes donne le nombre minimum de points d'autotangence positive :



par lesquels on doit passer pour transformer l'une dans l'autre. La moitié de la différence des J^- procure, elle, le nombre minimum de points d'autotangence négative :



Ces relations sont vraies pour toutes les courbes (qu'elles soient minimales ou non), mais dans le cas des courbes minimales, V. Arnold a mis en évidence que l'information contenue dans J^+ et J^- est redondante avec l'étrangeté. J^+ est alors simplement l'opposé de deux fois l'étrangeté.

Références incomplètes

Ni l'étrangeté ni J^+ ni J^- ne suffisent à classer complètement les courbes. Ces caractéristiques sont identiques pour les courbes :



Ces courbes possèdent quatre points doubles, représentent chacune trois tours de rotation, et leur étrangeté vaut quatre (voir la figure 8), mais la

forme de ces figures diffère. L'étrangeté est de moins en moins suffisante à mesure que le nombre N croît : tandis que le nombre de classes de courbes croît exponentiellement avec N (voir la figure 5), l'étrangeté, elle, ne varie que de N à $N(N+1)/2$.

Pour le quincaillier, les informations concernant les vis – leur taille, leur diamètre et le type de leur tête – suffisaient à les ranger. Pour les mathématiciens, la situation idéale, quand on peut y arriver, est semblable à celle du quincaillier : l'ensemble d'invariants est alors « caractéristique », c'est-à-dire que la connaissance de la totalité de ces invariants fournit exactement la classe désirée, ici la forme de la courbe (dans la limite où le nombre de courbes n'est pas infini, sinon le problème serait intraitable). Trouvera-t-on d'autres invariants qui compléteront ceux de Whitney et de V. Arnold?

Le lecteur pourra légitimement demander pourquoi aucun travail important n'est paru sur les courbes planes entre Whitney et V. Arnold. Risquons quelques opinions personnelles. Comme l'a dit Mikhael Gromov, les mathématiciens s'intéressent à un problème par curiosité, par intérêt personnel, et enfin, par effet de mode. Parmi ces problèmes, seul l'avenir dit quels sont ceux qui font progresser les structures essentielles des mathématiques. Pour les courbes, l'effet de mode était inexistant, et il semblait difficile de faire une œuvre vraiment nouvelle en travaillant sur les courbes planes. Autre raison : il fallait une idée nouvelle pour progresser après Whitney, qui ne pouvait peut-être germer que dans un environnement mathématique mûr pour ce problème. Enfin la curiosité était notable pour V. Arnold : V. Arnold s'est toujours intéressé aux mathématiques « visibles » – ce qui ne veut pas dire qu'il ne sait pas manier les concepts les plus abstraits quand ils lui sont utiles.

Marcel BERGER est mathématicien. Il a dirigé l'IHES, l'Institut des hautes études scientifiques.

H. WHITNEY, *On regular closed curves in the plane*, in *Compositio math.*, 4: 276-284, 1937.

M. BERGER et B. GOSTIAUX, *Géométrie différentielle : variétés, courbes et surfaces*, Puf, 1987.

V. ARNOLD, *Vassiliev theory of discriminants and knots*, First european congress of math., Paris, 1992.

V. ARNOLD, *Topological invariants of plane curves and caustics*, American mathematical society, 1994.

La science des noeuds, Belin – PLS, 2002.

M. BERGER, *La géométrie vivante ou l'échelle de Jacob*, Cassini, à paraître.

Les mammifères à



1. CET ANCETRE DE LA BALEINE, *Rodhocetus* (au premier plan à gauche et à droite), qui vivait il y a environ 48 millions d'années, quelque part dans ce qui est aujourd'hui le Pakistan, se nourrissait de poissons, tandis qu'*Ambulocetus* mangeait de petits mammifères terrestres (à l'arrière plan).

la conquête des mers

KATE WONG

L'étude de nouveaux fossiles et des analyses d'ADN ont éclairé l'origine des baleines : elles descendent des mammifères terrestres, probablement de l'ancêtre de l'hippopotame.



Un jeune *Eotitanops*, qui ressemble à un tapir, s'approche de l'eau pour s'abreuver. Embusquée dans la mangrove, une bête observe la scène et salive : l'*Eotitanops* est un mets de choix. Propulsée par ses puissants membres postérieurs, elle se jette sur l'animal, enfonce ses crocs dans sa proie, puis la traîne dans l'eau. Combat inégal. Victorieuse, la bête regagne la rive pour y dévorer son festin. À première vue, ce prédateur ressemble à un crocodile : les mêmes pattes recroquevillées, la queue puissante, un long museau et des yeux vissés sur le haut du crâne. Pourtant, de plus près, sa peau n'est pas faite de cuir épais, mais recouverte de fourrure ; il n'a pas de griffes, mais des doigts, et ses dents à plusieurs pointes en font un mammifère et non un reptile. Cette créature – *Ambulocetus* – est une baleine primitive, l'un des chaînons qui relient les ancêtres des cétacés aux quelque 80 espèces de baleines, de dauphins et autres marsouins qui peuplent aujourd'hui les océans.

Les biologistes de l'évolution ont longtemps considéré l'apparition des baleines comme une énigme. Les cétacés actuels sont dépourvus de membres et incapables de vivre hors de l'eau : quels liens peuvent-ils avoir avec les mammifères ? En 1851, Herman Melville a même assimilé Moby Dick et ses congénères à des poissons ! Pourtant, les naturalistes du XIX^e siècle, et, avec eux, Charles Darwin, considéraient ces animaux au sang chaud qui allaitent leurs petits et respirent de l'air, comme des mammifères. Or, les ancêtres des mammifères étaient terrestres, de sorte que ceux des baleines devaient l'être également.

Dans son ouvrage *De l'origine des espèces*, Darwin notait qu'un ours nageant le museau hors de l'eau pour attraper des insectes aurait pu être une « idée évolutive » précédant l'apparition des baleines. La suggestion ne suscita que railleries, au point que Darwin supprima le passage dans les éditions ultérieures en se contentant de noter qu'un ours était « presque comme » une baleine.

Dans les décennies qui suivirent, ni l'étude des fossiles disponibles – incomplets ou trop tardifs – ni celle de l'anatomie des cétacés contemporains ne renseignèrent les biologistes sur l'origine des baleines. Ainsi, en 1945, dans sa classification des mammifères, le paléontologue George Simpson écrivait que la baleine a évolué dans l'océan il y a si longtemps qu'aucune trace de ses ancêtres n'a été conservée. Toutefois, durant ces 20 dernières années, des progrès considérables ont été réalisés et l'énigme est aujourd'hui partiellement résolue. Après avoir analysé des fossiles de baleines datant de l'Éocène (entre –55 et –34 millions d'années), les paléontologues pensent que les ancêtres terrestres des cétacés auraient gagné la mer durant cette période. Ils ont également découvert que les baleines à fanons ont certainement divergé des cétacés à dents durant la période suivante, l'Oligocène, et ont déduit des données fossiles et de l'étude de l'ADN des cétacés vivants, où, quand et comment les cétacés ont évolué à partir de leurs ancêtres terrestres.

Le premier indice sur l'origine des baleines fut acquis grâce à une méthode mise au point vers 1945. Alors que Simpson classait les mammifères contemporains sur des critères purement anatomiques, la nouvelle méthode consistait à comparer des animaux vivants d'après les anticorps qu'ils produisaient

en réaction à certains antigènes. Alan Boyden et ses collègues de l'Université de Rutgers appliquèrent cette technique aux mammifères, et montrèrent que les cétacés sont proches (par leurs anticorps) des mammifères à nombre pair d'orteils, ou artiodactyles, un groupe auxquels appartiennent les chameaux, les hippopotames, les cochons et les ruminants. Les baleines étaient-elles elles-mêmes des artiodactyles ? Formaient-elles une branche évolutive distincte ayant un ancêtre commun avec les artiodactyles ?

Dans les années 1960, une étude des mammifères primitifs à sabots, les condylarthes, n'ayant pas encore acquis certaines caractéristiques des artiodactyles ou d'autres ordres de mammifères fit pencher la balance en faveur de la seconde hypothèse. Leigh Van Valen, alors au Muséum d'histoire naturelle de New York, découvrit des ressemblances étonnantes entre les dents à trois pointes des quelques fossiles de baleines et celles d'un sous-groupe de condylarthes carnivore, les mésonychidés. Il trouva également des analogies entre les artiodactyles et un autre groupe de condylarthes, les arctocyonidés, proches des mésonychidés. L. Van Valen en conclut que les baleines descendent des mésonychidés et qu'elles sont liées aux artiodactyles par leur ancêtre commun, les condylarthes.

Les baleines marcheuses

Une décennie s'écoula avant qu'on ne découvre de nouveaux fossiles de baleines suffisamment proches du point de divergence, pour que l'on puisse tester l'hypothèse de L. Van Valen. En 1977, le paléontologue Philip Gingerich, de l'Université du Michigan, recherchait au Pakistan des traces de mammifères terrestres de l'Éocène dans une région où l'on en avait déjà découvertes. L'expédition était décevante : la zone ne contenait que des fossiles marins. Il n'est pas étonnant de trouver des fossiles marins au Pakistan, si loin des côtes actuelles, car, durant l'Éocène, une vaste mer, la Téthys, recouvrait régulièrement ce qui est aujourd'hui le sous-continent indien. Toutefois, parmi ces anciens poissons et des coquillages, l'équipe de paléontologues découvrit deux fragments de bassin qui semblaient provenir d'un grand animal capable de marcher. Ph. Gingerich et ses collègues s'amuserent à imaginer une « baleine marcheuse », mais sans y croire tant l'idée leur paraissait saugrenue. Ils rentrèrent dans leur laboratoire, persuadés que la plus belle pièce ramenée était une mâchoire d'artiodactyle primitif, trouvée sur un autre site.

Deux ans plus tard, dans le Nord du Pakistan, aux pieds de l'Himalaya, l'équipe de Ph. Gingerich mit au jour, parmi des restes de mammifères vieux de 50 millions d'années, un autre fossile de baleine : un fragment de crâne d'une créature de la taille d'un loup pourvu de quelques caractéristiques des cétacés (notamment en ce qui concerne l'anatomie

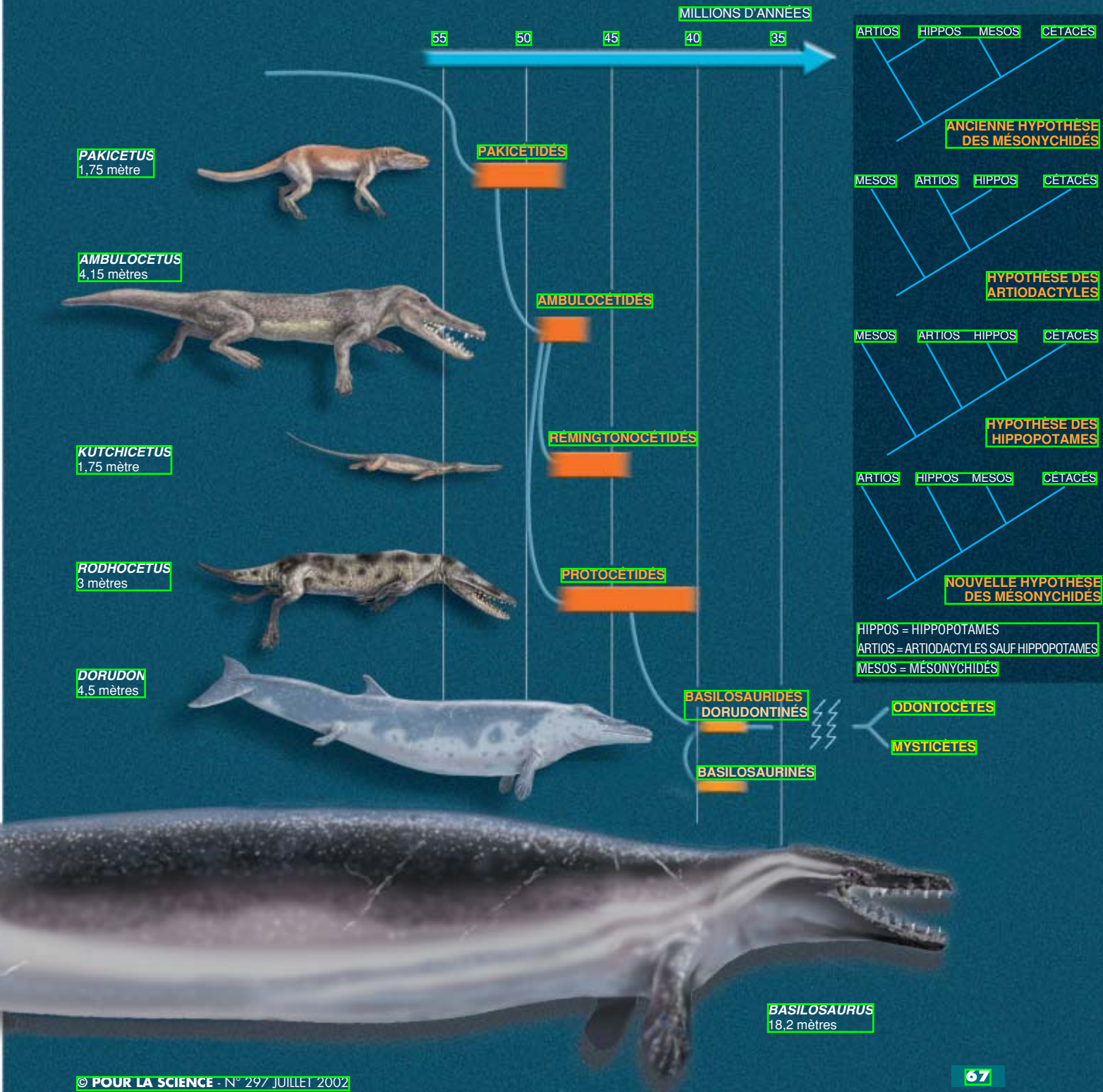


Portia Sloan et Edward Bel

L'ordre des cétacés

L'arbre phylogénétique des cétacés aboutit aux deux sous-ordres modernes des baleines, les odontocètes et les mysticètes, à partir des archaécètes éteints. On a représenté des membres de chaque famille ou sous-famille des archaécètes (à gauche). Les quatre diagrammes (à droite) symbolisent les quatre hypothèses qui relient les cétacés aux autres mammifères. L'hypothèse la plus ancienne, selon laquelle les cétacés descendent des mésonychidés – un groupe d'animaux qui ressemblent au loup – paraît aujourd'hui improbable, à la lueur des derniers fossiles découverts (c'est l'ancienne hypothèse des mésonychidés). Les os de la cheville des baleines fossiles ressemblent

aux os de la cheville des artiodactyles : on en déduit que les baleines sont elles-mêmes des artiodactyles (hypothèse des artiodactyles). Des études moléculaires ont montré que les baleines sont plus proches des hippopotames que d'aucun autre artiodactyle. L'étude de nouveaux fossiles sera nécessaire pour valider l'hypothèse de l'hippopotame ancêtre de la baleine. Selon la quatrième hypothèse, les mésonychidés restent les parents les plus proches des cétacés, à condition qu'ils appartiennent aux artiodactyles et non aux condylarthres, ce que l'on n'admet pas encore aujourd'hui. Cela signifierait qu'ils ont perdu les os caractéristiques de la cheville des artiodactyles.





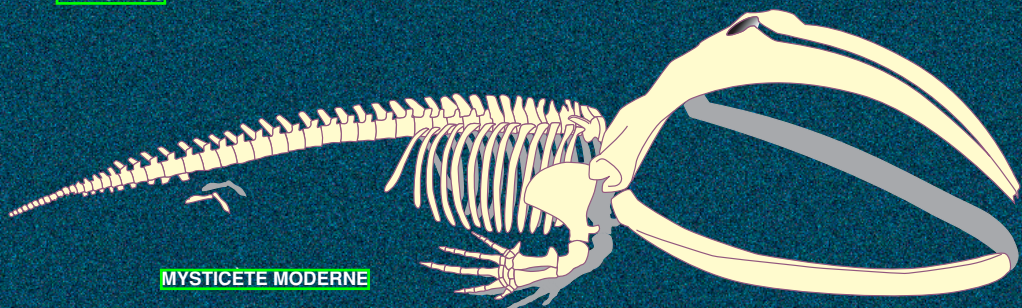
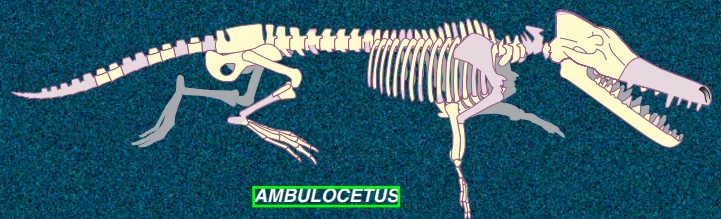
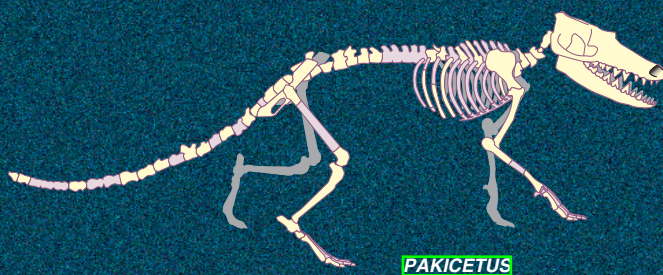
● **PAKICÉTIDÉS** ● **AMBULOCÉTIDÉS** ● **PROTOCÉTIDÉS**
 ● **RÉMINGONOCÉTIDÉS** ● **BASILOSOURIDÉS** ● **LLANOCETUS**

2. LA TETHYS était une vaste mer qui, durant une grande partie de l'Éocène (entre – 55 et –34 millions d'années), s'étendait de l'Espagne à l'Indonésie (a). L'Inde était alors une île, l'Australie ne s'était pas complètement séparée de l'Antarctique, et d'importantes régions de l'Afrique et de l'Eurasie étaient submergées. Ces eaux peu profondes, chaudes et riches en nutriments, regorgeaient de poissons. C'est pourquoi l'on trouve les fossiles d'animaux marins sur ce qui correspond aujourd'hui à des terres émergées (b). *Llanocetus* (34 millions d'années), une protobaleine de l'Antarctique, représente le maillon le plus ancien entre les ancêtres des cétacés et les cétacés modernes.

de l'oreille). L'anatomie des conduits auditifs du crâne fossile montrait que, contrairement aux baleines actuelles, l'animal ne devait pas localiser d'où venaient les sons, mais c'était à l'évidence des conduits auditifs de cétacés. L'équipe venait de découvrir la plus ancienne et la plus primitive des baleines connues, un animal qui passait sans doute une partie (si ce n'est la majeure partie) de son temps sur terre. Ph. Gingerich nomma la créature *Pakicetus* puisqu'elle avait été mise au jour au Pakistan, et se consacra désormais entièrement à la recherche d'autres ancêtres des baleines.

À la même époque, une autre équipe de paléontologues découvrit des restes de *Pakicetus* – un fragment de mâchoire inférieure et des dents isolées – qui ressemblaient beaucoup à ceux des mésonychidés. Or, il y a 50 millions d'années, à l'époque de *Pakicetus*, des mésonychidés peuplaient la région. On en conclut que les cétacés actuels descendent d'un mésonychidé ou d'un de ses proches parents. Toutefois, on ignorait encore à quoi ressemblaient ces toutes premières baleines.

Puis, en 1983, l'Union soviétique envahit l'Afghanistan, et les fouilles furent interrompues. Ph. Gingerich décida d'établir son champ de fouilles en Égypte, au Sud-Ouest du Caire dans la vallée du désert du Zeuglodon, ainsi nommée parce qu'on y a mis au jour au début du XX^e siècle les restes d'une baleine archaïque, le Zeuglodon. Comme le Pakistan, la majeure partie de l'Égypte était alors recouverte par la Téthys et les ossements des créatures primitives sont enfouis dans les sables du désert. Après plusieurs campagnes de fouilles, l'acharnement de Ph. Gingerich et de son équipe paya : ils découvrirent les membres postérieurs d'un ancêtre des baleines long de 18 mètres, le *Basilosaurus*, qui sillonnait les mers il y a entre 40 et 37 millions d'années. Auparavant, on avait retrouvé un morceau de fémur, sans pouvoir affirmer qu'il avait été fonctionnel. En revanche, les pieds et les pattes qui venaient d'être découverts étaient à l'évidence fonctionnels. Bien



3. LES PRINCIPAUX ARCHAEOCETES dont la lignée a abouti aux odontocètes (les baleines à dents) et aux mysticètes (les baleines à fanons) modernes révèlent quelques-unes des modifications morpholo-

giques qui ont assuré l'adaptation de ces animaux à la vie marine, en 15 millions d'années seulement (les os reconstruits sont colorés en jaune). Les membres postérieurs se sont raccourcis, les membres anté-

qu'elles aient mesuré environ 50 centimètres de longueur, ces pattes ne servaient probablement pas à l'animal à nager, et encore moins à marcher sur la terre ferme. En revanche, elles pouvaient l'aider à s'accoupler dans l'eau. Quel que soit leur usage, si tant est qu'elles en aient eu un, leur présence sur ce fossile indique que des ancêtres des baleines avaient gagné les mers durant les dix millions d'années qui séparaient le *Pakicetus* du *Basilosaurus*. L'hypothèse de la baleine marcheuse devenait plausible.

Une autre découverte confirma l'hypothèse, en 1992. Une équipe menée par Hans Thewissen, de l'Université de médecine du Nord-Est de l'Ohio, découvrit au Pakistan dans des roches marines vieilles de 48 millions d'années un squelette quasiment complet d'un maillon séparant la baleine moderne de ses ancêtres terriens. Les larges pieds et la puissante queue de la créature indiquaient une grande habilité pour la nage, tandis que les os robustes de ses pattes et des articulations suggéraient que l'animal pouvait marcher. H. Thewissen dénomma la bête *Ambulocetus natans* : la baleine marcheuse et nageuse.

Adaptations évolutives

Depuis, H. Thewissen, Ph. Gingerich et d'autres paléontologues ont mis au jour de nombreux fossiles qui retracent les étapes de la conquête des mers par les baleines : le *Pakicetus* a engendré *Ambulocetus*, qui lui-même a donné les animaux à nez de marsouin, les rémingtonocétidés, et les protocétidés, qui ont été les premières baleines bien adaptées à la nage et colonisant l'ensemble des océans à partir de l'ancienne région indo-pakistanaise. Ensuite, sont apparus les dorudontines, qui avaient un aspect de dauphin et sont probablement les ancêtres des basilosaurines et des baleines modernes.

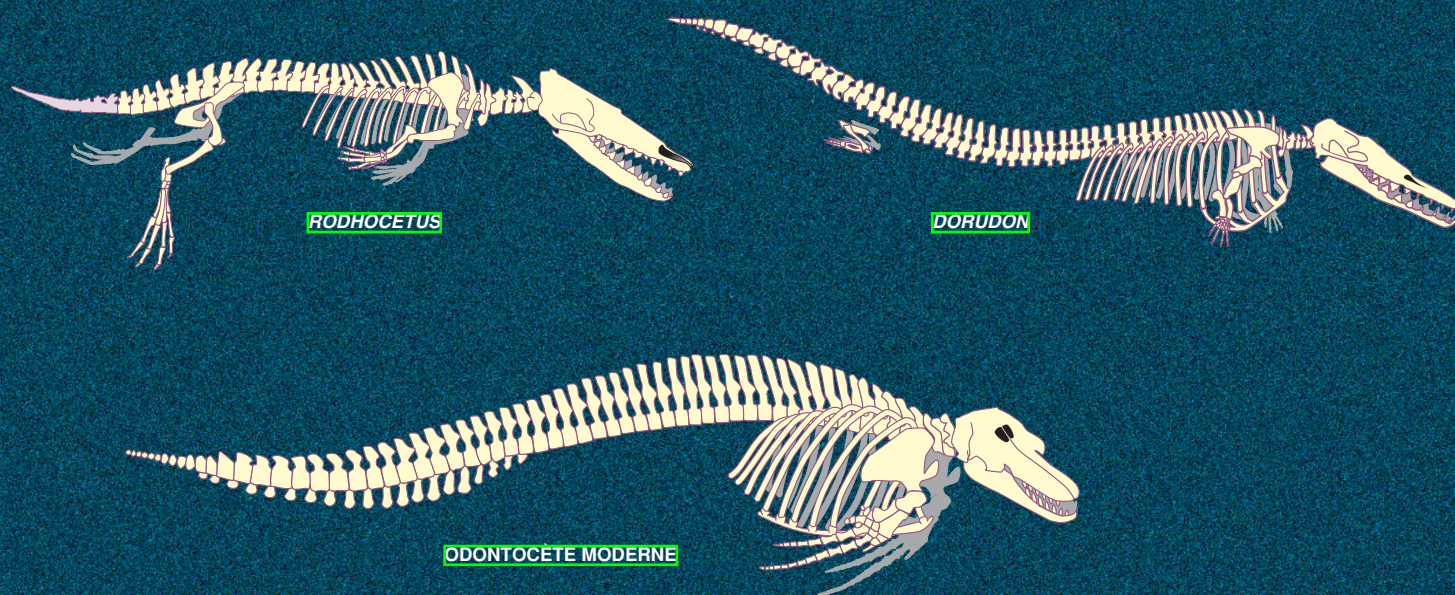
Grâce à ces fossiles, les paléontologues ont établi la généalogie des baleines, mais ils ont aussi identifié de nom-

breux changements anatomiques et physiologiques qui ont accompagné leur adaptation au milieu marin. L'une des premières modifications concerne l'ouïe. Tandis que les humains et les autres animaux terrestres ont des tympan plats et sensibles qui vibrent quand les ondes sonores les atteignent, les baleines modernes n'ont que des ligaments tympaniques, longs et épais, insensibles aux sons. À la place, un os dense, la bulla, transmet les sons de l'eau vers une région plus profonde de l'oreille.

La bulla de *Pakicetus* subit quelques modifications en ce sens, mais cet animal reste avant tout un mammifère terrestre dont le tympan était adapté à l'audition dans l'air. Alors, à quoi lui servaient ses épaisses bulla ? Selon H. Thewissen, à capter les vibrations transmises par le sol (comme les tortues qui «écoutent» par leur carapace). Ce prédateur aurait chassé en embuscade, attendant caché près d'une rivière, la tête au contact du sol, à l'affût de proies venant s'abreuver. Aujourd'hui le crocodile pratique ce mode de chasse en posant sa mâchoire sur le sol. *Ambulocetus* chassait aussi sans doute de cette façon, car il présente un début de jonction entre la mâchoire et l'oreille. Ce trait anatomique, qui a doté les premières baleines de la capacité d'entendre les vibrations du sol, leur aurait permis ultérieurement de percevoir les sons sous l'eau.

Zhe-Xi Luo, du Muséum d'histoire naturelle de Pittsburgh, a montré que du temps des premières baleines aquatiques, les basilosaurinés et des dorudontinés, les tympan avaient déjà évolué en ligaments tympaniques allongés ; les canaux auditifs s'étaient obturés pour permettre la plongée en eau profonde, et un canal rempli de graisse transmettant les sons jusqu'à l'oreille interne s'était développé à partir de la mâchoire.

La différenciation entre les baleines à dents, les odontocètes, et les baleines à fanons, les mysticètes, s'est faite après l'évolution du système auditif. Tandis que les baleines à dents développaient les traits nécessaires à la production



rieurs se sont transformés en nageoires, et la colonne vertébrale a évolué jusqu'à ce que les battements puissants de la queue autorisent la nage. Simultanément, le crâne a évolué permettant aux animaux d'en-

tendre sous l'eau, l'orifice nasal s'est déplacé vers le haut du crâne, et les dents se sont simplifiées en pinces. Puis, les dents des mysticètes ont été remplacées par les fanons des baleines.

Eau douce ou eau salée ?

La plus part des mammifères – notamment les plus grands – ne peuvent vivre sans eau douce. Les mammifères marins ont souvent des difficultés à en trouver. Les phoques et les otaries tirent leur eau douce des poissons qu'ils consomment (certains mangent de la neige), et les lamantins vont en chercher dans les rivières. Les cétacés tirent de l'eau de leur nourriture et avalent des gorgées d'eau salée.

Quand les baleines, issues d'un environnement terrestre, dépendant de l'eau douce, se sont-elles adaptées à l'ingestion d'eau salée ? L'étude de la concentration en isotopes de l'oxygène (^{16}O et ^{18}O) dans les fossiles a apporté des éléments de réponse. L'eau salée contient plus de ^{18}O que l'eau douce : les masses d'eau salée étant supérieures à celles d'eau douce, l'évaporation est supérieure pour les océans. Comme l'isotope 16 est plus léger que le 18, il s'évapore préférentiellement, de sorte que les océans sont plus riches en isotope 18 que les étendues d'eau douce. Or, l'oxygène de l'eau que l'on voit se fixer dans les dents et dans les os en développement, de sorte qu'en fonction des rapports isotopiques de l'oxygène, on sait si l'ani-

mal a plutôt consommé de l'eau douce ou de l'eau salée. L'analyse de la concentration en isotopes dans les restes de *Pakicetus*, la baleine la plus primitive, montre que l'animal buvait de l'eau douce ; il devait passer l'essentiel de son temps sur la terre, comme l'indiquent d'autres données morphologiques. Certains fossiles d'*Ambulocetus* semblent avoir aussi consommé de l'eau douce. L'animal aurait été marin, puisque les fossiles ont été retrouvés dans des roches sédimentaires marines, mais devait rejoindre la terre pour s'abreuver. Peut-être restait-il à terre dans sa jeunesse, durant la formation des dents, puis, plus âgé, vivait-il exclusivement en mer.

Les protocétidés, dont le squelette montre des adaptations plus prononcées à la vie aquatique, présentent des concentrations en isotopes de l'oxygène qui correspondent à celles de l'eau de mer. Ainsi, quelques millions d'années après l'apparition des premières baleines, leurs descendants étaient adaptés à l'eau de mer. Cette innovation physiologique a certainement joué un rôle important dans la colonisation de toutes les mers par les protocétidés.

et à la réception de sons hautes fréquences (autorisant la chasse par écholocalisation), les baleines à fanons acquerraient la possibilité d'émettre et de recevoir les sons basses fréquences, pouvant ainsi communiquer à longue distance. Il y a quelque 28 millions d'années, les premiers odontocètes avaient déjà certaines des structures osseuses nécessaires à l'écoute de sons hautes fréquences et, par conséquent, se repéraient déjà partiellement par écholocalisation. Quant aux mysticètes, dont les premiers représentants datent de 34 millions d'années, on ignore comment ils ont acquis la capacité de détecter les basses fréquences.

Une autre modification notable du crâne est le déplacement des cavités oculaires : chez *Pakicetus* et *Ambulocetus*, elles sont au sommet de la tête, comme chez le crocodile, tandis qu'à partir des protocétidés elles se déplacent vers les côtés. L'orifice nasal migre de l'avant du museau chez *Pakicetus* vers l'arrière de la tête chez les cétacés modernes, se transformant en évent. La dentition, elle aussi, évolue d'une multitude de molaires pointues et tranchantes chez les ancêtres des mammifères, vers une série de dents ressemblant à celles des odontocètes modernes, qui avalent leur nourriture sans la mâcher. Les mysticètes, quant à eux, ont perdu toutes leurs dents en même temps et ont acquis des fanons en peigne implantés dans la mâchoire supérieure et qui filtrent le plancton de l'eau de mer.

La principale adaptation des baleines à la vie aquatique fut l'acquisition de la forme allongée et de la maîtrise de la nage qui en découle. Certaines formes amphibiennes étonnantes ont pavé le chemin de cette voie évolutive. Par exemple, *Ambulocetus* a hérité de ses ancêtres terrestres ses épaules flexibles et ses articulations du coude, du poignet et des doigts ; son bassin était assez solide pour supporter son poids sur la terre. Planté sur ses puissants membres postérieurs et sur des pieds en forme de pagaies, il devait avancer d'une démarche maladroite. Au contraire, dans l'eau, il devait retrouver toute son aisance.

La nage en haute mer a imposé des modifications supplémentaires, dont la plupart sont apparues avec les protocétidés. L'étude de *Rhodocetus* montre que l'os du membre inférieur était raccourci et qu'il commençait à devenir efficace pour la nage. Les pieds de l'animal, longs et fins, étaient probablement palmés. Le bassin de *Rhodocetus* présente également quelques modifications : certaines vertèbres du sacrum ne sont plus soudées, libérant le bas de l'épine dorsale, qui pouvait renforcer le battement de la queue. *Rhodocetus* nageait sans doute en surface comme un chien, et sous l'eau en utilisant ses membres postérieurs et sa queue. Quand il sortait de l'eau pour s'accoupler ou pour se réchauffer au soleil, *Rhodocetus* avançait probablement en se dandinant, tel un phoque ou un éléphant de mer moderne.

Avec *Dorudon* et *Basilosaurus*, les baleines sont devenues exclusivement aquatiques. Comme chez les cétacés modernes, leur épaule était mobile, contrairement au coude et au poignet, qui formaient des sortes de nageoires, leur permettant de se diriger et d'assurer leur équilibre. Seules de minuscules pattes postérieures persistaient, de sorte que le bassin était notablement réduit. Mark Uhen, de l'Institut des sciences de Cranbrook, a trouvé que l'une des vertèbres de la queue du *Dorudon* était arrondie. Les baleines modernes ont un os semblable à la base de l'aileron, la petite structure plate et horizontale qui recouvre la queue. On en déduit que *Dorudon* et *Basilosaurus* avaient des ailerons arrière et nageaient comme les baleines modernes, grâce aux oscillations de la queue ; ce mode de propulsion est très efficace, car tous



4. LE *DORUDON*, qui mesurait environ 4,5 mètres, était un archaocète ressemblant aux dauphins. Il sillonnait les mers il y a quelque 40 à 37 millions d'années, et serait l'ancêtre des baleines modernes.

les points de la colonne vertébrale participent aux battements et l'aile allège la queue.

On ignore précisément à quelle période les baleines ont perdu leurs pattes. Lawrence Barnes, du Muséum d'histoire naturelle de Los Angeles, a récemment mis au jour dans l'état de Washington le squelette d'une baleine datant de 27 millions d'années qui avait des membres postérieurs développés : les membres ont persisté plus longtemps qu'on ne le pensait. Toujours est-il qu'aujourd'hui, 50 millions d'années après leurs ancêtres quadrupèdes, les cétacés n'ont plus que de minuscules vestiges de membres postérieurs, invisibles de l'extérieur, et que leur bassin est notablement réduit au point qu'il n'est relié qu'à quelques petits muscles qui ne servent plus à la locomotion.

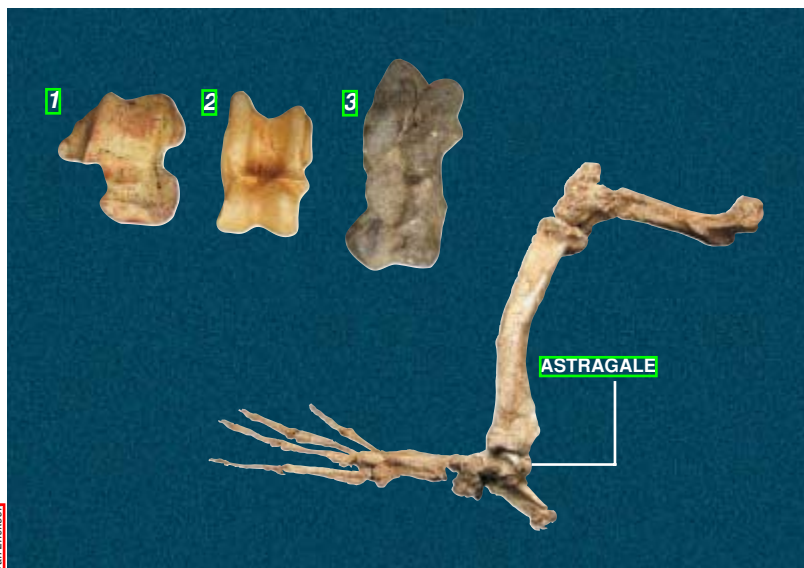
La parole à l'ADN

Dans les années 1980 et 1990, tandis que les paléontologues étudiaient la morphologie des fossiles et en déduisaient que les baleines descendent des mésonychidés, les biologistes retraçaient l'histoire évolutive des cétacés en analysant l'ADN des baleines modernes. Ces études moléculaires confirmèrent les conclusions de Boyden faite dans les années 1960 : les baleines sont plus proches des artiodactyles que de tout autre mammifère vivant, et, qui plus est, elles seraient des artiodactyles, l'un des nombreux rameaux sur cette branche de l'arbre des mammifères. De surcroît, ces études ont révélé l'existence d'un lien étroit entre les baleines et les hippopotames. Les diverses études de l'ADN, notamment celle de Norihiro Okada et de ses collègues de l'Institut de technologie de Tokyo, étaient convaincantes, mais comment pouvait-on concilier l'hypothèse de l'hippopotame, ancêtre des baleines et les conclusions des paléontologues ?

Les paléontologues décidèrent que la seule façon de le savoir était d'étudier les os de la cheville des anciennes baleines. On définit les artiodactyles sur la base d'un de ces os, l'astragale, qui favorise la mobilité. L'unique astragale des artiodactyles présente des gorges qui le font ressembler à une poulie à gorge double (voir la figure 5). L'une est reliée au tibia et l'autre à des os plus éloignés de la cheville. Si les baleines descendent des artiodactyles, leurs ancêtres encore mal adaptés à la vie aquatique devaient avoir un astragale en forme de poulie.

La dernière pièce du puzzle fut trouvée en automne 2001 par Ph. Gingerich et par H. Thewissen qui annoncèrent simultanément avoir découvert de nouveaux fossiles de baleines primitives. Dans l'Est de la province du Béloutchistan, l'équipe de Ph. Gingerich a mis au jour des squelettes articulés partiels de *Rodhocetus balochistanensis* et un nouveau genre de protocétidé, *Artiocetus*. Dans les collines Kala Chitta du Pakistan, H. Thewissen et ses collègues ont trouvé un fragment de *Pakicetus* et un autre d'un membre plus petit de la famille des pakicétidés, *Ichthyolestes*. Chacun de ces squelettes présente un astragale caractéristique des artiodactyles.

Ces découvertes ont renforcé les convictions des partisans de l'hypothèse selon laquelle les baleines descendent des artiodactyles. Bien que les hippopotames eux-mêmes soient apparus bien après les baleines, leur ancêtre présumé (l'antracothère, un animal dont la taille variait entre celle d'un chien ou celle d'un cheval et qui était inféodé aux marais) vivait au milieu de l'Éocène (peut-être même avant) et aurait un ancêtre commun avec les cétacés.



5. LES MEMBRES POSTÉRIEURS d'une baleine primitive, *Rodhocetus*, sont pourvus d'un os de la cheville nommé astragale. On a regroupé un astragale de mésonychidé (1), un astragale d'artiodactyle moderne (2) et l'astragale de *Rodhocetus* (3). Ils présentent la même forme de poulie à deux gorges qui caractérise tous les astragales d'artiodactyles. On en déduit que les baleines descendent non pas des mésonychidés, comme cela était admis, mais d'un ancien artiodactyle.

Si les artiodactyles semblent bien être les ancêtres des cétacés, pourquoi s'est-on si longtemps tourné vers les mésonychidés ? Les spécialistes de l'évolution pensent aujourd'hui que les ressemblances avec les mésonychidés reflètent une évolution convergente plutôt qu'un ancêtre commun, et que l'ordre des mésonychidés a représenté un cul-de-sac évolutif. Toutefois, cette opinion ne fait pas l'unanimité. Selon Maureen O'Leary, de l'Université de Stony Brook, les données morphologiques et moléculaires n'excluent pas que les mésonychidés appartiennent à la lignée des baleines. Les mésonychidés seraient d'anciens artiodactyles dont l'évolution de la cheville se serait inversée, et resteraient les plus proches parents des cétacés ; aujourd'hui, les hippopotames seraient leurs plus proches parents vivants. Certaines critiques se sont toutefois élevées contre l'inclusion des mésonychidés dans les artiodactyles : la validation de l'hypothèse des mésonychidés nécessiterait de renoncer à l'idée bien ancrée que l'astragale définit le groupe des artiodactyles.

Paléontologues et biologistes s'accordent à dire que seuls de nouveaux fossiles préciseront le lien entre les baleines et les artiodactyles, notamment des fossiles d'artiodactyles primitifs et surtout d'hippopotames primitifs. La prochaine étape sera de préciser comment les archaécètes ont évolué vers les mysticètes et vers les odontocètes, et quand ces derniers ont acquis leurs caractères « modernes ». Si les recherches avancent au même rythme que les 20 dernières années, la famille des cétacés sera bientôt au grand complet.

Kate WONG est écrivain et journaliste à *Scientific American*.

M. BENTON, *L'épopée des mammifères*, Édimages, 1991.

The Emergence of Whales : Evolutionary Patterns in the Origin of Cetacea, sous la direction J. Thewissen, Plenum Press, 1998.

J.-L. HARTENBERGER, *Une brève histoire des mammifères*, Belin-Pour la Science, 2001.

Les constantes varient-elles?

JEAN-PHILIPPE UZAN

Deux constantes fondamentales de la physique semblent avoir varié au cours de l'histoire de l'Univers. Ces observations relancent un débat ancien sur la nature des lois physiques.

La plupart des physiciens croient que tous les électrons de l'Univers, sans exception, ont exactement la même masse, la même charge et le même spin. Ainsi formulée, cette affirmation pourrait passer pour une profession de foi. En réalité, elle est implicite dans la pratique scientifique elle-même, amplement justifiée par ses indéniables succès. Lorsque les physiciens reproduisent ou comparent des expériences pour tester les lois de la nature, ils doivent supposer que ces lois sont identiques en tout lieu et à toutes les époques. Cette hypothèse est souvent qualifiée de principe copernicien, car elle nous rappelle qu'on ne saurait justifier *a posteriori* le résultat d'une expérience en prétendant que nous occupons une place privilégiée dans l'Univers. Cette vision s'oppose à celle d'Aristote où les lois terrestres, bien qu'immuables et identiques en tout point de la Terre, diffèrent des lois célestes. Le principe copernicien est aujourd'hui au centre de nombreux débats théoriques. Les succès de la physique et de l'astrophysique modernes montrent qu'il est difficile d'envisager des lois physiques dont la structure prendrait des formes très différentes en divers points de l'Univers. En revanche, une lente variation des constantes fondamentales qui interviennent dans ces lois est envisageable sans remettre en cause l'essentiel des résultats déjà acquis. Si nous ignorons cette possibilité, nous risquons d'adopter sans le savoir une vision faussée de notre Univers. Au contraire, si nous en tenons compte, nous ouvrirons peut-être des fenêtres sur des théories physiques qui ne peuvent pas, pour le moment, être testées expérimentalement par d'autres moyens. Ainsi, cette question a fait l'objet de nombreuses études théoriques et expérimentales qui ont un point commun : elles constituent un test fondamental pour nos théories de la gravitation. Très récemment, une équipe d'astronomes a

annoncé que la constante de structure fine, une constante fondamentale, a varié au cours de la première moitié de l'histoire de l'Univers. Une autre équipe a publié des résultats indiquant une possible évolution du rapport des masses du proton et de l'électron. Avant de nous intéresser aux aspects les plus actuels de la quête d'une variation des constantes, commençons par rappeler les termes de ce débat déjà ancien.

L'ouverture de la boîte de Pandore

En 1937, le physicien et mathématicien Paul Dirac a, le premier, envisagé la possibilité que les constantes fondamentales varient, lorsqu'il proposa son hypothèse dite des grands nombres. Pour des raisons esthétiques, Dirac pensait que les lois de la nature ne devraient pas faire apparaître de constantes numériques très grandes ou très petites. Bien sûr, la valeur numérique que nous attribuons à certaines constantes, la vitesse de la lumière (299 792 458), par exemple, est due aux accidents historiques qui ont déterminé la définition de nos unités de mesure (ici la seconde et le mètre). Par conséquent, la question de Dirac n'a de sens que si l'on s'affranchit de l'arbitraire lié au choix des étalons de mesure : elle ne se pose que pour les grandeurs sans dimension, tel le rapport de la masse du proton à celle de l'électron (qui vaut environ 1836 dans tous les systèmes d'unité). Selon Dirac, certaines de ces constantes, tel le rapport de la force électrique à la force gravitationnelle entre le proton et l'électron (de l'ordre de 10^{40}), affichent des valeurs déraisonnablement élevées. En fait, cette remarque traduisait une interrogation sur le fondement de nos lois physiques. Ces lois font intervenir des constantes dont la valeur ne nous est pas donnée par la théorie, mais que



1. L'UNIVERS contient des nuages de gaz (*en bleu et en vert*) que nous observons tels qu'ils étaient à des époques d'autant plus reculées qu'ils sont lointains. De plus, il y a environ 14 milliards d'années, l'Univers était peuplé de quasars (*points rouges*), des noyaux actifs de galaxies si lumineux qu'ils sont visibles à des distances de l'ordre du rayon de l'Univers observable. En étudiant ces quasars,

les astronomes sondent l'espace-temps sur près de 80 pour cent de l'âge de l'Univers. En effet, la lumière des quasars est partiellement absorbée par les atomes des nuages de gaz qu'elle rencontre sur son passage. Ainsi, les spectres d'absorption correspondant nous renseignent sur une éventuelle évolution des propriétés des atomes au cours des 14 derniers milliards d'années.

nous devons mesurer. Ces constantes sont-elles vraiment fondamentales (auquel cas, on ne pourra que les mesurer expérimentalement) ou seront-elles un jour expliquées par une théorie plus générale que nous ignorons encore? Dans ce dernier cas, l'expérience passée des physiciens les porte à croire que cette nouvelle théorie révélera des relations simples et harmonieuses entre les choses... et ils ont du mal à imaginer qu'elle puisse expliquer des rapports gigantesques entre deux aspects de la réalité qu'elle aura, par ailleurs, unifiés.

Pour chercher des indices d'une telle théorie, Dirac usait d'arguments numérologiques un peu douteux et souligna quelques coïncidences. Ainsi, dans un atome d'hydrogène, le rapport de la force électrique à la force gravitationnelle, qui vaut 10^{40} , est approximativement égal au nombre de tours effectués par l'électron autour du proton depuis le Big Bang. D'aucuns ont aussi remarqué que c'est la racine carrée du nombre de particules contenues dans l'Univers observable... Dirac postula que ces coïncidences n'en étaient pas, et que ces différentes grandeurs étaient reliées par une physique encore

inconnue. Ceci ouvre la possibilité d'expliquer, un jour, les valeurs arbitraires des constantes numériques : en l'occurrence, l'intensité de la force de gravitation serait très simplement proportionnelle à celle de la force électrique divisée par l'âge de l'Univers, la valeur énorme de leur rapport aujourd'hui n'étant qu'une conséquence du grand âge du cosmos. Cette hypothèse a pour conséquence que certaines quantités dimensionnées, qui interviennent dans l'expression de ces nombres sans dimension, devraient varier au cours du temps : dans l'exemple que nous avons donné, le rapport entre la force électrique et la force gravitationnelle doit grandir, à mesure que l'Univers vieillit. Ainsi, selon la «théorie» de Dirac, la constante gravitationnelle est proportionnelle à l'inverse de l'âge de l'Univers. Il aurait aussi pu postuler que la charge de l'électron est proportionnelle à l'inverse de la racine carrée de l'âge de l'Univers.

Dans les années 1960, cette problématique a été éclairée d'un jour nouveau par la formulation du principe dit «anthropique». Robert Dicke, de l'Université de Princeton, puis Brandon Carter, de l'Observatoire de Paris-Meudon, remarquèrent que l'âge de l'Univers mesuré par un observateur ne peut pas prendre n'importe quelle valeur : il doit être supérieur au temps nécessaire pour former des galaxies, des étoiles, des noyaux lourds... toutes choses sans lesquelles aucun observateur ne pourrait exister! Les coïncidences observées par Dirac ne refléteraient que l'effet de sélection observationnelle exprimé par le principe anthropique : l'existence d'observateurs dans l'Univers est un fait qui impose des contraintes sur les lois physiques et donc sur la valeur des constantes.

Les premières tentatives pour tester la théorie de Dirac faisaient preuve de beaucoup d'ingéniosité. Considérons, par exemple, l'argument avancé, en 1948, par Edward Teller, le père de la bombe à hydrogène. Le Soleil, remarqua-t-il, est une boule de gaz en équilibre : la gravitation tend à la faire s'effondrer sous son propre poids, tandis que s'y oppose l'énergie produite en son cœur et rayonnée vers l'extérieur. Il en résulte que l'énergie rayonnée par le Soleil doit être d'autant plus grande que la force de gravitation est intense. Plus précisément, Teller calcula que l'énergie rayonnée varierait comme

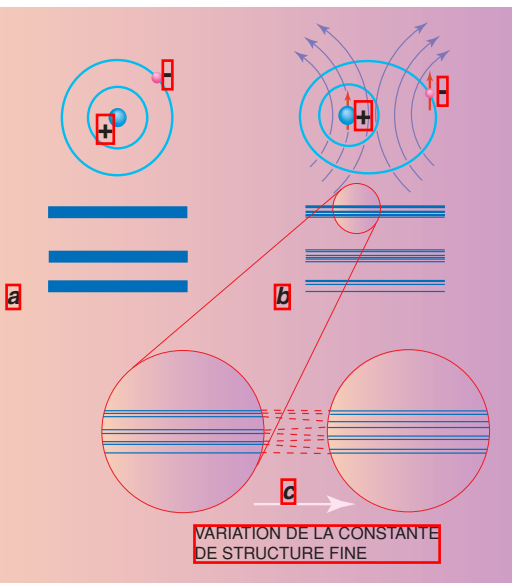
la puissance septième de la constante de gravitation si cette dernière évoluait au cours du temps. Ceci, à son tour, signifie que la température à la surface de la Terre varierait comme la puissance $5/2$ de cette même constante.

Par conséquent, si la constante de gravitation a diminué comme l'inverse de l'âge de l'Univers lors des 200 ou 300 derniers millions d'années, la température moyenne sur Terre devait être 20 pour cent plus élevée au Cambrien qu'aujourd'hui... à peine les trilobites seraient-ils apparus, qu'ils auraient été cuits dans l'eau de mer! Pire, il n'y aurait pas eu d'océan au Précambrien, car la température de la Terre aurait dépassé le point d'ébullition de l'eau. De plus, le physicien américain d'origine russe Georges Gamow remarqua qu'avec une telle débauche d'énergie, le Soleil aurait déjà brûlé toutes ses réserves depuis longtemps! Les physiciens firent alors feu de tout bois (la formation de la Lune, la rotation de la Terre, les datations géochimiques, etc.), et révélèrent une grande ingéniosité théorique pour contourner ces contraintes. Par exemple, Georges Gamow montra que l'on pouvait contrer son argument précédent sur le rayonnement solaire en formulant la théorie de Dirac de façon à ce que ce soit la charge de l'électron qui varie et non la constante de gravitation.

Constantes et métrologie

À ce stade, il faut remarquer que lorsque l'on veut donner un sens précis à la quête d'une variation des constantes, on rencontre une difficulté. La détermination expérimentale de la valeur des constantes repose sur la mesure de longueurs, de temps et de fréquences, c'est-à-dire sur la comparaison du système physique étudié à d'autres systèmes considérés comme étalons. Toute question sur la variation des constantes est directement reliée au choix d'un système d'unités, c'est-à-dire à la métrologie.

Tout d'abord, si les grandeurs dont dépend la matière qui constitue l'appareil de mesure varient en divers points de l'espace-temps, les propriétés de cet appareil vont varier. De ce fait, toute métrologie dépend à la fois de l'espace, du temps et de l'appareil de mesure utilisé. En conséquence, il n'est pas possible de mesurer directement la variation d'une constante dimensionnée, telle la masse du proton, par exemple. Nous



2. LE SPECTRE D'UN ATOME révèle les niveaux d'énergie des électrons en orbite autour du noyau (a). Ces niveaux d'énergie ont une structure fine (b) due à des effets relativistes : un électron en mouvement est soumis à un champ magnétique avec lequel il interagit par l'intermédiaire de son spin (lequel lui confère des propriétés analogues à celles d'une aiguille aimantée). À cela s'ajoute une structure hyperfine due à l'interaction entre les spins du noyau et des électrons. Une variation de la constante de structure fine produit des déplacements des niveaux d'énergie correspondants (c).

devrions comparer cette masse à un objet servant d'étalon... objet dont la masse dépend de celle du proton. Tout au plus, pouvons-nous, en principe, constater la variation d'une constante sans dimension, par exemple, le rapport des masses du proton et de l'électron.

De même que, dans l'hypothèse de Dirac, une variation du rapport de la force électrique à la force gravitationnelle indiquerait une évolution de la constante gravitationnelle ou de la charge de l'électron, la variation d'une constante sans dimension pourrait être interprétée comme la variation d'une ou de plusieurs constantes dimensionnées qui entrent dans son expression. Toutefois, le choix des systèmes physiques utilisés pour définir nos unités a également des conséquences sur les variations qu'il est, par principe, possible d'envisager.

Prenons l'exemple du mètre dans le système de mesure international. Sa définition à partir d'une barre de platine iridié dépend de l'espace interatomique des métaux utilisés pour construire la barre, espace qui est déterminé, en première approximation, par le rayon atomique. Avec cette définition du mètre, on ne peut donner de sens à une variation de la combinaison des constantes entrant dans l'expression de ce rayon. La définition du mètre fut ensuite fondée sur la longueur d'onde d'une raie atomique du krypton 86 : dès lors, aucune variation de la combinaison des constantes entrant dans l'expression de cette longueur d'onde ne pouvait être mesurée. Depuis 1983, le mètre est défini comme la distance parcourue par la lumière en $1/299\,792\,458$ seconde. Cela signifie que la vitesse de la lumière, c , est fixée par décret.

La constante de structure fine

En résumé, si nous voulons donner un sens à notre recherche, nous devons nous tourner vers la variation des constantes sans dimension. Si nous constatons de telles variations, nous pourrions les interpréter comme une variation de constantes dimensionnées, à l'exception de certaines d'entre-elles, qui, comme la vitesse de la lumière, entrent dans la définition même de nos unités de mesure et qui doivent être considérées comme fixes. Dans son principe, ce choix arbitraire est identique à celui que nous devons faire lorsque nous décrivons le mouvement d'un objet matériel : nous fixons le référentiel par rapport auquel le mouvement sera défini.

Parmi les constantes sans dimension connues des successeurs de Dirac,

Trois unités et trois constantes fondamentales

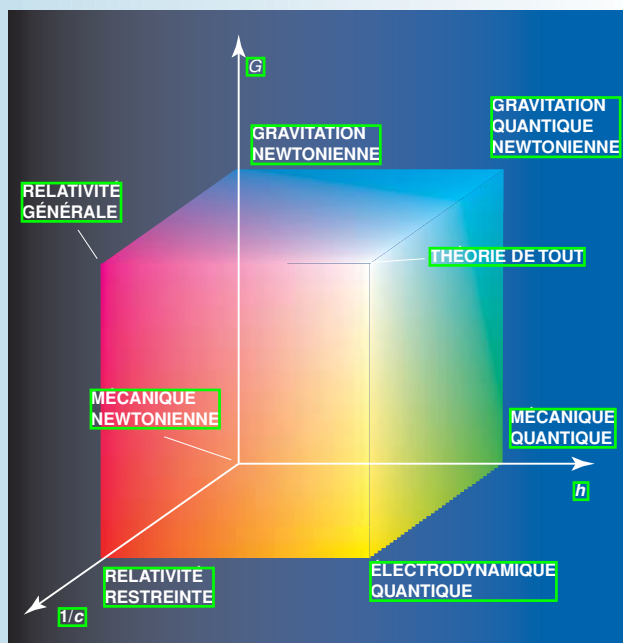
Dans le système international, les unités fondamentales sont le mètre, la seconde et le kilogramme. Considérons, par exemple, le cas de l'énergie, grandeur que l'on exprimait autrefois de diverses façons. Grâce à la thermodynamique, les physiciens du XIX^e siècle apprirent à relier l'énergie thermique telle qu'elle se manifeste dans un gaz chaud, par exemple, à une quantité de travail mécanique : c'est l'invention du concept d'énergie proprement dite. Dès lors, le joule remplaça les autres unités, nous débarrassant de coefficients de conversion inutiles ; ainsi, en vertu de l'équation $E_c = 1/2 mv^2$, une masse de un kilogramme animée d'une vitesse de un mètre par seconde a une énergie de un joule. Cela signifie que l'énergie a la dimension d'une masse, multipliée par une longueur au carré, divisée par un temps au carré, c'est-à-dire que le joule n'est autre que le kilogramme mètre carré par seconde carré.

Il en va de même pour la température. Son unité légale est le kelvin. Toutefois, la mécanique statistique nous enseigne que la température d'un corps représente l'énergie moyenne d'agitation de ses constituants. Dans ce cadre, le coefficient de proportionnalité qui permet de passer des joules aux kelvins, la constante de Boltzmann k_B (environ 10^{-23} joules par kelvin), n'a pas plus de signification que le coefficient 6,56 permettant de convertir les francs français en euros. On pourrait exprimer la température en joules, c'est-à-dire à l'aide d'une masse, d'une longueur et d'un temps étalons.

Cette réduction se poursuit pour toutes les autres unités du système international. Chaque progrès de la physique a unifié des domaines qui semblaient disjoints. À chaque fois, des grandeurs que l'on pouvait croire de nature différente se sont révélées commensurables et les nombres qui les reliaient ont déchu du statut de constantes fondamentales pour devenir de simples coefficients de conversion. Cette tendance va-t-elle se poursuivre ? Nous l'ignorons. À l'heure actuelle, il subsiste trois grandeurs fondamentales (longueur, durée et masse), c'est-à-dire trois unités. Il subsiste également trois constantes qui semblent jouer un rôle plus fondamental que les autres : la vitesse de la lumière, c , la constante de Planck, h , et la constante de gravitation, G . Si une théorie des cordes constitue l'étape suivante dans l'unification des lois de la physique, le nombre de constantes fondamentales serait

réduit à deux. En effet, dans cette théorie, seules interviennent la taille des cordes (de l'ordre de 10^{-35} mètre) et la vitesse de la lumière. Certains physiciens entretiennent l'espoir que l'on pourra aller plus loin : dans une future théorie ultime, toutes les constantes fondamentales auraient été réduites à de simples coefficients de conversion.

Toutefois, il convient de rester prudent. Suivant que l'on néglige, c , h ou G , on obtient des lois physiques qui correspondent effectivement à des pans entiers de la réalité. Cela semble signifier que la nature est réellement organisée autour de ces trois constantes, ce qui exclut que l'on puisse un jour les ignorer.



Le cube des théories illustre le rôle des trois constantes «les plus» fondamentales. Suivant que l'on tient ou non compte de leur valeur non nulle, on obtient les théories découvertes par les physiciens et qui décrivent très bien des pans entiers de la nature.

la constante «de structure fine» fit l'objet de nombreuses attentions. C'est un nombre sans dimension formé à partir du rapport entre le carré de la charge de l'électron et le produit de la constante de Planck, de la vitesse de la lumière et d'une constante dimensionnée, nommée permittivité du vide. Sa valeur numérique expérimentale est $1/137,0359895$. La constante de structure fine, aussi nommée constante de couplage électromagnétique, caractérise l'amplitude des phénomènes électromagnétiques.

De ce fait, elle intervient dans de nombreux phénomènes physiques, tels les niveaux d'énergie des électrons dans un atome. Afin de détecter une éventuelle variation de la constante de structure fine, il nous faut étudier un système physique où ces phénomènes ont lieu et qui a, d'une façon ou d'une autre, «enregistré» au cours

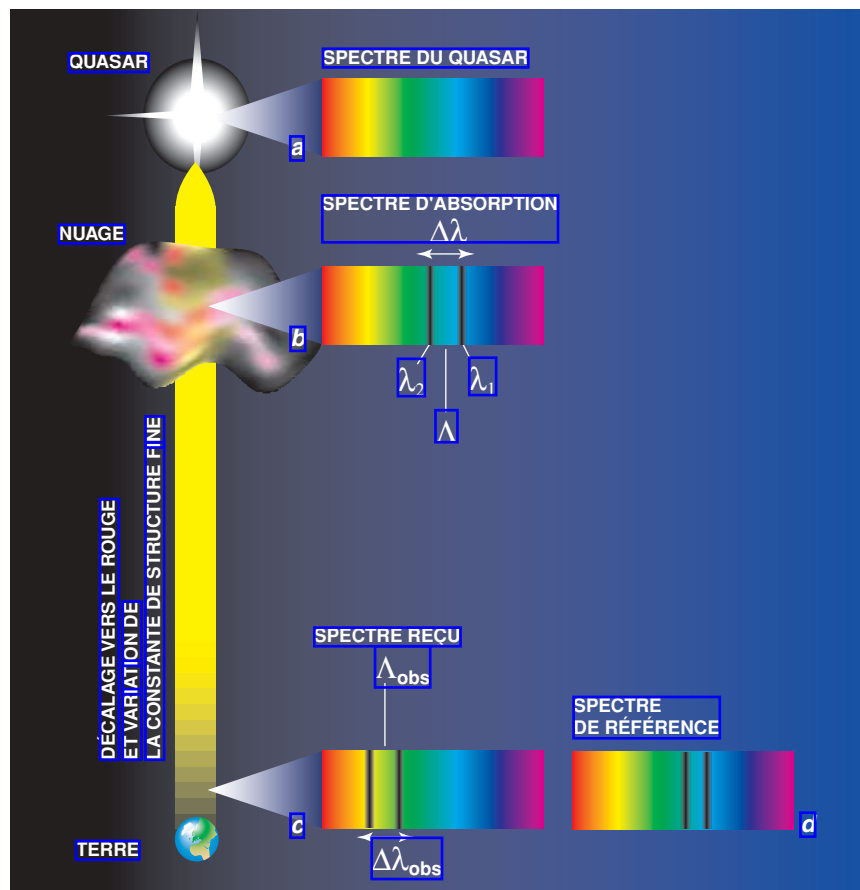
de son évolution la valeur passée de cette constante.

Certains physiciens ont étudié les données géochimiques. Ainsi, en 1972, le Commissariat à l'énergie atomique a découvert un site exceptionnel dans la mine d'Oklo, au Gabon. Il s'agit d'un réacteur nucléaire préhistorique qui a fonctionné de façon naturelle pendant environ 200 000 ans, il y a deux milliards d'années. Aujourd'hui, l'uranium naturel ne contient que 0,72 pour cent d'uranium 235 (l'isotope le plus instable) contre 99,28 pour cent d'uranium 238. De ce fait, il ne saurait entretenir de réactions en chaînes. Toutefois, la durée de vie de l'uranium 235 étant plus courte que celle de l'uranium 238, il y a deux milliards d'années, le minerai naturel contenait 3,68 pour cent d'uranium 235, ce qui est supérieur au taux critique de 3 pour cent nécessaire au fonctionnement d'un réacteur. La mesure des

concentrations relatives des divers nucléides produits lorsque le site d'Oklo était actif permet de reconstruire les conditions de fonctionnement de ce réacteur naturel. Ainsi, le rapport isotopique entre le samarium 149 et le samarium 147 est 45 fois plus faible que dans les conditions normales. Cette anomalie est due au fait que le samarium 149 a été détruit en absorbant les neutrons lents auxquels il était exposé pendant que le réacteur était actif. À partir de la mesure des abondances des divers isotopes du samarium, de l'uranium, de l'indium et du gadolinium, on établit la valeur de la probabilité de capture d'un neutron par un noyau de samarium 149. À l'aide d'un modèle du noyau de samarium, on peut relier cette probabilité de capture à la valeur de la constante de structure fine. Ayant établi les limites au-delà de laquelle la probabilité de capture d'un neutron par un noyau de samarium 149 n'a pas pu varier, on peut estimer les limites correspondantes pour les variations possibles de la constante de structure fine. La reconstruction de ce puzzle complexe a montré qu'elle n'a pas varié de plus de 10^{-5} pour cent lors des deux derniers milliards d'années, soit un taux de variation inférieur à 10^{-14} par an (en supposant que cette variation est linéaire). Ceci semble établir que la constante de structure fine n'évolue pas. Toutefois, ces résultats dépendent de notre compréhension des mécanismes à l'œuvre dans les noyaux atomiques.

Le spectre des atomes

On évite cette difficulté, lorsque l'on étudie le spectre des atomes dont les caractéristiques dépendent surtout des lois bien connues de l'électromagnétisme. Lorsque l'on introduit les corrections imposées par la relativité restreinte au comportement des électrons autour du noyau, on prend en compte des effets électromagnétiques qui modifient très légèrement les valeurs des niveaux d'énergie. Il existe, tout d'abord, un couplage entre le spin de l'électron et son moment orbital. En physique classique, ce couplage serait décrit ainsi : dans le référentiel de l'électron en tournant autour du noyau, le proton en mouvement engendre un champ magnétique. Or l'électron, particule chargée tournant sur elle-même, se comporte comme une petite aiguille aimantée qui interagit avec ce champ magnétique ambiant. Suivant son orientation, l'énergie de



3. LA LUMIÈRE D'UN QUASAR (a) passe parfois à travers des nuages de gaz intergalactiques avant de nous parvenir. Dans ces nuages, les atomes absorbent certaines longueurs d'onde correspondant à leurs niveaux d'énergie. On a représenté ici le cas d'une raie de longueur d'onde Λ , dotée d'une structure fine dont les deux composantes sont λ_1 et λ_2 (b). Le spectre reçu sur Terre (c) est différent du spectre produit en laboratoire par un atome semblable (d) pour deux raisons : le décalage vers le rouge dû à l'expansion de l'Univers a dilaté la longueur d'onde moyenne Λ (qui passe du bleu au jaune) et une variation de la constante de structure fine a modifié l'écart entre les deux composantes λ_1 et λ_2 . Un tel spectre nous apprendrait que la valeur de la constante de structure à l'époque où la lumière a traversé le nuage est différente de celle qu'elle affiche aujourd'hui.

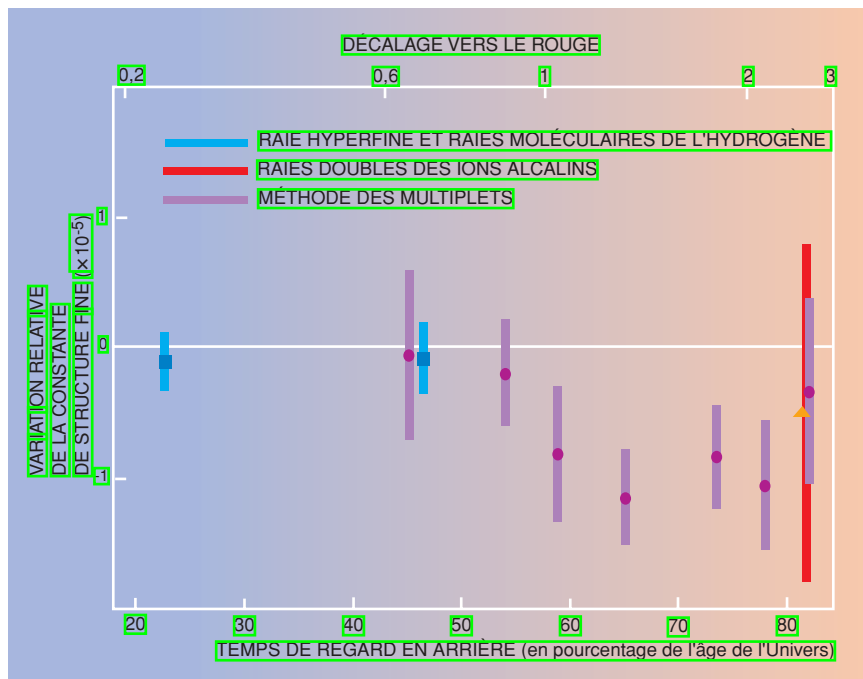
l'électron augmente ou diminue de cette énergie d'interaction. De plus, il existe un couplage entre le spin du noyau et celui de l'électron. Ces petites corrections relativistes se manifestent par la démultiplication des raies du spectre de l'atome, que l'on nomme sa structure fine et hyperfine. Comme leur nom l'indique, l'amplitude de ces corrections relativistes dépend de la constante qui nous intéresse.

Horloges atomiques et quasars

En principe, on peut détecter les variations de la constante de structure fine en étudiant le spectre de certains atomes. Les mesures les plus précises sont fondées sur l'utilisation d'horloges atomiques. Pour construire une telle horloge, on choisit un élément chimique, du césium, par exemple, et on étudie l'onde électromagnétique produite par une raie fine ou hyperfine de son spectre. La fréquence de cette onde donne la fréquence de l'horloge. Or, une variation de la constante de structure fine provoquerait un changement de cette fréquence. Bien sûr, pour la mesurer, il faut disposer d'une autre horloge. Ceci est possible en utilisant une horloge atomique construite à partir d'un atome différent et dont la fréquence sera certes modifiée par l'évolution de la constante de structure fine, mais de façon différente. Dès lors, la variation de la constante de structure fine au cours de l'expérience se manifestera par un décalage progressif des deux horloges atomiques.

Cette méthode de laboratoire peut être reproduite et permet un très bon contrôle des erreurs possibles. Récemment, Christophe Salomon et ses collègues du Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure ont comparé pendant deux ans les fréquences d'horloges atomiques au césium et au rubidium. Ils en ont déduit que la valeur de la constante de structure fine n'a pas varié de plus de 10^{-13} pour cent sur cette période...

Cependant, ces mesures, tout comme les études du réacteur naturel d'Oklo, ne nous renseignent pas sur les variations de la constante de structure fine il y a une dizaine de milliards d'années. Il est possible qu'elle ait varié dans un passé plus lointain avant de se stabiliser à sa valeur actuelle. Pour le savoir, il faut nous tourner vers des mesures astrophysiques. Il existe des méthodes



4. LES EVALUATIONS RECENTES de la constante de structure fine reposent sur trois méthodes différentes. On déduit sa valeur de la comparaison de la raie à 21 centimètres, correspondant à la transition entre deux niveaux d'énergie hyperfins de l'atome d'hydrogène, avec des raies correspondant aux différents états de la molécule de dihydrogène (en bleu). Elle est également mesurée à l'aide de raies doubles des ions alcalins (en rouge). La troisième méthode consiste à comparer deux à deux les spectres de différents ions dont les niveaux fins et hyperfins sont décalés dans des sens opposés par une même variation de la constante de structure fine (en mauve). Selon ces mesures, au cours de la première moitié de l'histoire cosmique, elle était moins élevée qu'aujourd'hui.

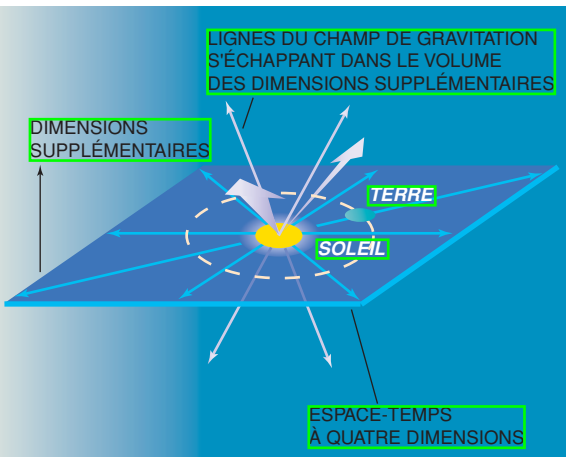
fondées sur l'observation du fond diffus cosmologique et sur l'abondance des éléments légers, synthétisés au cours des trois premières minutes de l'Univers, qui permettent d'établir la valeur de la constante de structure fine au tout début de l'histoire cosmique. Cependant, les résultats sont encore assez imprécis : sa valeur entre la première seconde et les 300 000 premières années ne différerait pas de sa valeur actuelle de plus de un pour cent.

En 1956, l'astrophysicien Malcolm Savedoff proposa une autre méthode d'étude de la constante de structure fine fondée sur l'analyse spectrale. Au cours de son premier milliard d'années d'existence, l'Univers s'est peuplé de noyaux de galaxie actifs extrêmement énergétiques : les quasars. Ces quasars constituent des sources très intenses approximativement réparties autour de nous sur une sphère de quelque 14 milliards d'années-lumière de rayon. Les nuages de gaz intergalactiques qui existaient à des époques ultérieures nous apparaissent à l'avant-plan des quasars dont ils absorbent partiellement la lumière. Ainsi, dans les spectres des quasars, nous observons des raies sombres qui nous renseignent sur les propriétés

des atomes de ces nuages du passé. Il devient possible de comparer le spectre d'un atome ici et maintenant à celui d'un de ses homologues ailleurs et autrefois. Ainsi, on vérifiera si la constante de structure fine a varié au cours du temps. Plus le nuage est lointain, et plus le spectre que l'on y étudie correspond à une époque reculée. En fait, il est théoriquement possible d'étudier l'évolution de la constante de structure fine sur des durées de l'ordre de 80 pour cent de l'âge de l'Univers.

En 2001, John Webb, de l'Université de Nouvelles Galles du Sud, et ses collègues ont amélioré le principe de cette méthode. Leurs données étaient constituées de 28 spectres d'absorption observés en direction de 13 quasars différents et concernant les ions magnésium I et II, aluminium II et III, silicium II, chrome II, fer II, nickel II et zinc II dont ils ont comparé les déplacements des raies. Ils ont également étudié 21 autres spectres d'absorption du silicium IV, issus de 13 quasars. L'ensemble de ces données leur a permis d'affirmer que la constante de structure fine a diminué de $5 \text{ à } 10 \times 10^{-3}$ pour cent pendant les 6 à 11 derniers milliards d'années. A-t-on vraiment détecté une variation

de cette constante? La réponse demande d'étudier en détail tous les effets qui pourraient être causés d'erreurs systématiques. Leur liste est longue. Ainsi, quand on compare les spectres de différents atomes, il faut tenir compte du fait que ces atomes sont peut-être localisés dans des régions distinctes du nuage de gaz et, par conséquent, que leurs spectres subissent des décalages divers par effet Doppler. De plus, deux isotopes d'un même élément peuvent avoir des spectres très légèrement différents, aussi faut-il contrôler la composition isotopique des nuages afin de s'assurer que ce n'est pas la présence d'un isotope qui provoque les déplacements de raies observés (par exemple, en étudiant d'autres parties du spectre). L'existence d'un champ magnétique peut, elle aussi, décaler les niveaux d'énergie. Les procédés utilisés par les astronomes engendrent également des risques d'erreurs. Ainsi, pendant le temps d'acquisition des données, la vitesse de la Terre sur son orbite varie, imprimant des effets Doppler différents à des spectres enregistrés à divers instants. Signalons également que la dispersion de la lumière dans l'atmosphère peut distordre le spectre, de même qu'une variation de la température, car elle change l'indice de réfraction de l'air dans le spectrographe...



5. L'INTENSITÉ DE LA FORCE qui s'exerce entre le Soleil et la Terre correspond au nombre de lignes de champ gravitationnel issues du Soleil et interceptées par l'orbite de la Terre. Si l'espace-temps était doté de plus de quatre dimensions, une partie de ces lignes de champ pourrait échapper à notre Univers ordinaire. L'évolution du volume des dimensions supplémentaires se traduirait alors par une variation des lignes de champ disponibles dans l'espace-temps quadridimensionnel où se meuvent la Terre et le Soleil, modifiant ainsi la force qui s'exerce entre eux. Ce phénomène nous apparaîtrait comme une variation de la constante gravitationnelle.

Ainsi, les résultats annoncés doivent encore être passés au crible d'une longue critique et faire l'objet d'une vérification expérimentale par une équipe indépendante et, si possible, sur des systèmes d'absorption différents. Ces travaux sont déjà en cours, notamment au VLT, le très grand télescope européen, installé au Chili. Si l'annonce de J. Webb est prise plus au sérieux que d'autres travaux similaires publiés antérieurement, c'est à cause de l'originalité de sa méthode : elle compare des spectres différents pour lesquels une même variation de la constante de structure fine abaisserait certains niveaux d'énergie et en élèverait d'autres. Ainsi, si l'on constate une série de décalages dans des sens opposés, mais qui s'expliquent tous par une même variation de la constante de structure fine, il semble peu probable qu'ils soient le produit d'une coalition machiavélique de l'ensemble des erreurs systématiques possibles. Cependant la prudence reste de mise et le principal mérite de ce travail est d'inaugurer une méthode de mesure nouvelle et, semble-t-il, prometteuse.

Des théories aux constantes molles

Très récemment, Alexandr Ivanchik et Dmitri Varshalovich, de l'Institut Ioffe, à Saint Petersburg, ainsi qu'Esther Rodriguez et Patrick Petitjean, de l'Institut d'astrophysique de Paris, ont suggéré que certains spectres d'absorption indiquaient une variation du rapport de la masse du proton à celle de l'électron. Leurs données reposent sur les décalages spectraux de raies correspondant à différents états de vibration et de rotation de la molécule d'hydrogène dans des nuages moléculaires lointains. Selon cette étude, le rapport de la masse du proton à celle de l'électron aurait augmenté de 0,019 à 0,095 pour mille sur dix milliards d'années. Comme pour les mesures de la constante de structure fine, on est encore loin d'avoir établi la validité de ce résultat. Toutefois, s'il est confirmé, il présage d'une aubaine pour les théoriciens. En effet, le rapport de la masse du proton et de celle de l'électron dépend de constantes fondamentales autres que la constante de structure fine. Or, précisément, les théories dont nous disposons aujourd'hui et qui admettent une variation de la constante de structure fine prédisent que les constantes de couplage des autres interactions varient de façon corrélée. Ainsi,

on peut espérer tester ces théories à l'aide de mesures de ce type.

Aujourd'hui, tout comme à l'époque de Dirac, les interrogations des physiciens sur la stabilité des constantes tentent, en fait, de mettre en évidence l'existence d'une physique au-delà de nos théories. Le point d'achoppement de l'unification des lois de la physique est la théorie de la gravitation, une interaction que nous ne savons pas unifier avec les trois autres forces de la nature. Or, il se trouve qu'une variation des constantes fondamentales aurait des conséquences directes sur notre conception de la gravitation.

Ainsi, si la gravitation est vraiment décrite par la théorie de la relativité générale (en fait, c'est aussi vrai si elle était simplement décrite par la théorie de Newton), alors les constantes fondamentales devraient être parfaitement fixes. Voici pourquoi : si, par exemple, la constante de structure fine évoluait dans le temps et dans l'espace, l'énergie de liaison électromagnétique responsable de la cohésion d'un corps varierait. Selon l'équation $E = mc^2$, la masse d'un objet changerait avec sa position. En vertu du principe de conservation de l'énergie, un corps dont la masse varierait d'un point à l'autre de sa trajectoire accélérerait en se déplaçant vers une zone où sa masse diminue (ou décélérerait dans le cas inverse). De plus, comme l'énergie électromagnétique du proton est différente de celle du neutron, cette variation de masse dépendrait de la proportion de protons et de neutrons contenus dans un objet et, par conséquent, serait différente pour des corps de diverses compositions chimiques. Autrement dit, les corps en chute libre dans l'espace subiraient une nouvelle force dépendant de leur composition, un résultat qui contredirait l'universalité de la chute libre (le fait que, dans le vide, tous les objets tombent avec la même accélération). Or, le principe d'universalité de la chute libre, parfois nommé principe d'équivalence, est l'un des fondements de la relativité générale.

En conséquence, lorsque l'on réalise des expériences sur la stabilité des constantes, on teste la validité du principe d'équivalence et donc de nos théories de la gravitation. Si les variations annoncées étaient avérées, elles indiqueraient que la relativité générale et le principe d'équivalence n'étaient que des cadres théoriques provisoires, qu'il nous faudrait étendre. Pour autant, nous

ne pourrions pas déduire directement de ces mesures de «meilleures» lois de la gravitation, mais nous pourrions commencer à tester les différentes théories qui permettent, dès aujourd'hui, d'envisager de telles variations, notamment les théories des cordes.

Les théories des cordes, dont le but est d'unifier les quatre interactions fondamentales – et de donner une description de la gravité à très haute énergie – sont des théories définies dans des espaces-temps à 10 ou 11 dimensions. Pour les théoriciens, si notre monde ne présente que quatre dimensions, c'est que les autres sont enroulées sur de très petites distances que la résolution de nos expériences ne peut pas encore révéler. Or, le volume de ces dimensions supplémentaires devrait influencer sur la valeur observée des constantes de couplage des interactions fondamentales.

En effet, le nombre de lignes de force issue de la source d'un champ et interceptées par une particule détermine l'intensité de la force portée par ce champ (voir la figure 5). Or certaines de ces lignes de champ pourraient s'échapper dans le volume des dimensions supplémentaires. Par conséquent, l'intensité d'une interaction fondamentale dépend du volume des dimensions supplémentaires et pourrait évoluer si ce volume variait.

Par ailleurs, en plus des quatre interactions fondamentales, les théories des cordes prédisent l'existence d'une cinquième interaction transmise par une particule nommée dilaton. Le dilaton interagit de diverses façons avec les particules matérielles et cause également une variation des constantes de couplage des autres interactions.

Le volume des dimensions supplémentaires et le dilaton sont des quantités dynamiques qui peuvent varier dans le temps et dans l'espace, par conséquent, les théories des cordes prédisent une variation des constantes de couplage des interactions fondamentales, parmi lesquelles la constante de structure fine. Soulignons que si ce mécanisme est à l'œuvre dans les phénomènes que J. Webb et ses collègues pensent avoir observés, il n'est pas envisageable que seule la constante de structure fine varie, les autres restant fixes.

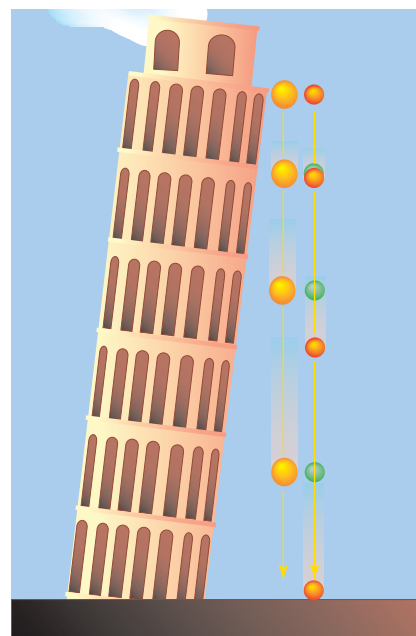
Si l'étude de la fixité des constantes constitue un test du principe d'équivalence, les mesures directes de l'universalité de la chute libre nous renseignent, à l'inverse, sur l'éventuelle variation des dites constantes. Aujourd'hui, on teste

le principe d'équivalence en laboratoire et dans l'espace avec une grande précision. L'expérience de télémétrie laser nommée *Lunar Laser Ranging* qui surveille la trajectoire de la Lune depuis plus de 30 ans avec une précision de un centimètre a permis de conclure que la Terre et la Lune tombent dans le champ de gravité du Soleil avec la même accélération (à 10^{-14} centimètre par seconde carrée près). De cette limite sur la violation du principe d'équivalence, on déduit une limite pour la variation spatiale de la constante de structure fine : sur une distance de l'ordre de l'orbite terrestre, elle ne peut varier de plus d'une partie pour 10^{32} par centimètre. En extrapolant grossièrement cette variation à la taille de l'Univers observable (environ 15 milliards d'années-lumière), on estime que, à cette échelle, la variation relative de la constante de structure fine ne peut dépasser une partie pour 10^4 , ce qui est juste un ordre de grandeur au-dessus des mesures effectuées par J. Webb et ses collègues. Cela signifie que cette mesure est compatible avec les tests du principe d'équivalence réalisés jusqu'ici dans le Système solaire.

Nouvelles expériences

Dans un proche avenir, deux laboratoires spatiaux, *Microscope* et STEP, qui seront lancés respectivement par l'Agence spatiale européenne et par la NASA, vont tester le principe d'équivalence avec une précision 100 à 100 000 fois supérieure à celle des expériences précédentes. Il est fort probable que, si la variation de la constante de structure fine est réelle, ces expériences détecteront une violation du principe d'équivalence.

D'un point de vue théorique, la détection d'une telle variation serait une preuve indiscutable de l'existence d'une nouvelle physique. Tout comme la théorie de la relativité générale a fait perdre sa structure rigide et immuable à l'espace-temps, les nouvelles théories des hautes énergies font perdre aux constantes leur fixité. Malheureusement, les théories des cordes ne nous fournissent pas, pour l'instant, le mécanisme de stabilisation des dimensions supplémentaires et du dilaton qui rendent compte de la quasi-fixité des constantes aujourd'hui. De plus, si l'on confirme la mesure d'une variation de la constante de structure fine, il faudra expliquer pourquoi la stabilisation de ces quantités fut à la fois si efficace et si tardive



6. SELON LE PRINCIPE D'EQUIVALENCE, l'inertie d'un corps, sa masse inerte, est égale à sa sensibilité à la gravité, sa masse grave. Dès lors, on parle simplement de la masse d'un corps pour désigner ces deux propriétés. Une des conséquences de ce principe est l'universalité de la chute libre : tous les corps tombent dans le vide de la même façon (en vert). Si la constante de structure fine variait dans le temps et dans l'espace, l'énergie électromagnétique contenue dans un objet varierait d'un point à l'autre de sa trajectoire, et, en vertu de l'équation $E = mc^2$, sa masse varierait également. En conséquence, l'universalité de la chute libre devrait être mise en défaut.

dans l'histoire de l'Univers (assez, en tout cas, pour que nous l'observions 2 milliards d'années après le Big-bang). Ainsi, l'étude de la variation des constantes fondamentales a connu des ramifications étonnantes depuis qu'elle a été postulée par Dirac. Il ne reste presque rien, aujourd'hui, de son hypothèse des grands nombres, sauf peut-être ceci : nous pensons toujours que la variation des constantes a une relation intime avec le fait que l'Univers est en expansion et évolue... même si nous ne comprenons toujours pas laquelle.

Jean-Philippe UZAN mène ses recherches à l'Institut d'astrophysique de Paris et au Laboratoire de physique théorique d'Orsay.

G. COHEN-TANOUDJI, *Les constantes universelles*, Hachette, 1995.

J.-P. UZAN, *The fundamental constants and their variation*, hep-ph/0205340.

N. ARKANI-HAMED, S. DIMOPOULOS et G. DVALI, *Les dimensions cachées de l'Univers*, in *Pour la Science*, n° 276, octobre 2000.

Le voyage des globules rouges

JACQUES DUFAUX • PATRICK SNABRE • GERARD GUIFFANT

Pour faciliter l'écoulement du sang et réduire les frottements, les globules rouges se déforment et s'alignent dans les capillaires. Dans les vaisseaux de diamètre supérieur, ils forment des agrégats qui se font et se défont au fil du réseau. Des anomalies dans la formation de ces agrégats perturbent la circulation sanguine.

Le 23 octobre 2000, dans la salle d'attente de l'aéroport de Londres-Heathrow, une femme s'écroule, victime d'une embolie pulmonaire. Un caillot de sang s'est formé dans son artère pulmonaire et l'a obstruée. Elle vient de faire un voyage qui a duré 20 heures, durant lequel ses jambes ont été immobilisées, de sorte que les petites pompes qui aident le sang à circuler ont cessé de refouler efficacement le sang vers le cœur. Des gros agrégats de globules rouges se sont formés, épaississant le sang et aboutissant à la formation de caillots qui ont obstrué certains vaisseaux.

Chaque année, le « syndrome de la classe économique » tue environ 100 personnes de par le monde, démontrant combien la fluidité du sang représente un équilibre à la fois vital et fragile. La victime de Londres ne fumait pas, était en bonne condition physique et avait déjà effectué plusieurs longs voyages en avion. Les modifications de la fluidité du sang sont intervenues en raison d'une dérégulation des écoulements sanguins dans le réseau circulatoire.

Comment le sang circule-t-il ? Le cœur est-il secondé par quelques auxiliaires efficaces ? Comment les globules rouges se faufilent-ils dans les minuscules capillaires qui irriguent les recoins les plus retirés de l'organisme ? Les globules rouges, ou érythrocytes, qui délivrent l'oxygène à tous les tissus, sont parmi les principaux acteurs de cette ronde ininterrompue. Remarquablement souples, ils se faufilent dans tous

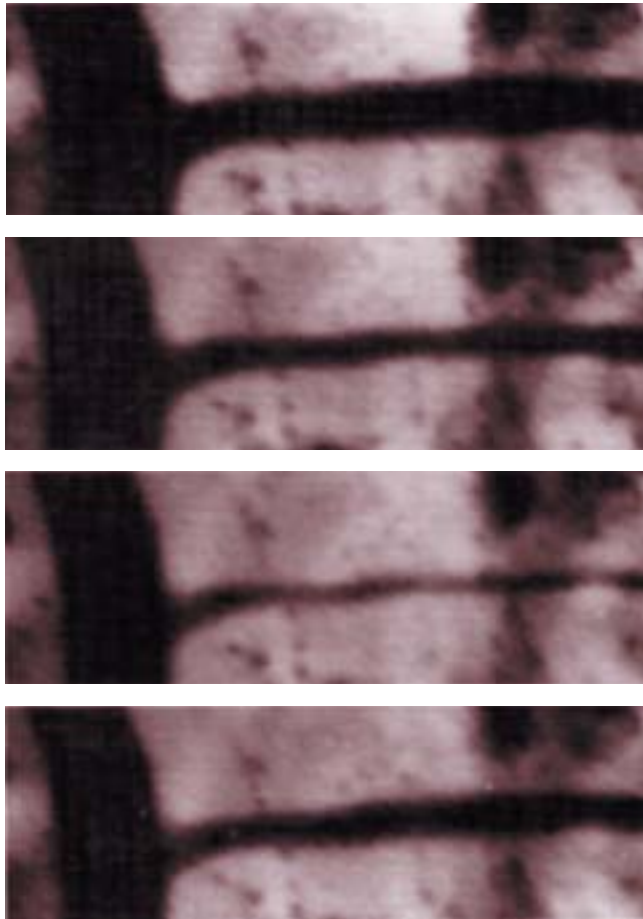
les vaisseaux sanguins (voir la figure 1). Leur forme d'outre-partiellement remplie les autorise à se déformer en tout sens, et à gagner les plus petits capillaires pour y délivrer leur bouffée d'oxygène. Ils ont également la propriété de former des agrégats réversibles (ce qui est différent de la coagulation, phénomène irréversible). Ces agrégats facilitent l'écoulement du sang dans les vaisseaux, mais peuvent aussi les obstruer quand l'agrégation est excessive. Nous examinerons ces deux propriétés des globules rouges – leur déformabilité et leur faculté naturelle à s'agréger – ainsi que leur rôle dans la circulation du sang.

Un réseau extrêmement ramifié

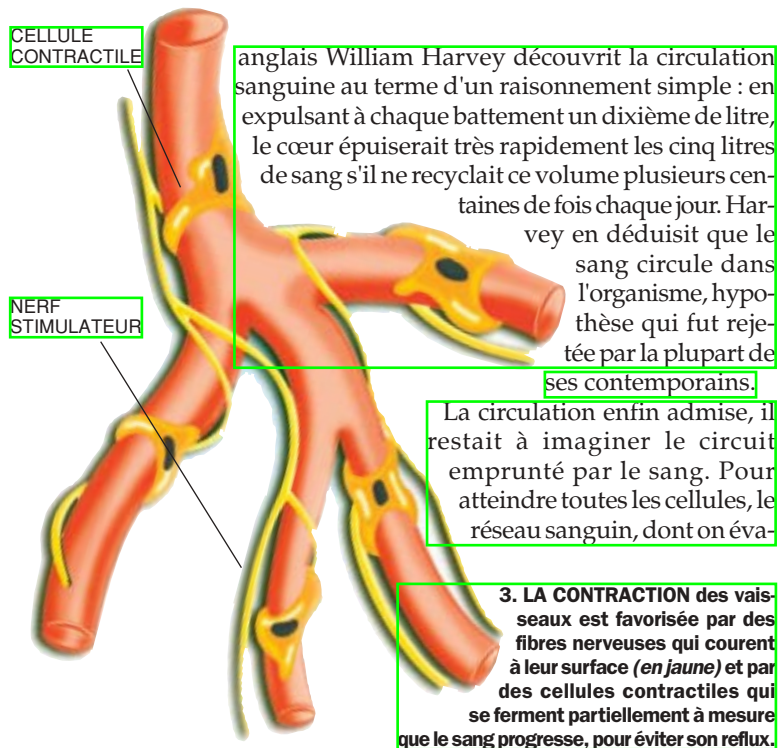
L'irrigation des tissus d'un organisme est une tâche ardue, la longueur totale des vaisseaux sanguins atteignant 90 000 kilomètres ! Pourtant, les puissances cumulées de 30 cœurs humains suffiraient tout juste à faire briller une lampe de chevet : le cœur est une pompe qui sacrifie plus à la longévité qu'à la puissance. Les ventricules expulsent, en 24 heures, quelque 10 000 litres de sang. Au XVIII^e siècle, le médecin

1. LE RESEAU SANGUIN, très ramifié, est le siège de différents types d'écoulements. Dans les vaisseaux sanguins larges, telles les grosses artères, les globules rouges tournoient et se déforment au gré des tourbillons et des collisions incessantes. Dans les vaisseaux plus étroits, les écoulements lents favorisent l'association des globules sous la forme de « piles d'assiettes » ; cette agrégation est réversible. Devant une bifurcation, les empilements de globules se défont et chacun emprunte son propre chemin. Dans les plus petits capillaires, les globules rouges se déforment et adoptent une forme d'« aile de parachute ».





2. LES VEINULES ET LES ARTERIOLES sont entourées de cellules contractiles qui, commandées par l'influx nerveux, font varier leur diamètre. Ces contractions font avancer le sang dans les portions les plus étroites du réseau circulatoire. Sur cette série de photographies espacées de dix secondes, on observe une diminution progressive du diamètre de l'artériole horizontale, puis sur la dernière photographie, un relâchement de l'artériole avant un nouveau cycle de contraction.



tue la longueur à plus de deux fois la circonférence de la Terre, adopte une structure fractale : les plus gros vaisseaux, telle l'aorte, l'artère qui quitte le cœur, se divisent en vaisseaux de plus en plus petits jusqu'aux plus étroits des capillaires dont le diamètre est de l'ordre de trois millièmes de millimètre dans les portions les plus fines. C'est pourquoi, à l'exception du globe oculaire, tout endroit du corps piqué par une aiguille laisse jaillir du sang. Toutefois, cette médaille a un revers : l'extrême ramification du réseau engendre une résistance notable à l'écoulement. À ces deux premières contraintes s'en ajoute une troisième : le sang est un fluide visqueux. Les globules rouges, nécessaires aux échanges gazeux, constituent près de la moitié de la masse sanguine, contribuant eux aussi à augmenter la résistance hydraulique. Comment l'organisme gère-t-il cet ensemble de contraintes ? Il dispose de plusieurs « pompes d'appoint », qui aident le sang à circuler. Des messages nerveux stimulent des muscles qui déforment les artères, et amortissent les fluctuations de la pression dans les vaisseaux (voir les figures 2 et 3). De plus, les petites artères très élastiques absorbent les ondes de pression créées lors des battements cardiaques (si le réseau était rigide, le sang avancerait par à-coups, en reculant à chaque contraction du cœur).

Comme les artères et les artérioles, les veines et les veinules participent à la circulation du sang. Durant la marche, le réseau veineux richement irrigué de la plante des pieds est pressé à chaque pas telle une éponge (voir la figure 4). Cette pression contribue à faire remonter le sang, pour le propulser vers le cœur. Ainsi, des chaussures trop ajustées ou des talons trop hauts finissent par causer une fatigue cardiaque. Le relâchement et la contraction des muscles, lors de la marche, compriment les veines et chassent de même le sang vers le cœur. Un exercice régulier, telle la marche, améliore l'irrigation des muscles et évite la stase veineuse, ou stagnation du sang, alors que la position assise prolongée peut avoir des conséquences néfastes. Outre les aides mécaniques et les régulations nerveuses, les caractéristiques des globules rouges facilitent l'écoulement du sang.

L'érythrocyte, maître de la fluidité

Quand on observe un capillaire sanguin de quelques micromètres de diamètre, on constate que les globules rouges occupent toute la largeur du vaisseau et que, néanmoins, ils progressent sans difficulté, grâce à leur aptitude à la déformation. Imaginons une expérience simple, consistant à remplir une bassine avec des ballons de baudruche gonflés d'eau. Au fond de la cuve, on perce un trou dont le diamètre est légèrement supérieur à celui des ballons. En s'engageant dans le trou, les ballons se bousculent, bloquent parfois l'ouverture, et s'échappent difficilement. Au contraire, des ballons vidés d'un tiers de leur volume se déforment et parviennent à se faufiler : la cuve se vide alors en quelques secondes.

Les érythrocytes présentent justement la forme d'une baudruche partiellement dégonflée. Pour atteindre une telle forme, le globule rouge expulse son noyau lors des premières semaines de son existence. Privé de ce noyau, qui assure normalement la synthèse des protéines, l'érythrocyte est condamné à moyenne échéance, mais il acquiert la capacité de se déformer, indispensable à sa mission de convoyage de l'oxygène. Les érythrocytes ont une forme de disque biconcave de sept micromètres de diamètre, de deux micromètres d'épaisseur en périphérie et de un micromètre au centre. En outre, leur

volume (85 micromètres cubes) et leur surface (135 micromètres carrés) varient très peu d'un globule à l'autre ; aujourd'hui, personne ne sait obtenir une suspension de microparticules déformables aussi bien calibrées.

Grâce à ce stratagème, les globules rouges se faufilent aisément à travers la plupart des vaisseaux, et assurent la respiration de toutes les cellules de l'organisme. Afin d'atteindre les recoins les plus inaccessibles du réseau sans frottement excessif contre les parois des vaisseaux, les globules rouges mettent en œuvre une autre stratégie.

Dans les artérioles et dans les veinules dont le diamètre est compris entre 20 et 300 micromètres, c'est-à-dire supérieur à la taille des globules rouges, les écoulements sont relativement lents et n'empêchent pas l'association des érythrocytes sous la forme de « piles d'assiettes ». Les empilements se regroupent au centre des vaisseaux, laissant la place à une couche lubrifiante de plasma, en contact avec la paroi : cette couche, dite plasmaticque, réduit la résistance à l'écoulement du sang.

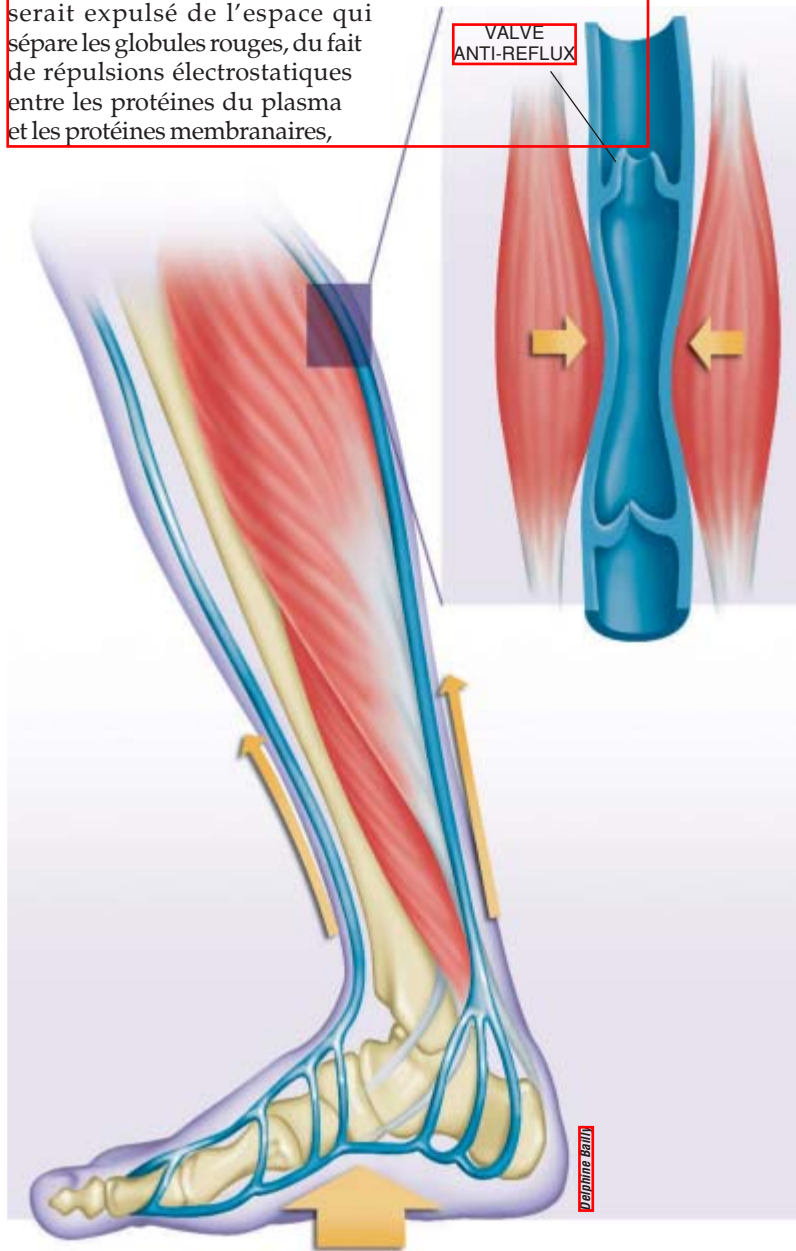
Des piles d'érythrocytes

Pour comprendre la formation de la couche plasmaticque, suivons un érythrocyte à son départ du cœur. Il circule d'abord dans une grosse artère, au milieu de ses semblables dans un désordre complet. Ses congénères se déplacent lentement près des parois du vaisseau et plus vite au centre de l'artère, avec une vitesse proportionnelle au carré de la distance à la paroi vasculaire (selon la loi de Poiseuille). La vitesse du fluide s'annule sur les parois, en raison des frottements, et augmente au centre. Ainsi, dans une grosse artère, le bord d'un globule rouge proche du centre est davantage entraîné que le bord proche de la paroi. De ce fait, les globules rouges, soumis à un courant rapide au centre et à un courant plus lent en périphérie, subissent une force dite de cisaillement et tournoient sur eux-mêmes. De surcroît, les collisions, plus nombreuses près des parois, repoussent les globules rouges vers le centre des vaisseaux. Lorsqu'ils atteignent les territoires plus calmes des artérioles, puis des veinules, la vitesse est plus homogène, et les globules rouges cessent de tournoyer sur eux-mêmes : ils forment des agrégats, s'ordonnent et serpentent en bloc dans la partie centrale des vaisseaux.

L'espace libéré entre un agrégat et la paroi se remplit de plasma ; cette couche plasmaticque joue le rôle d'un lubrifiant qui diminue les frottements des globules rouges contre les parois, facilitant la circulation du sang. Dans les veinules, la couche plasmaticque peut atteindre une dizaine de micromètres d'épaisseur, le faible débit sanguin favorisant l'agrégation des globules rouges et les écoulements, à condition que les agrégats ne grossissent pas au point d'obstruer les vaisseaux. Dans les capillaires de diamètre inférieur à celui des globules rouges, la couche plasmaticque est réduite à l'extrême. Les globules doivent cependant franchir ce cap pour atteindre les tissus les plus reculés de l'organisme. Dans les microvaisseaux, les érythrocytes se déforment et adoptent une forme de corolle, évoquant la voile gonflée d'un parachute (voir la figure 5). Une minuscule couche de plasma subsiste alors entre la membrane des érythrocytes et la paroi des capillaires, laquelle suffit à permettre aux globules déformés de glisser sans difficulté dans les capillaires. Le temps de passage des érythrocytes dans un capillaire dépend de la capa-

cité de la membrane à se déformer et de la viscosité du contenu des globules.

Pourquoi les globules rouges forment-ils ces agrégats facilitant la circulation sanguine ? On a longtemps pensé que les protéines du plasma, notamment le fibrinogène, étaient responsables des interactions réversibles entre les érythrocytes : les molécules de fibrinogène se fixeraient sur certaines protéines membranaires des globules rouges, provoquant leur agrégation par « pontage ». Toutefois, la fixation du fibrinogène sur les glycophorines portées par les globules rouges perturberait la reconnaissance des agents infectieux éventuellement en circulation dans le sang. Selon une autre hypothèse, le fibrinogène serait expulsé de l'espace qui sépare les globules rouges, du fait de répulsions électrostatiques entre les protéines du plasma et les protéines membranaires,



4. AU COURS DE LA MARCHÉ, la pompe du mollet et l'écrasement de la voûte plantaire aident au retour du sang vers le cœur. Avant que le pied se pose, les artères et les veines sont relâchées et le sang s'accumule dans la plante des pieds. Quand le talon touche le sol, le réseau de la plante des pieds est comprimé et le sang est refoulé vers le haut, telle l'eau que l'on expulse d'une éponge imbibée en la pressant. Lorsque le mollet est contracté, il écrase les veines, ce qui propulse le sang vers le haut, le retour du sang vers le bas étant évité par la présence de valves anti-reflux.

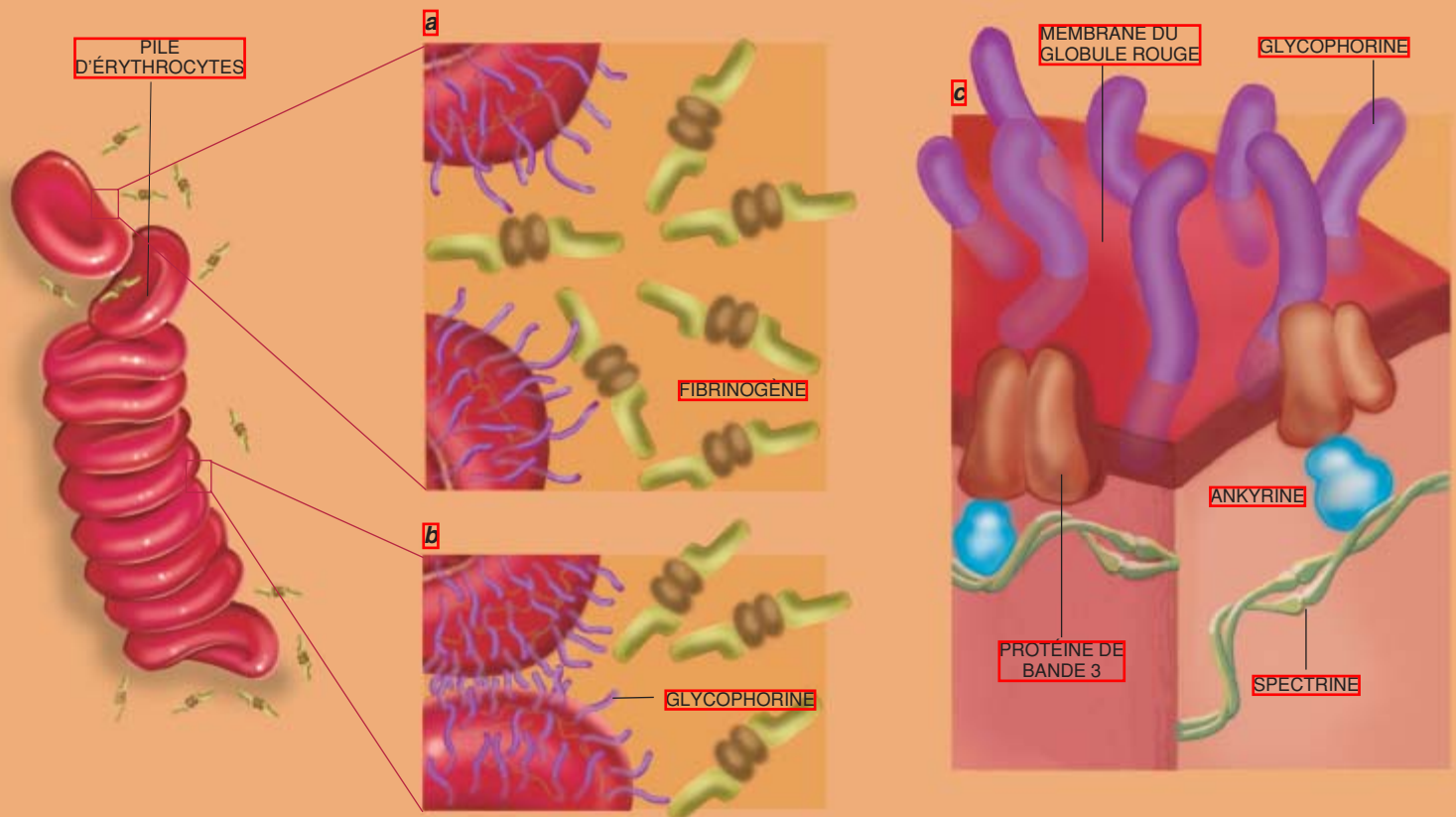


L. BOUTIN

5. AUX BIFURCATIONS, les agrégats de globules rouges se défont. Quand les érythrocytes pénètrent dans des vaisseaux dont le diamètre est inférieur à leur propre dimension, ils se déforment et prennent une forme en aile de parachute (flèche).

toutes porteuses de charges négatives. Lors du rapprochement de deux globules, le fibrinogène refoulé exerce alors une pression sur les faces externes des globules rouges (voir la figure 6). Toutefois, de tels agrégats peuvent se dissocier dans un écoulement rapide, ce qui est important lorsque les « piles d'érythrocytes » doivent se défaire pour s'engager dans de nouvelles ramifications du réseau (voir la figure 5). Les globules rouges s'agrègent ou se désagrègent selon les forces hydrodynamiques produites par l'écoulement. La force de cisaillement dissocie les agrégats lorsqu'elle devient supérieure à la force d'agrégation. Ainsi, la présence des agrégats dépend en grande partie des conditions d'écoulement et de la composition protéique du plasma. Dans les grosses artères, aucun agrégat ne peut subsister en raison des importantes forces de cisaillement. Au contraire, les agrégats apparaissent dans les petits vaisseaux, comme les artérioles et les veinules, facilitant la progression du sang.

Les piles d'érythrocytes présentent d'autres avantages. En occupant le centre des vaisseaux, les agrégats repoussent contre les parois les autres éléments du sang, par exemple les plaquettes sanguines nécessaires à la coagulation. Ces dernières doivent en effet circuler à proximité des parois pour s'accrocher aux lésions et participer à la cicatrisation. De même, les globules blancs détectent mieux les messages signalant la présence d'un agent infectieux, s'ils circulent en périphérie ; face à une telle alerte, ils adhèrent à la paroi du vaisseau où ils patrouillaient, et la traversent pour aller combattre l'infection *in situ*.



6. DES PILES D'ERYTHROCYTES se forment par interaction du fibrinogène avec les glycoporphines, présentes à la surface des globules. Quand les globules sont éloignés (a), le fibrinogène emplit aussi bien l'espace qui sépare les globules que celui qui les entoure. Quand les globules se rapprochent les uns des autres (b), le fibrinogène est expulsé de la

zone de contact entre les globules (ses charges électriques et celles de la glycoporphine se repoussent). Il en résulte une force de pression sur les faces externes des globules rouges, qui entraîne leur empiement. Outre la glycoporphine, la spectrine est un autre constituant des érythrocytes : elle leur confère leur élasticité (c).

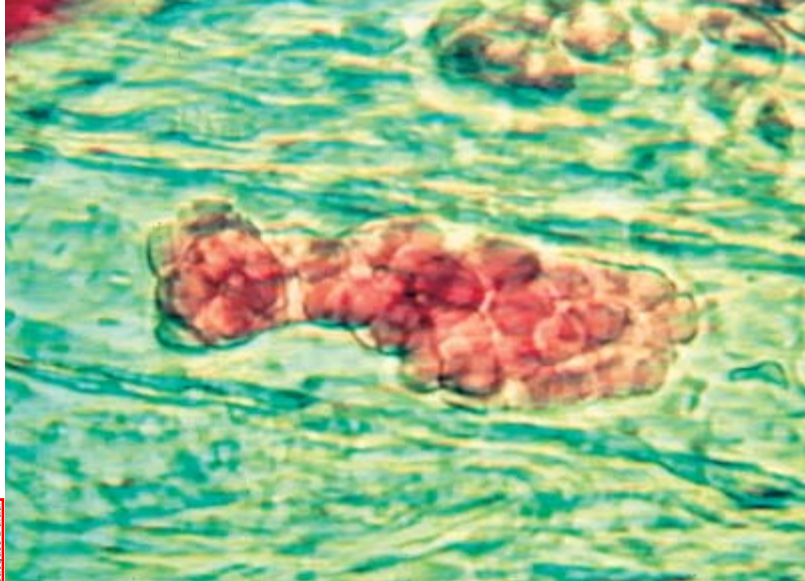
Les pathologies de la circulation

Quand surviennent des anomalies de l'agrégation ou de la déformabilité des globules, diverses pathologies apparaissent. Dans certains cas, notamment dans l'anémie falciforme, les globules sont moins déformables : une mutation sur le gène de l'hémoglobine entraîne la formation de cristaux d'hémoglobine dans les érythrocytes, et les globules prennent une forme de croissants rigides. La circulation sanguine peut être temporairement interrompue dans le réseau des capillaires de certains organes. En raison de l'abondance des capillaires, la situation n'est pas trop grave tant que le nombre de vaisseaux obstrués ne nuit pas à la bonne irrigation de l'organe affecté. Toutefois, la résistance hydraulique du réseau capillaire augmente et impose au cœur une surcharge de travail.

Dans d'autres situations pathologiques, une forte agrégation des globules rouges perturbe l'écoulement du sang. Excès de fibrinogène, hypertension, diabète, présence du virus VIH, mutations des gènes codant certaines protéines membranaires, concentration trop élevée en calcium dans les globules ou sang trop acide, sont autant de facteurs influant sur les interactions des érythrocytes et donnant lieu à une agrégation excessive. Face à ces perturbations qui peuvent menacer l'individu de troubles de la circulation et d'infections, des mécanismes de régulation se mettent en place. Aujourd'hui, l'agrégation est considérée comme un indicateur de l'état de santé de l'organisme, tout comme la température. Diverses « agressions » contre l'organisme peuvent nuire à la capacité naturelle d'agrégation des globules rouges. Ainsi, le tabac et une alimentation déséquilibrée augmentent les risques d'un excès d'agrégation érythrocytaire, pouvant occasionner un arrêt temporaire ou définitif de la circulation (voir la figure 7). Quand le sang ralentit, des lipides se déposent sur la paroi (voire dans la paroi) des vaisseaux sanguins et en rétrécissent le diamètre. Par leur action désagrégante, certains médicaments, telle l'aspirine, facilitent la circulation sanguine. Les vins riches en tanin et les produits alimentaires contenant de la vitamine E améliorent aussi la microcirculation, prescription plus agréable que la saignée qui fut longtemps l'unique remède !

Pour détecter une agrégation anormale des globules rouges, un examen de routine réalisé en laboratoire consiste à suivre la sédimentation du sang. La mesure de cette vitesse (définie comme la distance parcourue en une heure par les agrégats dans le plasma auquel on a ajouté un anticoagulant) est prise en compte dans le diagnostic des anémies et de nombreuses maladies infectieuses ou inflammatoires. Elle est considérée comme pathologique au-delà de 40 millimètres par heure. En cours de grossesse, la vitesse de sédimentation du sang peut atteindre 40 à 50 millimètres par heure, en raison d'une augmentation de la concentration en fibrinogène, qui serait nécessaire pour répondre aux nouvelles conditions d'écoulement dans les territoires très irrigués de la matrice utérine et du placenta.

Une deuxième méthode de mesure consiste à analyser la réflexion de la lumière par une suspension de globules rouges en écoulement. L'agrégation des globules rouges provoque une baisse de la « luminosité » du sang. Les méthodes optiques permettent ainsi de mesurer un seuil de désagrégation ou un temps de réagrégation des globules rouges, données plus fiables et plus précises que la mesure de la vitesse de sédimentation du sang. Dans un



7. UN GROS AGREGAT GLOBULAIRE peut se former dans une situation pathologique, tels le diabète ou le tabagisme. Un tel agrégat résiste aux écoulements et risque d'obstruer un vaisseau, entraînant une moindre oxygénation, voire la nécrose de certains tissus.

avenir proche, les techniques ultrasonores permettront sans doute d'établir un diagnostic du degré d'agrégation des globules rouges dans les vaisseaux d'un malade, car les agrégats réfléchissent davantage les ultrasons que les globules dissociés.

Aujourd'hui, personne n'a réussi à observer *in vivo*, les piles d'érythrocytes souvent synonymes de meilleur écoulement dans les artérioles ou dans les veinules. Le globe oculaire est le seul endroit de l'organisme où l'on peut observer le réseau microcirculatoire. Pour visualiser les piles d'érythrocytes, on espère pouvoir approcher un microscope tout près de l'œil, et observer des érythrocytes dans un des petits capillaires affleurant à la surface du globe oculaire. Les microscopes actuels doivent s'approcher trop près de l'œil pour rendre l'observation possible. La mise au point de microscopes à fort grossissement et à longue distance de travail devrait permettre de visualiser les agrégats de globules rouges dans des capillaires humains, rendant ainsi possible une visualisation directe de l'écoulement du sang dans les vaisseaux. Cette méthode deviendra-t-elle un examen de routine pour les patients présentant des risques cardio-vasculaires ?

Jacques DUFAUX et Gérard GUIFFANT sont professeurs à l'Université Paris 7 Denis Diderot, unité mixte de recherche CNRS 7057. Patrick SNABRE est directeur de recherches au CNRS, à l'Institut de science et génie des matériaux et procédés, UMR 8521, à Odeillo.

Patrick SNABRE, Michel BITOL et Pierre MILLS, *Cell disaggregation behavior in shear flow*, in *Biophysical Journal*, vol. 5, pp. 795-807, mai 1987.

L. HAIDER, P. SNABRE, et M. BOYNARD, *Rheo-acoustical study of the shear disruption of reversible aggregates. Ultrasound scattering from concentrated suspensions of red cell aggregates*, in *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 107, n° 3, pp. 1715-1726, mars 2000.

Jacques DUFAUX, P. FLAUD, D. QUEMADA et Gérard GUIFFANT, *Comprendre la rhéologie : de la circulation du sang à la prise du béton*, EDP Science, GFR, 2002.

Marcos INTAGLIETTA, *Vasomotion et modulation du flux dans la microcirculation*, Karger, 1984.

La traque du plasma

YVES SCHUTZ • HUGUES DELAGRANGE

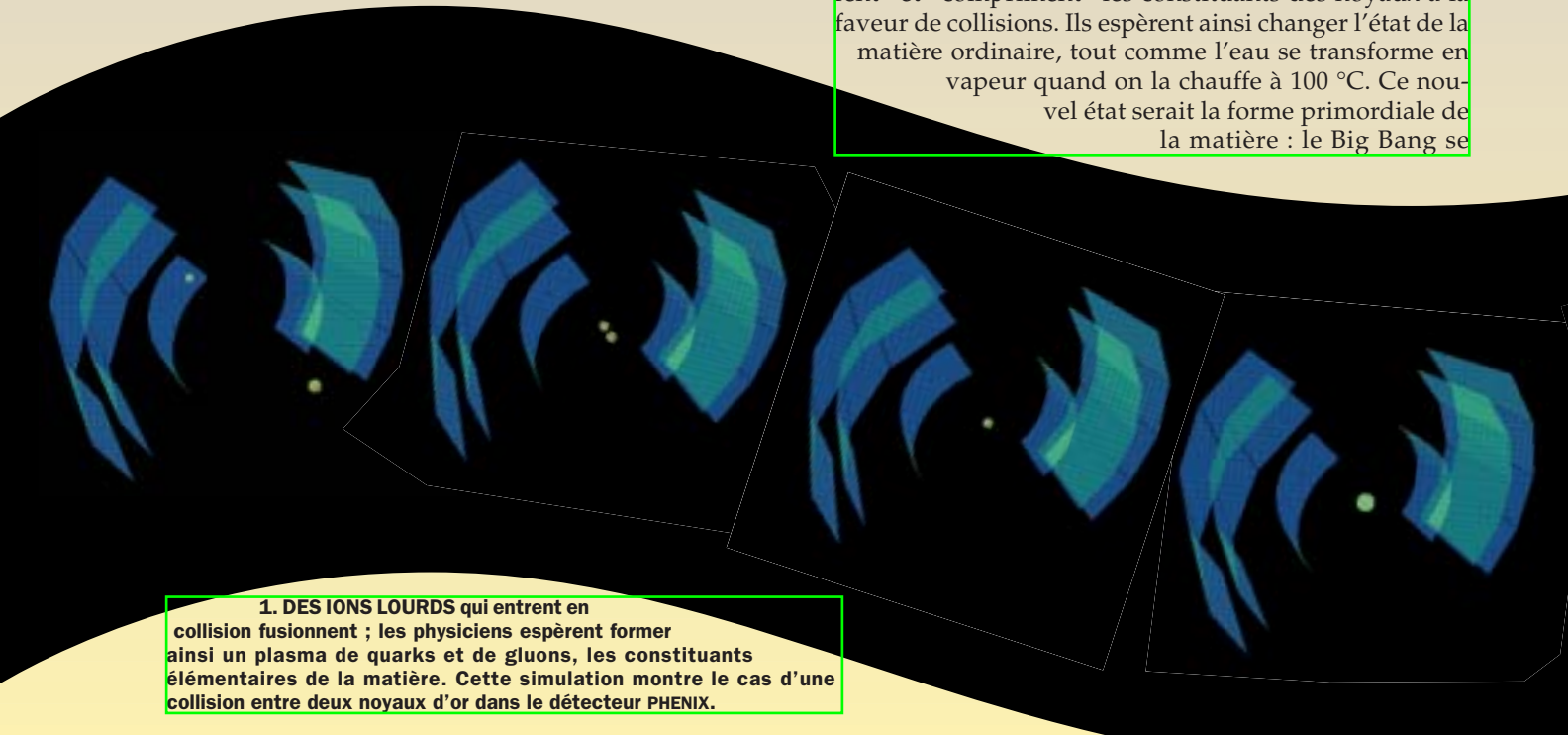
Les constituants des noyaux se désagrègent-ils à très haute température? Après en avoir obtenu des indices à l'accélérateur de Genève, les physiciens ont commencé de nouvelles expériences sur l'accélérateur de particules de Brookhaven pour prouver la réalité de ce phénomène, dit de déconfinement.

Au mois de juillet 1999, la presse annonçait qu'une machine allait reproduire le Big Bang... au risque de détruire la Terre. Les physiciens du Laboratoire de Brookhaven, près de New York, jouaient-ils aux apprentis sorciers? Avec un accélérateur où des noyaux atomiques devaient se heurter avec des énergies considérables, allait-on recréer les conditions infernales qui régnaient à la naissance de l'Univers? Ne risquait-on pas de déclencher une «explosion» aussi gigantesque que celle qui fut à l'origine de l'Univers, il y a 15 milliards d'années? Tout comme Enrico Fermi dut s'employer à démontrer que l'explosion d'une bombe atomique ne risquait pas d'enflammer l'atmosphère, les physiciens réfutèrent les arguments catastrophistes. Ils avancèrent, notamment, que certaines particules cosmiques sont

beaucoup plus énergétiques que celles qui circulent au sein du collisionneur de Brookhaven. Or, elles n'ont jamais déclenché de catastrophes cosmiques. Les premières expériences confirmèrent bientôt que ces collisions de noyaux atomiques se déroulent sans perturber le cours de l'histoire universelle.

Un phénomène violent et éphémère

Les physiciens veulent prouver l'existence du «plasma de quarks et de gluons» ou encore de la «matière de quarks». C'est ainsi qu'ils désignent le plasma qu'ils pensent créer en libérant les quarks et les gluons, les constituants des nucléons (protons et neutrons). Pour ce faire, ils «chauffent» et «compriment» les constituants des noyaux à la faveur de collisions. Ils espèrent ainsi changer l'état de la matière ordinaire, tout comme l'eau se transforme en vapeur quand on la chauffe à 100 °C. Ce nouvel état serait la forme primordiale de la matière : le Big Bang se



1. DES IONS LOURDS qui entrent en collision fusionnent ; les physiciens espèrent former ainsi un plasma de quarks et de gluons, les constituants élémentaires de la matière. Cette simulation montre le cas d'une collision entre deux noyaux d'or dans le détecteur PHENIX.

de quarks et de gluons

développa à partir d'un état d'une densité d'énergie extrême pour aboutir à l'Univers actuel froid et dilué. La matière primordiale exista quelques microsecondes après le Big Bang. Comment les quarks et les gluons se sont-ils ensuite «condensés» pour former la matière telle que nous la connaissons? Pour le savoir, une méthode consiste à parcourir le «chemin inverse» de celui qui fut celui de l'Univers : on tente de créer un plasma de quarks et de gluons à partir de la matière ordinaire.

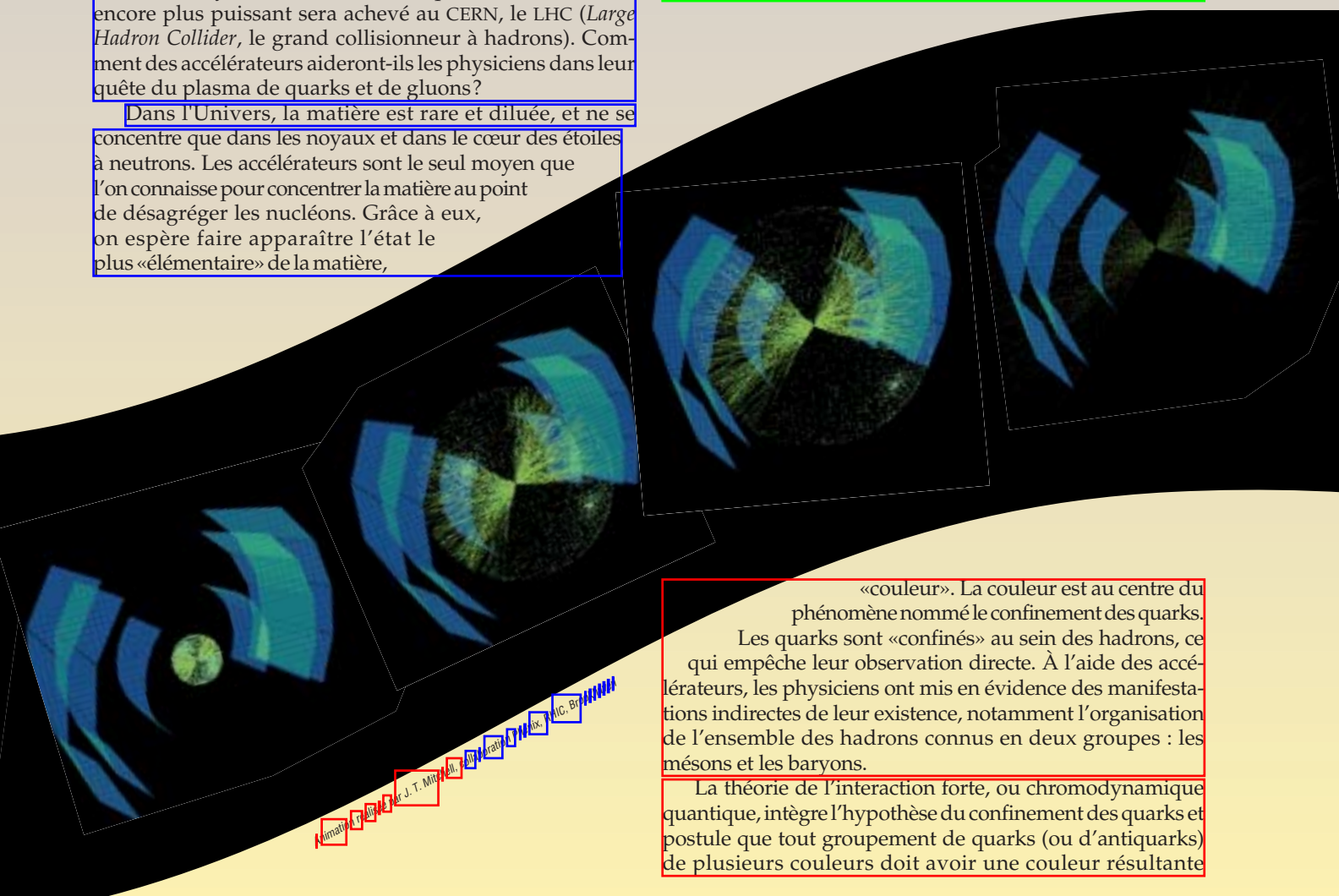
Expériences pionnières

Les premières expériences de ce type ont eu lieu à Genève, au CERN (*Organisation européenne pour la recherche nucléaire*). Comme elles n'ont pas fourni de résultats concluants, les physiciens poursuivent leurs expériences au RHIC, *Relativistic Heavy Ion Collider*, c'est-à-dire le collisionneur relativiste à ions lourds, au Laboratoire de Brookhaven. Cet accélérateur d'ions, le plus puissant du monde, est entré en activité il y a deux ans. Dans cinq ans, un accélérateur encore plus puissant sera achevé au CERN, le LHC (*Large Hadron Collider*, le grand collisionneur à hadrons). Comment des accélérateurs aideront-ils les physiciens dans leur quête du plasma de quarks et de gluons?

Dans l'Univers, la matière est rare et diluée, et ne se concentre que dans les noyaux et dans le cœur des étoiles à neutrons. Les accélérateurs sont le seul moyen que l'on connaisse pour concentrer la matière au point de désagréger les nucléons. Grâce à eux, on espère faire apparaître l'état le plus «élémentaire» de la matière,

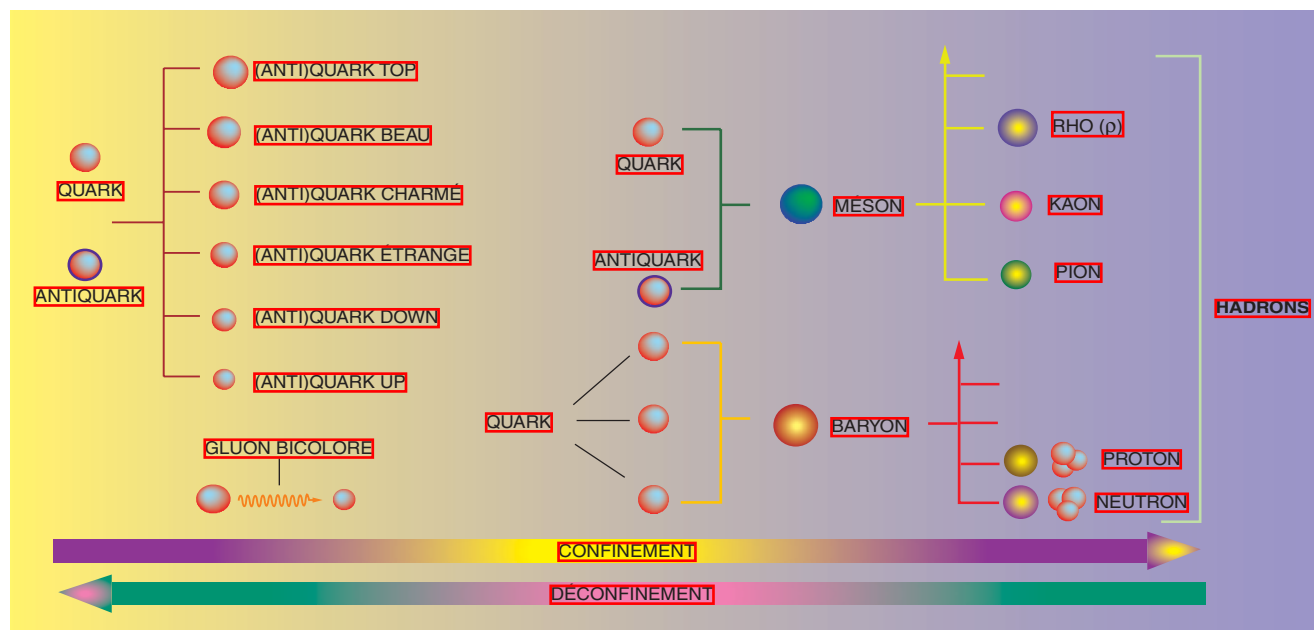
celui qu'elle adopte quand ses constituants ultimes sont libérés. Nous savons aujourd'hui que les nucléons ne sont pas des particules élémentaires, mais qu'ils sont constitués de trois quarks. Ces briques de la matière interagissent suivant un mode particulier, nommé l'interaction forte. Les quarks s'associent soit par deux (un quark et un antiquark) pour former les mésons (pions, kaons, ρ , etc.), soit par trois ou plus, pour former les baryons (protons, neutrons, etc.). L'ensemble des mésons et des baryons constitue le groupe des hadrons, l'essentiel de la masse visible de l'Univers.

Avec l'interaction forte, l'interaction faible, l'interaction électromagnétique et la gravitation constituent les quatre interactions fondamentales de la matière (ou types de forces). Deux particules en interaction échangent une particule messagère. Ainsi, une interaction forte se traduit par l'échange d'un quantum nommé gluon, tandis qu'une interaction électromagnétique se traduit par l'échange d'un photon. Les quarks, les antiquarks et les gluons sont dits «colorés», car ils sont caractérisés par une grandeur physique analogue à la charge électrique, nommée charge de couleur ou



«couleur». La couleur est au centre du phénomène nommé le confinement des quarks. Les quarks sont «confinés» au sein des hadrons, ce qui empêche leur observation directe. À l'aide des accélérateurs, les physiciens ont mis en évidence des manifestations indirectes de leur existence, notamment l'organisation de l'ensemble des hadrons connus en deux groupes : les mésons et les baryons.

La théorie de l'interaction forte, ou chromodynamique quantique, intègre l'hypothèse du confinement des quarks et postule que tout groupement de quarks (ou d'antiquarks) de plusieurs couleurs doit avoir une couleur résultante



2. POUR ETUDIER LES CONSTITUANTS DES HADRONS, on doit les dissocier, c'est-à-dire «déconfiner» la matière. Ces constituants, les quarks et les antiquarks, ont chacun, six «saveurs» : Up, Down, Étrange, Charmé, Beau et Top. Chacun de ces états a en outre trois «couleurs» possibles (non représentées), dont le mélange donne une couleur blanche. Les gluons, les médiateurs de l'interaction forte entre deux quarks, par

exemple, sont eux-mêmes porteurs d'une couleur et d'une anticouleur. Les hadrons sont des associations incolores d'un quark et d'un antiquark (un méson) ou de trois quarks (un baryon). Les noyaux sont des assemblages de neutrons (quarks Up, Up et Down) et de protons (quarks Up, Down et Down). La matière reste dans son état ordinaire tant que la température demeure inférieure à une valeur dite critique.

nulle (blanche), exactement comme les composantes de l'arc-en-ciel se combinent pour donner la couleur blanche de la lumière visible. Nous vivons dans un monde incolore au sens de l'interaction forte, même s'il est fait de couleurs variées ou de particules élémentaires dites colorées.

Ainsi, le plasma de quarks et de gluons est la matière qui existe après le «déconfinement», lorsqu'est atteinte une densité d'énergie (ou, ce qui est équivalent, une température) assez grande pour que les quarks et les gluons se meuvent librement. Au contraire, la matière ordinaire est comparable à des bulles de glu – les protons et les neutrons – à l'intérieur desquelles les quarks sont «englués», ou encore confinés par les gluons qu'ils échangent. La cohésion de la matière nucléaire résulte de «l'interaction nucléaire», la forme que prend l'interaction forte entre les protons et les neutrons. Toutefois, comme une membrane de bulle, même extrêmement mince, voile les phénomènes qui se produisent à l'intérieur, les structures hadroniques sont autant d'écrans qui dissimulent l'interaction forte. Pour avoir accès à l'interaction forte sous sa forme pure, il faut «entrer» dans la bulle. C'est la raison pour laquelle les physiciens veulent faire disparaître le confinement.

Les physiciens simulent le plasma de quarks et de gluons en décomposant l'espace-temps en «maillages» assez petites et assez simples pour que la résolution des équations qui décrivent cet état de la matière y devienne possible. D'après ces simulations, le déconfinement a lieu au-delà d'une certaine densité d'énergie, environ dix fois supérieure à celle de la matière nucléaire ordinaire (0,14 gigaélectronvolt par fermi cube, soit environ un quart de million de kilotonnes par centimètre cube) ou encore une température de quelque 20 000 milliards de kelvins.

Ainsi, quelques fractions de seconde après l'apparition du cosmos, la température atteignait des milliers de milliards de kelvins. L'Univers formait alors un milieu contenant tous

les quarks et les gluons. Les collisions susceptibles de faire éclater les bulles hadroniques se produisent à des vitesses proches de celle de la lumière, et créent des milliers de particules. Le phénomène est confiné dans un volume de l'ordre de un millier de fermis cubes (un fermi vaut 10^{-15} mètre, soit un millième de milliardième de millimètre), et il dure à peine 10^{-24} seconde.

Sur la piste du plasma

Selon Luciano Maiani, qui dirige le CERN, les données rassemblées dans le Centre de recherche genevois au cours de sept expériences menées sur les collisions d'ions lourds ont révélé un nouvel état de la matière, vraisemblablement, le plasma de quarks et de gluons. Pour rassembler les indices de l'existence de cet état, les physiciens ont multiplié, six ans durant, les expériences sur des faisceaux d'ions lourds de haute énergie (33×10^{12} électronvolts).

Les expériences se sont succédé à partir de 1994, chacune d'elles traquant, à l'aide d'un détecteur, un type particulier de «signatures» (la présence du plasma de quarks et de gluons) qui se sont produites au cours du choc entre noyaux. Les détecteurs sont des «machines à mesurer les probabilités», c'est-à-dire les fréquences de ces signatures. Les probabilités des signatures intéressantes sont en général très faibles. En outre, elles sont noyées dans un important bruit de fond, car les collisions qui les font apparaître produisent de nombreuses particules. Les détecteurs accumulent les données d'observation de telle ou telle particule, tir après tir, année après année. Dans une unique campagne de mesure, l'une de ces énormes machines enregistre les milliers de particules produites par plusieurs centaines de millions de collisions! Les informations doivent être traitées rapidement et les particules produites doivent être distinguées les unes des autres.

Au CERN, les physiciens ont obtenu une densité d'énergie de quelque 2,5 gigaélectronvolts par fermi cube, soit 20 fois plus élevée que la densité d'énergie dans le noyau d'un atome : cette valeur est bien supérieure à la densité critique, où se produit, selon la théorie, la transition entre un gaz de hadrons et le plasma de quarks et de gluons. Or, on a observé indirectement que le comportement de la matière nucléaire change lors des collisions frontales, lorsque les densités d'énergie les plus importantes sont atteintes. Le phénomène correspond-il à la création d'un plasma de quarks et de gluons ?

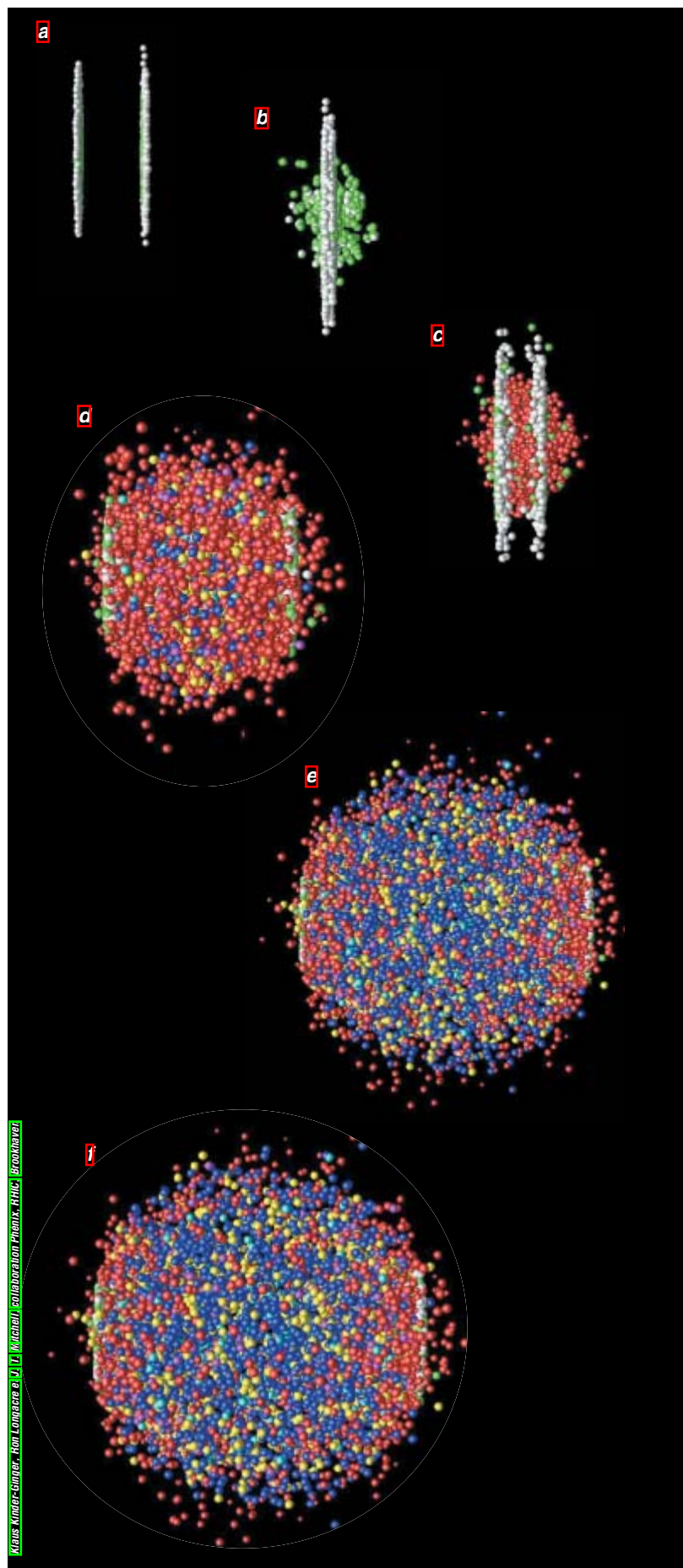
Pour le savoir, ils ont commencé par éliminer les autres causes possibles découlant de phénomènes connus. Pour suivre leur traque, les physiciens ont identifié quatre « signatures indirectes », prédites par la théorie. La première est la forte « saveur étrange » de la matière issue de la collision. On dénombre six types de quarks, nommés saveurs. Par ordre croissant de masses, les saveurs des quarks sont les quarks « Up », « Down », « Étrange », « Charmé », « Beau » et « Top ». Tandis que la matière ordinaire ne comprend que les saveurs Up et Down, d'autres types de matière existent qui sont enrichis en saveurs rares, tel le quark étrange. Ainsi, les moins lourds des mésons étranges, les kaons, sont des mésons de type anti-Up-Étrange, et le plus léger des baryons étranges est la particule Λ , un assemblage Up-Down-Étrange.

Créé à partir du vide et de l'énergie de la collision, un plasma de quarks et de gluons tout juste formé contient surtout des quarks légers (Up et Down). Au-delà de la température de transition vers le plasma, le principe de Pauli (deux fermions ne peuvent être dans le même état physique) implique la création de nouvelles saveurs de quarks, au premier rang desquelles la saveur étrange. Or, au CERN, les expérimentateurs ont bien détecté la forte production de hadrons étranges prédite au-dessus de la densité critique.

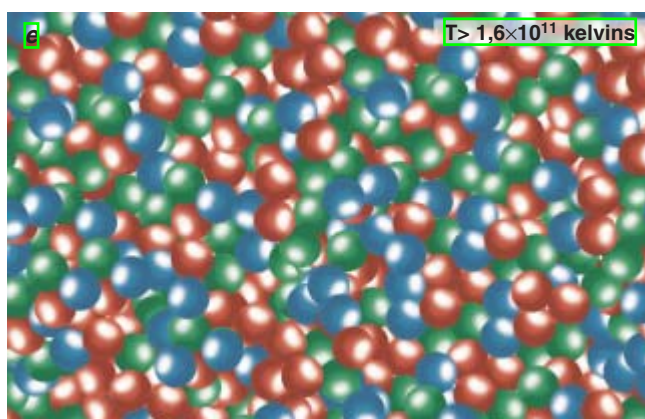
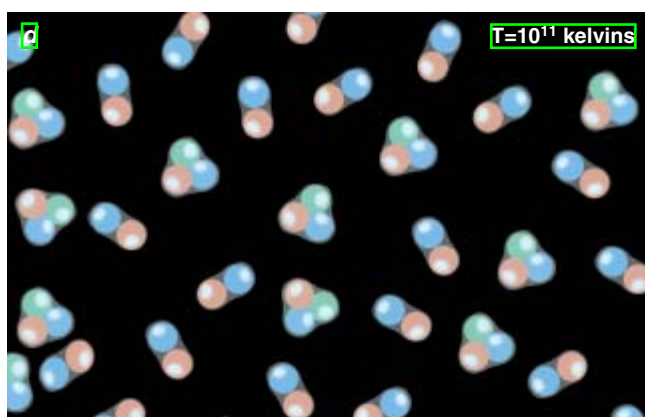
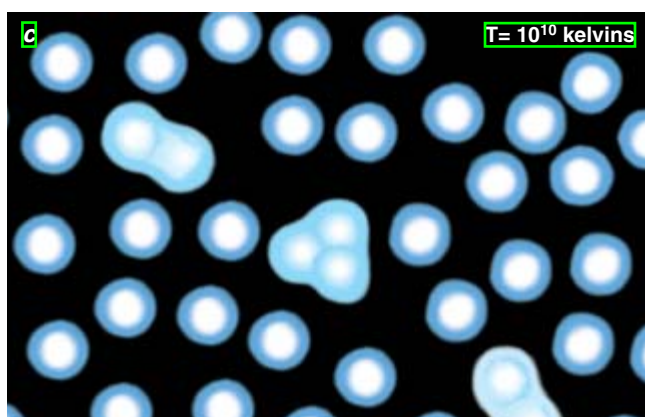
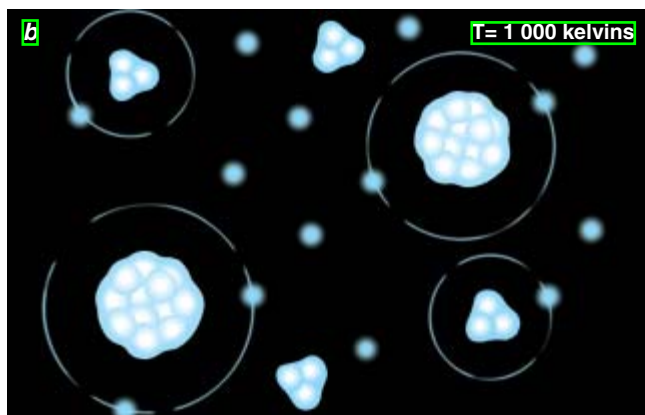
La perte de masse de certaines des particules issues de la collision constitue la deuxième signature de la formation de matière de quarks au-dessus de la densité critique. Le méson ρ_0 en est un exemple. Assemblage d'un quark Up et d'un anti-quark Down, sa masse est inférieure à celle du proton (77 pour cent), ce qui facilite sa production en nombre suffisant. Sa durée de vie est courte et il se désintègre notamment en une paire électron-positon, enregistrée par le détecteur (une particule électromagnétique n'interagit quasiment pas avec la matière nucléaire). Ainsi, on a détecté assez de mésons ρ_0 pour mesurer leur masse alors qu'ils étaient encore englués dans le milieu formé lors de la collision.

Qu'a-t-on constaté ? Ces particules semblent « fondre ». Cette perte de masse est d'autant plus grande que la collision est violente, c'est-à-dire que la densité d'énergie atteinte est élevée. À quoi correspond-t-elle ? Elle serait une conséquence de la restauration partielle de la situation qui régnerait si les quarks avaient des masses nulles, comme lors de la création de l'Univers. Or, la théorie prévoit que les quarks perdent leur masse à mesure que l'énergie augmente. Ainsi,

3. CETTE SIMULATION DU CHOC de deux noyaux d'or montre le cas d'une collision centrale, c'est-à-dire que les deux noyaux se recouvrent entièrement au moment de leur rencontre. Ils apparaissent d'abord allongés par la contraction de Lorentz, un effet relativiste qui déforme les dimensions longitudinales des objets se déplaçant à grande vitesse (a). Puis ils se « traversent » (b). Le choc crée entre eux une région emplies d'une multitude de particules nouvelles agitées par l'interaction forte : les quarks et les gluons (c et d). Après s'être formé, le plasma de quarks reste brièvement en équilibre thermique avant d'entrer en expansion, de se refroidir et de se muer en hadrons (e et f).



Klaus Knieper, Rolf Langner et al., J. W. Knieper, J. W. Knieper, J. W. Knieper, J. W. Knieper, J. W. Knieper, J. W. Knieper



la perte de masse du p_0 est, comme prévu, un signe de l'apparition de quarks de faibles masses aux énergies où la matière de quark existe.

La troisième signature du plasma

La troisième signature du plasma de quarks et de gluons est la disparition manifeste du méson J/ψ au-dessus de la densité critique. Constitué d'un quark Charmé et de son anti-quark, J/ψ est l'état fondamental (de plus faible masse) du charmonium (les mésons ne contenant que des quarks Charmés). Trois fois plus lourds que le proton, les mésons J/ψ sont instables. Ils se désintègrent très vite, notamment en une paire de « leptons » (électrons ou muons) que les détecteurs identifient facilement. De ces observations, on peut déduire les propriétés du J/ψ lorsqu'il est encore englué dans le plasma. Les physiciens ont observé que la production de ce méson était soudainement réduite, quand les collisions deviennent plus violentes, c'est-à-dire quand les axes des noyaux de plomb tendent à se confondre. Cette situation tient à la présence de quarks libres de toutes les couleurs et de plusieurs saveurs dans le plasma : leur présence rend très improbable la combinaison d'un quark et d'un antiquark Charmé en un J/ψ .

La dernière signature prévue par la théorie de la formation du plasma est le « caractère thermique » de son rayonnement électromagnétique. On nomme rayonnement thermique, le rayonnement électromagnétique d'un corps en équilibre thermodynamique avec son environnement. Le rayonnement de la matière formée par la collision est particulièrement intense au centre du volume de collision. Après avoir vérifié que la forme spectrale de ce rayonnement (son évolution en fonction de l'énergie) est analogue à celle d'un rayonnement thermique, les physiciens en ont déduit la température du corps émetteur. La valeur trouvée est supérieure à la température critique théorique de transition de la matière nucléaire vers le plasma de quarks et de gluons.

Tous les indices obtenus au CERN plaident en faveur de l'existence de la matière de quark, même si d'autres interprétations restent possibles. On peut affirmer qu'un nouvel état de la matière s'est bel et bien formé dans l'accélérateur du CERN. Comment acquérir la certitude qu'il s'agissait du plasma de quarks et de gluons ? Pour le savoir, il importe de mieux explorer son domaine d'existence présumé. Les physiciens sont en train de le faire au RHIC.

Les expériences en cours au RHIC

Parce qu'elles se déroulent bien au-dessus de la densité critique, les expériences du RHIC ont bien plus de chances de révéler l'existence du plasma recherché. Après 20 ans de préparation, les premiers chocs de noyaux d'or ont eu lieu le 12 juin 2000. En quelques mois, l'énergie des collisions est passée de 55 gigaélectronvolts à 200 gigaélectronvolts (dans

4. PLUSIEURS TYPES DE PLASMAS se forment quand l'énergie augmente. Aux températures usuelles, la matière est constituée d'atomes (a). Dès quelques milliers de kelvins, elle s'ionise, c'est-à-dire que les atomes libèrent progressivement leurs électrons (b). Au-dessus de dix milliards de kelvins, la matière nucléaire se vaporise en un gaz de nucléons (c), puis en un gaz de hadrons (d). Ces derniers sont soit des mésons (deux quarks), soit des baryons (trois quarks). Les quarks portent trois couleurs possibles, c'est-à-dire trois valeurs différentes de la charge de l'interaction forte. Enfin, au-dessus de 160 milliards de degrés, les hadrons se « dissolvent » à leur tour, et un plasma de quarks et de gluons apparaît (e).

(le centre de masse), soit une énergie dix fois supérieure à celle qui fut accessible au CERN. Deux faisceaux de noyaux d'or sont accélérés en sens opposé sur une trajectoire annulaire de 3,83 kilomètres de longueur. Constitués de paquets successifs d'environ un milliard d'ions, ces deux faisceaux sont précipités l'un contre l'autre dès qu'ils ont atteint 0,99995 pour cent de la vitesse de la lumière. Au cours d'une collision, environ 10 000 particules sont émises dans toutes les directions.

Les expérimentateurs ont commencé par vérifier que la densité d'énergie atteinte dans la matière nucléaire est bien supérieure à la valeur critique. L'opération, complexe, nécessite de résoudre plusieurs problèmes inverses, c'est-à-dire de déduire des données enregistrées par les détecteurs (et qui correspondent aux particules formées lors de la collision), les propriétés physiques de la matière.

A-t-on obtenu d'autres preuves indirectes de la formation d'un plasma de quarks et de gluons? Les quelques centaines de physiciens de la collaboration STAR ont d'abord observé que les particules produites lors de la collision ne sont pas réparties uniformément dans l'espace : elles semblent s'écouler dans des directions privilégiées. Ce caractère anisotrope ne correspond pas à ce que l'on attend si l'on tient seulement compte de la géométrie de la collision. La réorientation des flux de particules sortantes – leur anisotropie – s'explique par les interactions fortes intenses qui se déroulent au sein du milieu, et qui sont sans doute dues à la formation d'un plasma en équilibre thermodynamique.

Les distributions spectrales obtenues au RHIC ont confirmé l'existence d'un équilibre thermodynamique. En effet, quand un gaz est en équilibre thermique, toutes ses particules ont un comportement identique, c'est-à-dire, notamment, que toutes les quantités de mouvement ont la même répartition. Les observations au RHIC confirment que c'est bien le cas.

Fragmentation et jets de particules

La collaboration PHENIX au RHIC a aussi mis en évidence un phénomène nouveau, sans doute dû à la présence du plasma de quarks et de gluons. On a observé que la production de particules ayant la plus grande quantité de mouvement transverse est atténuée dans les collisions frontales. Aux énergies mises en jeu au RHIC, une collision d'ions lourds est, en première approximation, un choc de quarks et de gluons. Lors de la collision, ces derniers sont diffusés à des angles d'autant plus grands que le choc est violent. La composante transverse de la quantité de mouvement (perpendiculaire à l'axe) est évaluée à partir des angles de diffusion. Une fois qu'il s'est échappé de la zone d'interaction (le volume de collision), un quark ou un gluon donne naissance, par un mécanisme de «fragmentation», à un jet de particules. En effet, les quarks qui quittent le volume de collision ne peuvent rester isolés (un quark n'est jamais observé seul) : ils «s'hadronisent», c'est-à-dire qu'ils donnent naissance à des hadrons. L'énergie des hadrons du jet reflète celle des quarks et des gluons initiaux, et elle est observée par les détecteurs. Cependant, avant de s'échapper de la zone d'interaction, les quarks et les gluons de grande impulsion rencontrent sur leur chemin la matière nucléaire chaude et dense (le plasma?) formée par la collision. Or, un quark qui traverse une telle matière perd d'autant plus d'énergie que le milieu traversé est coloré. En d'autres termes, il est bien plus freiné dans la matière de quarks que dans la matière hadronique. Dans les détecteurs, cela se traduit par un affaiblissement de



5. L'ANNEAU DU COLLISIONNEUR du Laboratoire de Brookhaven, nommé RHIC, est enfoui dans un tunnel à quatre mètres de profondeur. Des paquets d'ions d'or s'y déplacent à une vitesse très proche de celle de la lumière, en suivant un anneau de près de quatre kilomètres de circonférence.

l'énergie des particules sortantes : c'est précisément le phénomène nouveau que les physiciens ont observé.

Le plasma de quarks et de gluons a-t-il, pour autant, été découvert? La matière déconfinée existe-t-elle? En 2001, les expériences du RHIC ont accumulé dix fois plus de données qu'en 2000, et la récolte continue. Les résultats du RHIC semblent indiquer que la matière confinée existe bel et bien, mais demandent à être renforcés. L'étape suivante de la quête du plasma de quarks et de gluons aura lieu au CERN. Un grand détecteur est d'ores et déjà en cours de réalisation, et sera employé sur le faisceau d'ions lourds du grand collisionneur LHC en construction au CERN. Les noyaux de plomb seront accélérés dans deux anneaux de 27 kilomètres de circonférence, qui permettront d'atteindre une vitesse égale à 0,99999993 pour cent de celle de la lumière!

Chacune des collisions libérera une énergie de 1 100 téraélectronvolts (1 téraélectronvolt vaut 10^{12} électronvolts), suffisante pour porter la matière nucléaire concentrée à quelque 1 000 milliards de kelvins. Cette énergie correspond à 0,2 millijoule, soit l'énergie d'un moustique en vol, mais elle est concentrée dans un volume de quelques milliers de fermis cubes seulement : elle est considérable. Le millier de physiciens et d'ingénieurs de 27 pays qui préparent cette nouvelle campagne expérimentale sera alors en mesure d'explorer le domaine d'existence du plasma de quarks et de gluons, d'autant plus qu'au grand collisionneur, le phénomène observable durera dix fois plus longtemps qu'au RHIC. Gageons que cela suffira pour révéler, sans contestation possible, le déconfinement et pour l'étudier sous toutes ses facettes.

Yves SCHUTZ et Hugues DELAGRANGE sont directeurs de recherche au Laboratoire SUBATECH de Nantes, une unité mixte de recherche du CNRS (IN2P3), de l'Université de Nantes et de l'École des mines de Nantes. Ils collaborent aux expériences PHENIX au RHIC et ALICE au CERN.

Madhusree MUKERJEE, *Un Big Bang miniature*, *Pour la Science*, n° 259, mai 1999.

K. H. ACKERMANN et col., *Elliptic Flow in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV*, Collaboration STAR, in *Phys. Rev. Lett.* 86, 402, 2001.

K. ADCOX et col., *Suppression of Hadrons with Large Transverse Momentum in Central Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV*, Collaboration PHENIX, in *Phys. Rev. Lett.* 88, 022301, 2002.

Justice aveugle

DENNIS SHASHA

Pour trancher certaines affaires, un juge utilise les probabilités, mais aussi la bonne foi des deux parties opposées.

Un juge versé en mathématiques utilise un étrange moyen pour régler les litiges financiers. Avant de défendre leur cause devant le magistrat, le plaignant et l'accusé estiment le verdict : le plaignant inscrit sur un papier la somme P qu'il pense être en droit de recevoir, puis cache le papier dans une enveloppe scellée ; de la même façon, l'accusé décide de la somme A dont il se sent redevable.

Le juge ignore P et A . Après les plaidoiries de chacun, il rend son verdict : «L'accusé doit la somme J au plaignant à titre de dommages et intérêts!» Puis, il compare cette somme à P et à A . Quand J est plus proche de P , l'accusé doit P . En revanche, lorsque J est plus proche de A , l'accusé paie la somme A . Par exemple, le plaignant a écrit 18 millions

d'euros, tandis que l'accusé pense ne rien devoir. Le juge estime le différend à huit millions d'euros. Puisque 8 est plus proche de 0 que de 18, le plaignant ne touche rien. Ainsi, chacun a-t-il intérêt à être le plus juste dans ses appréciations.

Quelle est la meilleure stratégie du plaignant sachant que le verdict du juge sera compris entre trois et dix millions d'euros, avec une probabilité équivalente pour toutes les sommes? En d'autres termes, combien le plaignant doit-il revendiquer pour optimiser son indemnité? Doit-il changer de stratégie s'il suspecte l'accusé de pouvoir lire la somme P à travers l'enveloppe?

La solution de l'énigme sera donnée le mois prochain, et sera bientôt disponible sur le site Internet : www.pourlascience.com



Solution du problème d'énigmaths du numéro 296

La femme F frappe D , mais celle-ci ne frappe personne, elle est donc entrée dans la hutte de F . Cette observation est cohérente avec les deux phrases : « C parle à F » et « A parle à F ».

On remarque que F ne frappe personne d'autre que D : C et A ont toutes les deux accusé D .

E frappe A . A est-elle coupable d'intrusion dans la hutte de E , alors qu'elle frappe B qui a parlé à E ? En d'autres termes, B aurait-elle accusé A à tort d'être entrée dans la hutte de E ?

A frappe C qui, elle, ne frappe personne. Aussi, C est-elle entrée dans la hutte de A et a été dénoncée par F .

A frappe B , car B a fait un faux témoignage. C'est la réponse à notre précédente question.

B a frappé A pour une seule raison : E a accusé A d'intrusion. Puisque A frappe ensuite E , A montre qu'il s'agissait d'une fausse accusation.

Les deux dernières bastonnades résultent de la fausse déclaration de A selon laquelle C est entrée dans la hutte de B .

En résumé, voici ce qui s'est passé dans le village :

C est entrée dans la hutte de A .

D est entrée dans la hutte de F .

C dit à F que D est entrée dans sa hutte.

B dit à E que A est entrée dans sa hutte.

A dit à F que D est entrée dans sa hutte.

F dit à A que C est entrée dans sa hutte.

E dit à B que A est entrée dans sa hutte.

A dit à B que C est entrée dans sa hutte.



Les machines pensent-elles?



JEAN-PAUL DELAHAYE

Faut-il comprendre pour imiter? La question est posée par les programmes qui simulent (et stimulent) l'intelligence humaine.

Définir l'intelligence n'est pas chose facile et il n'est pas certain que l'on y parvienne un jour de façon satisfaisante. Cette difficulté poussa le mathématicien britannique Alan Turing, il y a un peu plus de 50 ans, à proposer «le jeu de l'imitation» qui fixait un objectif précis à la science naissante des ordinateurs que l'on n'appelait pas encore informatique.

Le jeu de l'imitation consiste à mettre au point une machine qu'il serait impossible de distinguer d'un être humain. Turing suggérait qu'un juge *J* échange des messages dactylographiés avec, d'une part, un être humain *H* et, d'autre part, une machine *M*, ces messages pouvant porter sur toutes sortes de sujets. Le juge *J* ne sait pas lequel de ses deux interlocuteurs, désignés par *A* et *B*, est la machine *M* et lequel est l'humain *H*. Après une série d'échanges, le juge *J* doit deviner qui est la machine et qui est l'être humain.

Turing pensait que si nous réussissions un jour à mettre au point des machines pour lesquelles l'identification correcte est impossible (c'est-à-dire que le juge *J* se trompe dans 50 pour cent des cas, pourcentage identique à ce que donnerait une réponse au hasard), alors nous pourrions affirmer que nous avons construit une machine intelligente ou – ce que nous considérerons comme équivalent – une machine qui pense. Sa procédure aujourd'hui dénommée *test de Turing* a donné lieu à de nombreuses discussions souvent intéressantes et a suscité une série de réalisations informatiques concrètes mises en compétition annuellement lors d'un prix organisé par Hugh Loebner. Les logiciels participant au jeu de l'imitation progressent chaque année.

Alan Turing (1912-1954)

Face aux prétentions parfois déraisonnables de certains chercheurs en Intelligence artificielle et aux doutes non moins étonnants de ceux qui affirment péremptoirement qu'on ne réussira jamais à créer des programmes intelligents, nous proposons un bilan de 50 ans de réflexion et de travail autour de ce fameux test de Turing.

LE TEST DE TURING ET L'INTELLIGENCE

Avant tout examen, mesurons combien la réalisation d'un programme qui passe le test de Turing est difficile. Mettons-nous dans la peau du juge *J* dialoguant par le biais d'un terminal d'ordinateur avec les deux interlocuteurs, *A* et *B*.

Une première idée pour reconnaître la machine, consiste à poser une question du type : «Combien vaut 429 à la puissance 3 ? » Si *A* répond $78\,953\,589$ au bout d'une seconde et que *B* refuse de répondre ou attend trois minutes pour proposer un résultat, il ne fera pas de doute que *A* est la machine et *B* l'humain. Évidemment, les spécialistes qui conçoivent les programmes pour passer le test de Turing ont prévu cette ruse grossière. Leur programme, bien que capable de calculer 429^3 en une fraction de seconde, refusera de répondre, ou demandera dix minutes avant de fournir le résultat, ou même proposera une réponse erronée. Tout ce qu'un humain ne sait pas très bien faire et qu'un ordinateur réussit sans mal (la mémorisation d'une suite de 100 chiffres aléatoires est un autre exemple) sera traité de la même façon : l'ordinateur fera semblant de ne pas réussir. Pour reconnaître l'être humain, le juge doit donc s'appuyer sur des tâches que les humains traitent sans mal et sur lesquelles les ordinateurs butent.

L'humour est un point d'attaque possible : racontez une histoire drôle à vos interlocuteurs *A* et *B* et demandez-leur

d'expliquer où il faut rire et pourquoi ? Les questions d'actualité sur lesquelles nous sommes tous informés peuvent aussi servir de base à une tentative d'identification. L'association des deux difficultés sera obtenue par exemple en demandant un commentaire explicatif du titre de la première page du dernier numéro du *Canard Enchaîné*. Un grand nombre d'autres stratégies envisageables devraient, sans trop de mal, vous conduire à identifier qui est l'homme *H* et qui est la machine *M*. Faire tenir à un ordinateur une conversation traitant de toutes sortes de sujets (de science, d'histoire, d'art, de spectacles, de musique, de gastronomie, etc.) est un objectif extrêmement difficile et l'idée de Turing semble donc bonne : si l'on réussit vraiment à tromper un juge avec un programme, cela signifie indubitablement que l'on a mis dans l'ordinateur quelque chose ressemblant à ce que nous appelons de l'intelligence.

Disons-le tout de suite, nous sommes loin d'avoir atteint le but et ce qui est obtenu avec les meilleurs programmes actuels est un simulacre de conversation qui, malgré des progrès récents, ne réussit pas à entretenir l'illusion plus de quelques minutes.

QUE PROUVERAIT LA RÉUSSITE ?

Malgré l'évidente difficulté du problème et notre échec relatif, certains philosophes, dont John Searle, pensent que même si nous réalisons un programme passant le test de Turing cela ne prouvera pas que nous avons mis de l'intelligence dans notre ordinateur. Le raisonnement de J. Searle est le suivant :

- les programmes informatiques sont syntaxiques (ils sont formels, ce ne sont que des outils à manipuler des symboles) ;
- les pensées humaines ont un contenu sémantique (un sens est attaché aux mots que nous utilisons, sens

que l'on ne peut ramener à de la syntaxe formelle. Ce sens provient de propriétés biologiques particulières de nos neurones qu'un programme, de par sa nature, ne peut pas posséder) ;

– donc les programmes ne penseront jamais et ne seront jamais intelligents.

Cette façon de voir décourage toute tentative concrète. Pour J. Searle, la réussite au test de Turing n'est pas une condition suffisante pour qu'on puisse qualifier les ordinateurs d'intelligents.

Nous n'entrerons pas dans les controverses qu'engendre ce type d'analyses. L'article original où, en 1980, J. Searle exposait son point de vue, était accompagné de 26 commentaires critiques, et depuis une multitude de discussions se sont déroulées. Remarquons cependant qu'il paraît un peu étrange d'affirmer qu'un système, que rien ne distinguerait dans un dialogue d'un être humain, ne possède pas – l'intelligence – qu'on attribue aux humains. Il y aurait comme un privilège accordé par décret, à une catégorie particulière d'êtres – les humains – qu'on refuserait définitivement à une autre catégorie d'êtres, les ordinateurs. J. Searle manque de fair-play : si un jour les ordinateurs réussissent à nous imiter, alors nous devrons alors avoir l'élégance de les qualifier d'intelligents.

Cette critique de la position de J. Searle est qualifiée de *béhavioriste* : on propose de fonder un jugement uniquement sur les comportements sans entrer dans l'analyse même des processus internes (dans le cerveau et dans l'ordinateur) qui produisent les comportements. Cependant comme le font remarquer A. Saygin, I. Cicekli et V. Akman, cette accusation de béhaviorisme méritera d'être prise au sérieux le jour où, nous humains, disposerons d'autres moyens que l'analyse du comportement pour évaluer l'intelligence des êtres humains !

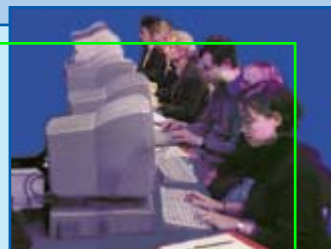
LE CRI DE LA MOUETTE

Une autre critique, sans doute plus subtile, a été formulée par Robert French à l'encontre du test de Turing. Alors que J. Searle considère que le test de Turing n'est pas une condition suffisante pour qu'on puisse affirmer qu'un ordinateur pense, R. French soutient lui que passer le test de Turing n'est pas une condition nécessaire d'intelligence.

R. French imagine un peuple qui ne connaîtrait qu'une seule espèce d'oiseaux : les mouettes. Ce peuple se pose le problème de réaliser une machine volante et pour savoir s'il a réussi utilise le *test de la mouette* : une machine est dite volante s'il est impossible de la distinguer d'une mouette dont le comportement est observé à l'aide d'un radar. Le radar

1. LE TEST DE TURING

Dans le jeu de l'imitation proposé par Alan Turing en 1950, le juge essaie de reconnaître, en dialoguant par écrit avec un interlocuteur, si celui-ci est une machine ou un être humain. Le juge ne voit pas son interlocuteur à qui il pose des questions et dont il obtient des réponses. La machine essaie de se faire passer pour un être humain et l'être humain essaie de se faire reconnaître comme tel. Pour Turing, si le juge se trompe dans 50 pour cent des cas, alors on doit considérer que la machine est intelligente et qu'elle pense. La photographie représente les juges dialoguant par ordinateur avec des hommes ou des programmes lors du prix Hugh Loebner.



Si la majorité des gens s'accordent pour dire qu'une machine passant le test de Turing doit être considérée comme intelligente et qu'elle dispose de la capacité de penser, Robert French, lui, considère que le test de Turing est trop difficile et ne caractérise pas l'intelligence en général, car il est trop lié au langage utilisé, à la façon dont fonctionne le cerveau humain au niveau le plus bas (sub-cognitif) et aux traits culturels particuliers de celui qui interroge.

R. French imagine ainsi un peuple qui, ne connaissant qu'un seul animal volant, la mouette, croit définir un critère absolu pour la propriété de voler en formulant le *test de la mouette* : on considérera qu'un objet est capable de voler, si, lorsqu'on observe son image à l'aide d'un radar, il est indiscernable d'une mouette. Il est clair que ce test manque son but, car si, incontestablement un objet passant le test de la mouette doit être considéré comme volant, en revanche aucun avion, ni aucune autre espèce d'oiseaux ou d'insectes ne réussiront à passer le test de la mouette qui est trop difficile. Il en va de même, pour French, de la réussite au test de Turing : c'est une condition suffisante d'intelligence, mais pas une condition nécessaire.

limite la précision de la demande d'imitation comme le dialogue, par le biais d'échanges dactylographiés, limite la portée de l'imitation dans le test de Turing. Bien sûr les avions, les hélicoptères, les montgolfières et même les oiseaux autres que les mouettes ne réussiront pas le test de la mouette et ne seront donc pas considérés comme capables de voler. Est-ce bien raisonnable ? Certes non.

Pour R. French, le test de Turing est une condition suffisante d'intelligence, mais d'intelligence humaine. De plus, ce test est lié à la langue utilisée pour les dialogues, ce qui empêche de le considérer comme universel. R. French poursuit son analyse et affirme qu'il se pourrait bien que nombre de nos comportements dépendent fortement de la façon particulière dont notre cerveau traite l'information au niveau le plus profond (il qualifie ces processus de sub-cognitifs). Imposer une imitation servile du comportement humain c'est se protéger à trop bon compte du risque d'admettre que des machines intelligentes sont devenues nos concurrentes. Pour illustrer son idée, R. French imagine un exercice d'évaluation des néologismes. Il propose qu'avant d'appliquer le test de Turing, on fasse évaluer la qualité d'un ensemble de néologismes par un groupe de sujets humains de référence. Par exemple, on envisage les néologismes pour dési-

gner de très longues voitures. Les sujets humains notent de 0 à 10 les néologismes : auto-fusée, fusauto, auto-bas-set, longivoiture, finauto, auto-aiguille, voiture-serpent.

Les notes attribuées constituent des données types et en comparant ensuite, lors du test de Turing, les notes proposées par A et B à ces données, on distinguera l'humain de la machine, car – c'est l'idée de R. French – la manière dont nous notons les néologismes est liée à la façon particulière dont notre cerveau traite le langage, manière qui a peu de chances d'être identique à celle qu'utiliserait l'ordinateur (de même : la façon dont un humain joue aux échecs est très différente de celle utilisée par un programme). L'évaluation des néologismes démasquerait l'ordinateur. Pour R. French, de même qu'il n'est pas nécessaire d'être indiscernable d'une mouette pour voler, il n'est pas nécessaire d'être indiscernable d'un humain pour penser ou avoir un comportement intelligent.

Cependant pour R. French et la majorité des gens qui ont réfléchi à ces questions, il est certain que même si la difficulté du test de Turing est très grande (trop sans doute), la réussite à ce test ne laisserait aucun doute sur le fait que nous avons construit des machines intelligentes. Il semble donc intéressant d'essayer. Qu'avons-nous obtenu ?



Richard Wallace (à gauche), vainqueur avec son programme ALICE du concours de Hugh Loebner (à droite).

2. TESTS PARTIELS DE TURING

Certains tests de Turing partiels sont déjà possibles.

Test de Turing de simulation d'un patient paranoïaque

Les réponses d'un patient paranoïaque sont suffisamment stéréotypées pour qu'on puisse faire des simulations informatiques indiscernables de ces malades. Dès 1971, M. Colby a mis au point un programme réussissant à tromper une fois sur deux des psychiatres chargés de reconnaître les patients humains des patients simulés par la machine.

Test de Turing limité au jeu d'échecs

Même un bon joueur d'échecs ne peut plus aujourd'hui savoir s'il joue avec une machine ou un humain.

Test de Turing limité aux calculs élémentaires

En posant des questions de calcul élémentaire du type :

$23 + 45?$

$552 + 128?$

dérivée de $\sin(3x^2)?$

solutions de l'équation $4x^4 - 3x^2 - 1 = 0?$

simplification de $(x^4 - 9)/(x^2 - 3)?$

Un juge ne peut pas distinguer un homme d'une machine, car certains programmes comprennent et répondent correctement à ce genre de questions. Les domaines du calcul pouvant être abordés par ces programmes sont de plus en plus nombreux.

Le test de Turing peut ainsi être envisagé sous des formes partielles. Dans certains cas les progrès de la recherche en Intelligence artificielle ont été tels qu'il est devenu impossible de distinguer dans ces contextes restreints un être humain d'une machine. En revanche, dans le cas envisagé par Turing où tous les sujets de conversations sont autorisés, aucun programme n'est en mesure de tromper un juge plus de quelques minutes. Remarquons que, de même qu'un programme qui calcule trop bien et trop vite se fait repérer, un programme d'échecs peut lui aussi se faire démasquer en jouant certains coups étranges. Un cas célèbre illustre ce point : deux programmes d'échecs jouaient l'un contre l'autre et, au cours de la partie, un des programmes met sa tour en prise. Stupeur dans l'auditoire parmi les grands maîtres qui regardaient le déroulement de la partie. Jusqu'à ce que l'un d'eux remarque après quelques dizaines de minutes que si le programme n'avait pas mis sa tour en prise, il était échec et mat en 9 coups. Nul doute qu'un joueur humain, même s'il avait vu la menace, aurait joué «psychologique» et pensé que son adversaire ne verrait pas un mat aussi long, et n'aurait pas mis sa tour en prise, car alors il était alors certain de perdre la partie. Pour passer les tests de Turing limités, il faut donc concevoir les programmes de manière à ce qu'ils répondent mal aux questions que les humains ne peuvent pas traiter en un temps limité.

LES PROGRAMMES DE CONVERSATION

À l'époque où Turing proposait son test, il n'était pas envisageable de le mettre en œuvre matériellement. Les interfaces des ordinateurs étaient trop frustrées et surtout les mémoires et la rapidité de calcul des machines étaient insuffisantes (environ dix millions de fois inférieures à celles d'aujourd'hui!), ce qui interdisait l'écriture de programmes manipulant le langage naturel.

Dans la décennie 1960, des programmes capables de dialogues en langues naturelles sont apparus (on les nomme *chatbots* ou *chatterbots* pour «robots de conversation»). Un de ces programmes est le célèbre ELIZA de Joseph Weizenbaum mis au point en 1964 au MIT. Le mécanisme interne du programme est assez

simple. Les phrases de l'interlocuteur sont analysées, et, à partir de leur structure grammaticale, une réponse est construite en utilisant certains des mots de l'interlocuteur. Quand le programme se trouve embarrassé (l'analyse grammaticale de certaines phrases peut-être très difficile, le vocabulaire prévu peut être insuffisant, etc.), il utilise des phrases passe-partout pour détourner la conversation ou pour esquiver les questions. Le but d'ELIZA n'était pas de passer le test de Turing, mais de jouer le rôle d'un psychanalyste attentif à ce que dit son interlocuteur et l'incitant à se confier. Bien qu'il fût conçu comme un jeu sans prétention, certaines personnes utilisant ELIZA, et informées de sa véritable nature se prirent au jeu et se confièrent à lui comme s'il s'agissait d'un être humain. Des utilisateurs passionnés prétendirent même s'y être attachés.

Un programme tenant sur trois pages – ce qui est très peu – écrit en langage BASIC et s'inspirant d'ELIZA proposé par Richard Schomburg et Jean-Pascal Aubert permettait le dialogue suivant en français.

Programme. Je suis ELIZA. Quel est votre problème?

Utilisateur. Je n'aime pas les ordinateurs.

Programme. Est-ce que les ordinateurs vous ennuiant?

Utilisateur. Oui.

Programme. Pourquoi m'interrogez-vous?

Utilisateur. Pour obtenir des solutions à mes problèmes.

Programme. Est-ce que cette question vous intéresse?

Utilisateur. Oui.

Programme. Quelle réponse vous ferait le plus plaisir?

Utilisateur. C'est à vous de deviner.

Programme. Nous étions en train de discuter de vous, pas de moi.

Utilisateur. Cela ne résout pas mes problèmes.

Programme. Que pensez-vous?

Utilisateur. J'ai peur.

Programme. Pouvez-vous être plus explicite sur ce qui vous effraie?

Utilisateur. C'est difficile.

Programme. Racontez m'en un peu plus sur vos problèmes...

On le voit, rien de bien subtil, et, à moins de laisser le programme mener la conversation et d'être d'une extrême indulgence, on aura du mal devant les quelques trucs syntaxiques et phrases préparées (contenues *in extenso* dans le programme) à imaginer que l'on dialogue avec un être intelligent. En 1971, un programme du même type simulait, non plus un psychanalyste, mais un malade paranoïaque. Le programme possédait des états mentaux et, selon le contexte, était placé dans une situation de peur, d'anxiété ou de méfiance qui fixait son type de réponses. Une expérience où on demandait à des psychiatres de distinguer le programme de véritables patients donna le résultat de 48 pour cent d'identifications correctes, ce qu'on peut voir comme une sorte de première réussite au test de Turing.

LE PRIX HUGH LOEBNER

En 1990, Hugh Loebner avec le soutien du *Cambridge Center for Behavioral Studies* a créé un concours dont l'objectif est de susciter de véritables tentatives pour passer le test de Turing. H. Loebner s'engagea à récompenser d'un prix de 100 000 \$ et d'une médaille d'or le premier ordinateur dont les réponses sont indiscernables de celles d'un humain. H. Loebner, personnage étrange, précise

avec insistance que, contrairement aux médailles distribuées aux gagnants des Jeux olympiques, sa médaille n'est pas plaquée or, mais en or massif. Chaque année, un prix de 2 000 \$ et une médaille de bronze sont aussi attribués au programme «le plus humain» pris parmi les programmes se présentant au concours, et cela quel que soit le niveau atteint par le programme, aussi mauvais soit-il.

Les 100 000 \$ ne seront attribués que pour un test de Turing où le programme et l'interlocuteur dialoguent en utilisant des données textuelles, sonores et graphiques. Pour un test de Turing limité à des échanges textuels (comme l'envisageait pourtant Turing), seul un prix intermédiaire de 25 000 \$ et une médaille d'argent sont proposés.

Aujourd'hui la compétition pour les 2 000 \$ se déroule de la manière suivante. Les programmes présentés ainsi que quelques humains mêlés à eux sont numérotés. Un panel de juges dialogue alors par écrit avec ces interlocuteurs numérotés. Quand il le souhaite, le juge rend son avis en attribuant une note de 0 à 5 à chacun des participants, homme ou programme. Le programme qui a obtenu les meilleures notes gagne la médaille de bronze et les 2 000 \$. Jusqu'à présent les juges ont trié sans mal leurs interlocuteurs humains et leurs interlocuteurs informatiques (moins bien notés). Toutefois, en 2001, un juge a donné une meilleure note à un programme qu'à un humain ! Cette erreur d'un juge n'est pas suffisante pour emporter les prix de 25 000 \$ et 100 000 \$ qui ne seront attribués que lorsqu'un programme réussira de manière répétée à se faire passer pour humain.

Certains chercheurs ont jugé que l'organisation du prix Loebner était inutile et même nuisible au progrès des recherches en Intelligence artificielle. Le prix détourne, disent-ils, les chercheurs d'objectifs plus raisonnables et les incite à accumuler, dans leurs programmes, des astuces qui ne sont finalement que de simples bases de données conçues pour faire semblant d'être intelligent. La véritable compréhension de l'intelligence ne progressera pas ainsi, argumentent ces critiques.

Marvin Minsky (l'un des pionniers de l'Intelligence artificielle) a d'ailleurs offert en 1995 un prix de 100 \$ pour quiconque dissuaderait H. Loebner de maintenir son offre. H. Loebner a alors malicieusement déclaré que puisque la seule façon de le faire renoncer à l'organisation de son prix était de le gagner, il en résultait que *de facto* M. Minsky était cosponsor de son prix dont le montant était donc passé à 100 000 \$ + 100 \$. En voulant s'opposer au prix, M. Minsky l'avait renforcé !

LE MEILLEUR PROGRAMME CONTEMPORAIN : ALICE

Ces deux dernières années, le prix Loebner a été emporté par un programme nommé A.L.I.C.E. (*Artificial Linguistic Internet Computer Entity*) dont l'auteur principal est Richard Wallace (c'est ce programme qui lors du dernier concours a trompé un juge en se faisant classer devant un humain).

Le développement du programme ALICE est l'œuvre d'une collectivité de passionnés (300 personnes y auraient participé) et le programme, qui n'est pas secret, est mis à la disposition de toute personne intéressée. Si vous le souhaitez, vous pouvez essayer ALICE, et mieux, vous pouvez le modifier ou l'adapter pour créer votre propre logiciel de conversa-

tion (voir <http://www.alicebot.org/>). Le programme de conversation en ligne sur le site publicitaire du film A.I de Steven Spielberg a été obtenu à partir d'ALICE.

La conception d'ALICE dans son essence n'est pas différente de celle d'ELIZA et d'ailleurs, contrairement à d'autres chat-bots, aucune théorie linguistique, aucun modèle d'apprentissage automatique, aucune représentation interne du monde ne sont intégrés au programme de R. Wallace. Comme souvent en Intelligence artificielle, la méthode de la force brute semble mieux réussir que l'utilisation d'idées théoriques élaborées. Une étude détaillée des dialogues entre les utilisateurs et le programme améliore ce dernier : tout le fonctionnement du programme est centré sur le repérage de la forme de la question de l'utilisateur et de l'association d'une

3. LE CERVEAU D'ALICE

Le programme ALICE qui a gagné des deux derniers prix Loebner est fondé sur les questions qu'un utilisateur pose à un programme de conversation. Les informations sur ces questions sont mémorisées sur une spirale où sont placés, par ordre de fréquence d'utilisation, les premiers mots des questions des utilisateurs, puis les seconds mots, etc. La disposition en spirale s'impose, car le premier mot est pris dans un ensemble de possibilités assez grand (2 000 cas) alors que les autres mots (les premiers étant fixés) ne sont pris que parmi un petit nombre de possibilités (en moyenne 2).

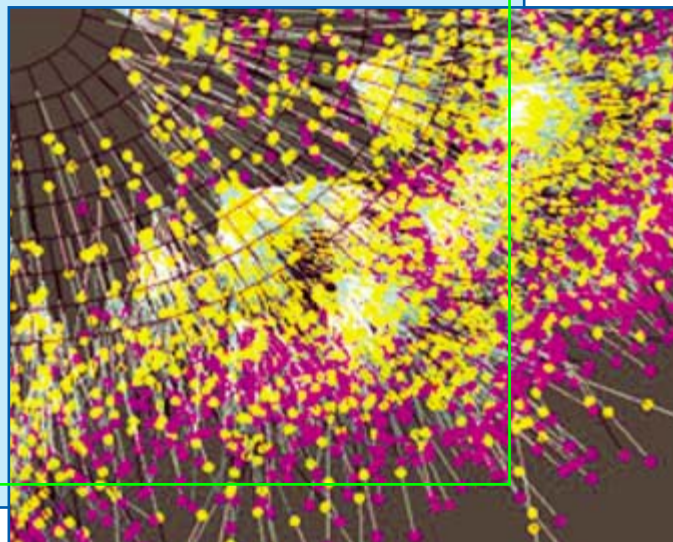
Aujourd'hui cette spirale que Wallace voit comme le cerveau d'ALICE comporte 24 000 «catégories». Il s'agit en fait des questions type que ALICE sait traiter. Bien que très volumineuse cette information est organisée sous une forme qui rend improbable qu'ALICE devienne intelligente au sens général : aucun modèle du monde, aucune capacité de déduction, aucune organisation complexe des connaissances ne peuvent être stockés dans cette structure du «cerveau d'ALICE».

Le mot le plus fréquemment utilisé comme premier mot d'une question posée à ALICE est YES. Viennent ensuite NO, OK, WHY, etc. Selon R. Wallace, la fréquence de ces mots se conforme à la loi de Zipf : la fréquence d'utilisation d'un mot est inversement proportionnelle à son rang. Voici la liste des premiers mots ou groupes de mots apparaissant le plus fréquemment en tête d'une question posée à ALICE (avec le nombre d'occurrences rencontrées jusqu'à présent).

8024 YES
5184 NO
2268 OK
2006 WHY
1145 BYE
1101 HOW OLD ARE YOU
946 HI
934 HOW ARE YOU
846 WHAT
840 HELLO
663 GOOD
645 WHY NOT
584 OH
553 REALLY
544 YOU
531 WHAT IS YOUR NAME
525 COOL
516 I DO NOT KNOW
488 FUCK YOU
486 THANK YOU
416 SO
414 ME TOO
403 LOL
403 THANKS

381 NICE TO MEET YOU TOO
375 SORRY
374 ALICE
368 HI ALICE
366 OKAY
353 WELL

Le cerveau d'ALICE



BLONDIE



réponse ajustée à la forme reconnue. Le grand nombre de formes envisagées fait la force d'ALICE : il sait répondre à une variété de questions de plus en plus grande. Le programme se comporte mieux avec un utilisateur moyen qui pose des questions déjà rencontrées qu'avec un expert plus imaginatif et informé des points faibles du programme. C'est pourquoi R. Wallace suggère que le panel de juges qui choisit le gagnant du prix Loebner soit composé de personnes prises au hasard, plutôt que d'universitaires et de spécialistes diplômés en Intelligence artificielle.

R. Wallace ne semble pas réellement gêné par le peu de complexité réelle de son programme et il explique : «ELIZA a parfois été considéré comme une farce, et c'en est peut-être une, mais doit-on en déduire que ce programme n'est pas de l'intelligence artificielle? Ne devons-nous pas plutôt nous préparer à l'inévitable conclusion : la conscience elle-même est une illusion. C'est sans doute parce qu'il avait entr'aperçu cela que Turing a proposé un test fondé sur l'aptitude à simuler. La frontière entre l'Intelligence réelle et l'illusion n'a jamais été aussi floue.»

R. Wallace livre ensuite le fond de sa pensée : «Nous n'avons pas besoin d'une théorie complexe de l'apprentissage, des réseaux de neurones ou des modèles cognitifs pour expliquer comment bavarder dans les limites des 25 000 cas envisagés par le programme d'ALICE. Notre conception stimulus-réponse est une bonne

théorie et c'est certainement la plus simple.» R. Wallace parle du «cerveau d'ALICE» expliquant que son programme est une sorte de copie de sa propre personnalité. «En allant visiter le contenu du cerveau d'ALICE, écrit-il, vous y rencontrerez le monde culturel des livres que j'ai lus, des films que j'ai vus, vous y trouverez mes citations et plaisanteries préférées, etc.»

Finalement R. Wallace défend l'idée qu'en continuant à ajouter des schémas de réponses préparées au cas par cas, on finira par avoir une machine indiscernable d'un humain. «Le domaine du langage couvert par notre programme contient déjà la plus grande partie des phrases que les gens utilisent en dialoguant avec une machine. En étendant encore un peu ce domaine, nous allons cerner les mots récalcitrants, et le moment arrivera où le plus sévère des critiques humains ne pourra plus concevoir une seule phrase pour coincer ALICE». À l'entendre, l'image souvent utilisée pour dénoncer la naïveté de certains chercheurs en intelligence artificielle revient à l'esprit. R. Wallace ne se comporte-t-il pas comme quelqu'un qui réussissant à monter sur un tabouret dirait : «Vous voyez bien que je progresse, d'ici peu j'atteindrai la Lune?»

L'enthousiasme du maître d'œuvre du programme qui a gagné les deux derniers prix Loebner est sans limite. Il imagine que l'industrie des logiciels de conversation va d'ici peu connaître un développement considérable et que ces logiciels

seront au cœur des prochaines interfaces informatiques. Pourtant à ce jour, seule la médaille de bronze de 2 000 \$ a été décernée et je ne crois pas prendre beaucoup de risques en affirmant que les sommes de 25 000 \$ et de 100 000 \$ resteront dans les caisses des organisateurs du prix Loebner pour de longues années encore.

Notons qu'un pari de 20 000 \$ portant sur la question : «Un ordinateur passera-t-il le test de Turing avant 2029?» a été pris entre Mitchell Kapor (qui soutient que non) et Ray Kurtzweil (qui soutient que oui). N'oublions pas non plus que Turing dans son article de 1950 avait prédit que son test serait passé en l'an 2000, ce qui ne s'est pas produit.

Même si certains *chatbots* sont conçus pour imiter des personnes humaines ayant existé (vous pourrez dialoguer sur internet avec John Lennon, Elvis Presley ou Jésus) les spécialistes les plus optimistes ne se risquent pas aujourd'hui à parier pour un succès avant 2029. Puisqu'il semble qu'on se limite à des programmes qui, comme ELIZA en 1964, sont sans véritable ambition, la date réelle d'un succès définitif pourrait être plus lointaine encore.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Université de Lille. Son dernier livre *L'intelligence et le calcul*, éditeur Belin-Pour la Science, est un recueil de chroniques parues dans *Pour la Science*. e-mail : delahaye@lil.fr

R. FRENCH, *Subcognition and The Limits of the Turing Test*, in *Mind*, 99, pp. 53-66, 1990.

A. P. SAYGIN, *The Turing Test Page* : <http://cogsci.ucsd.edu/~asaygin/tt/ttest.html>

J. R. SEARLE, *Minds, Brains and Programs*, in *Behav. and Brain Sc.*, 3, pp. 417-57, 1980.

A. TURING, *Computing Machinery and Intelligence*, in *Mind*, 59, 236, pp. 433-460, 1950. Disponible en ligne : <http://www.loebner.net/Prize/TuringArticle.html>

Pages du prix Loebner : <http://www.loebner.net/Prize/loebner-prize.html>

Site du programme ALICE : <http://www.Alicebot.org/>

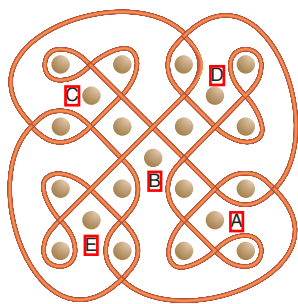
4. ALICE ET LANGUE DE BOIS

Richard Wallace l'auteur principal du programme ALICE qui a gagné les deux derniers prix Loebner explique que les techniques utilisées dans son programme s'inspirent des méthodes des politiciens (ce qu'on appelle en France la langue de bois). Il écrit : «Généralement un politicien ne donne pas de réponse directe. Si le journaliste qui l'interroge pose une question, le politicien répond avec un discours tout préparé ayant un rapport parfois lointain avec la question. Les réponses semblent activées par des mots-clés. Le mot *école* déclenchera par exemple un discours sur l'enseignement. Je suis persuadé qu'un robot de conversation serait un politicien infatigable. Le président Clinton a donné un magnifique exemple de discours robotisé quand un jour il a répondu en disant «It depends on what the meaning of "is" is.» («Cela dépend de ce qu'est le sens de "est"»), ce qui convenons-en est une esquivе vraiment passe-partout.

Les mystérieux sona

AVIDA DOLLARS

Les dessins qu'utilisent les conteurs d'un peuple d'Afrique centrale pour illustrer leurs histoires offrent quelques énigmes de combinatoire aux mathématiciens.



Jusqu'à la fin des années 1950, les membres des tribus du peuple Chokwe, qui compte encore un million d'habitants dans la région de Lunda, au Nord-Est de l'Angola, se réunissaient après une journée de chasse autour d'un feu et écoutaient l'un d'eux, l'akwa kuta sona, raconter des contes selon un rituel précis (voir la figure 4). Après avoir nettoyé et lissé le sol sableux de sa main, il dessinait une grille de points, puis au fil de sa narration, son doigt traçait autour de ces points une ligne courbe qui servait de support à son histoire. Par exemple, la figure à côté du titre illustre une fable où un lapin, en A, découvre une mine de sel, en B. Hélas, celle-ci est l'objet de convoitises de la part d'un lion, en C, d'un guépard, en D et d'une hyène, en E, chacun arguant de la loi du plus fort pour mettre la main sur le trésor. Heureusement, à la fin de l'histoire, le lapin a gain de cause et reste le seul à avoir accès à la mine, les autres en étant séparés par la courbe.

Ces dessins nommés sona (au singulier, un lusona) appartenaient à une longue tradition : ils illustraient des proverbes, des fables, des jeux, des animaux (voir le médaillon), des énigmes et jouaient un rôle important dans la transmission du savoir et de la sagesse aux jeunes générations. Le tracé des dessins devait être lisse et continu, sans à-coup : toute hésitation ou arrêt était un signe d'imperfection et d'un manque de savoir-faire que l'audience sanctionnait d'un sourire ironique.

La grille initiale de points facilitait la mémorisation des dessins par l'akwa kuta sona, ou expert en sona. Le nombre de colonnes et de lignes dépendait du motif souhaité et de l'histoire. Par exemple, les marques laissées sur le sol par un poulet que l'on poursuit étaient représentées par un dessin dont la grille de départ avait cinq lignes de six points. Grâce à cette méthode – un exemple ancien de système de coordonnées –, l'akwa kuta sona réduisait la mémorisation d'un

lusona entier à celle de deux nombres, celui des lignes et celui des colonnes.

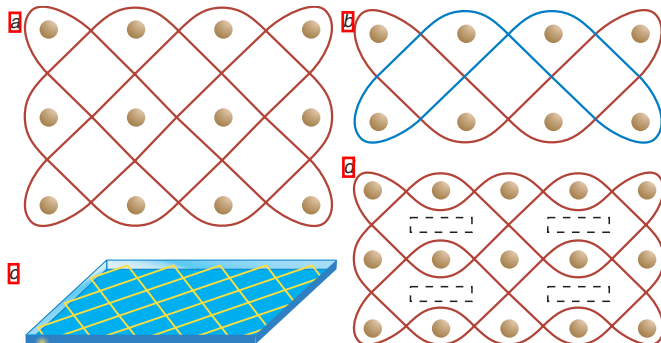
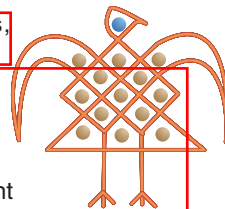
Les sona qui ressemblent aux tissages sont parmi les plus simples (voir la figure 1). Parmi eux, certains sont constitués d'une seule courbe continue qui contourne chaque point de la grille avant de rejoindre son point initial, d'autres requièrent le tracé de plusieurs courbes. Mark Schlatter, de l'Université de Shreveport, en Louisiane, a analysé les propriétés mathématiques des sona aux motifs de tissages, ainsi que ceux d'une autre famille, nommée ventre du lion, et mis en évidence dans quels cas une seule courbe suffit à dessiner le lusona entier, et dans quels autres, plusieurs sont nécessaires. En d'autres termes, étant donné le nombre de lignes et de colonnes, combien de courbes sont nécessaires pour dessiner un motif complet ?

Tout d'abord, s'inspirant des idées de Paulus Gerdes, professeur de mathématiques à l'Université de Maputo, au Mozambique, il imagine le dessin comme la trajectoire d'un rayon lumineux dans une enceinte rectangulaire dont les parois sont des miroirs. La lumière est émise d'un coin de l'enceinte dans une direction faisant 45 degrés avec l'un des côtés. Ainsi, la lumière se réfléchit sur les parois en parcourant les diagonales de la grille.

Puis, dans une première étape, il établit qu'une grille carrée de n points de côté requiert n courbes (voir la figure 2) : en effet, lorsqu'on introduit un système de coordonnées pour repérer les points de la grille, une courbe qui part du point $(a, 0)$ atteint le point $(n+1, n+1-a)$ puis le point $(n+1-a, n+1)$ et enfin le point $(0, a)$ avant de rejoindre le point initial. Chaque courbe rebondit trois fois avant de revenir à son point initial et parcourt ainsi quatre diagonales : au total, on dessine n courbes pour parcourir toutes les diagonales de la grille.

Ensuite, le mathématicien décompose un motif de tissage donné en carrés (voir la figure 2) et montre que le nombre de courbes requises pour le motif entier est égal à celui du motif restant, ou au nombre de courbes du dernier carré quand la grille est uniquement constituée de carrés. Par exemple, un motif de trois lignes et quatre colonnes se décompose en une grille carrée de neuf points et en une ligne de trois points qu'une seule courbe suffit à parcourir. Dans le motif entier, cette dernière courbe et les trois courbes de la grille carrée n'en forment qu'une seule. En revanche, pour un motif de deux lignes et quatre colonnes, on ôte un carré de deux points de côté et on laisse un carré identique : deux courbes sont nécessaires pour dessiner un motif de tissage sur une telle grille carrée de quatre points ; deux courbes sont donc aussi nécessaires pour le motif entier. Quand la grille restante après la séparation du premier carré est encore importante, on réitère la même opération jusqu'à l'obtention d'un motif simple.

Ce processus est analogue à la détermination du plus grand commun diviseur de deux nombres donnés, ici, le nombre de colonnes et le nombre de lignes. Lorsque le découpage



1. Les motifs de tissages sont les sona les plus simples : ils sont formés de courbes qui parcourent les diagonales d'une grille de points. La plupart sont composés d'une seule courbe (a), mais certains en nécessitent plusieurs (b). Ces dessins sont analogues au trajet d'un rayon de lumière dans une enceinte où les parois sont des miroirs (c). Lorsqu'on insère des miroirs supplémentaires (en pointillés noirs) entre les points des colonnes de rang pair, on obtient les sona de la famille du ventre du lion (d).

laisse de côté une seule ligne (ou une seule colonne), les deux nombres n'ont pas de diviseur commun autre que un, ils sont premiers entre eux : une unique courbe suffit au motif entier. Ainsi, un motif de tissage nécessitera un nombre de courbes égal au plus grand commun diviseur du nombre de colonnes et du nombre de lignes.

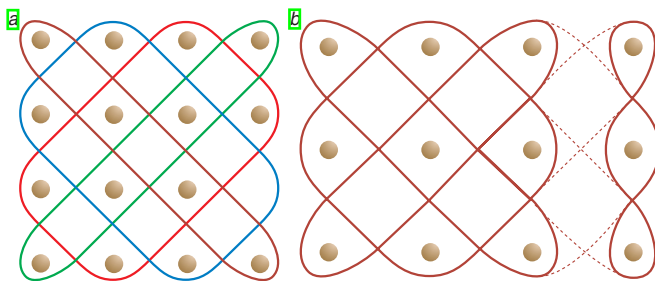
Le mathématicien a ensuite étudié les sons de la famille du ventre du lion (voir la figure 1). Ils correspondent au trajet d'un rayon lumineux dans une enceinte où l'on insère des miroirs horizontaux à deux faces réfléchissantes entre les points des colonnes de rang pair. Pour déterminer le nombre de courbes nécessaires à un tel motif, il analyse l'évolution des courbes à mesure qu'elles passent d'une colonne (dotée ou dépourvue de miroir) à la suivante (voir la figure 3).

On numérote les brins de courbes juste après les croisements, par exemple de un à six pour une grille à trois lignes et cinq colonnes. Le passage d'une colonne modifie l'ordre des brins : la permutation des brins après une colonne sans miroir est notée A, la permutation après une colonne avec des miroirs est notée B. L'ensemble des permutations subies par les brins jusqu'à l'avant-dernière colonne de la grille forme ainsi un «mot» composé de A et de B, tel BAB pour notre exemple.

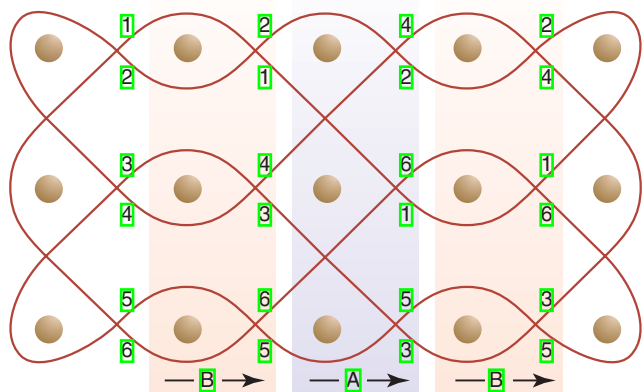
Ainsi, pour tout ventre du lion de m lignes et de n colonnes, on peut écrire un mot composé de B et de A en alternance puisque les miroirs sont placés une colonne sur deux. Ces mots se simplifient en reconnaissant, par exemple, que deux permutations de type B successives laissent l'ordre des brins inchangé. De la même façon, $2m$ permutations de type A consécutives s'annulent. Par ailleurs, on montre que $BA = A^{2m-1}B$. Au final, chaque mot simplifié obtenu est de la forme $A^j B^k$, où k égal à 0 ou à 1 et où j est positif.

Le mot d'un motif de la famille du ventre du lion est $BABABA...$ ou $B(AB)^k$. En analysant les différentes valeurs de k , M. Schlatter a montré qu'un tel motif à m lignes et n colonnes nécessite une seule courbe quand $n-1$ est un multiple de quatre, sinon m courbes.

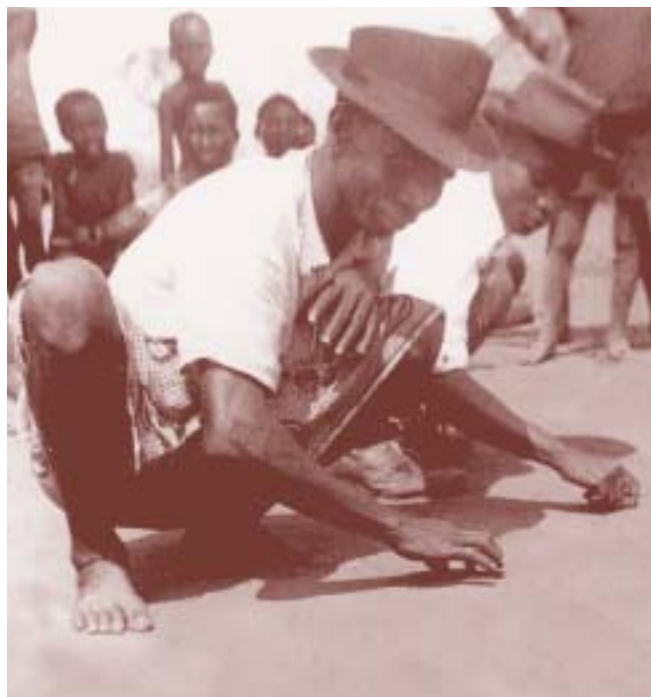
L'étude des sons du peuple Chokwe a dépassé le cadre ethnologique et a donné naissance à une nouvelle branche des mathématiques, la géométrie Lunda.



2. Un motif de tissage (le lusona le plus simple) dont la grille est carrée (a) requiert un nombre de courbes égal au nombre de points sur chaque côté, ici quatre. On détermine le nombre de courbes nécessaires pour une grille quelconque en décomposant celle-ci en carrés (b) : le nombre de courbes pour le motif complet est égal au nombre de courbes nécessaires pour la partie restante (une courbe pour une grille de trois lignes et de quatre colonnes) ou au nombre de courbes du dernier carré quand la grille n'est composée que de carrés.



3. On détermine le nombre de courbes d'un lusona de la famille du ventre du lion en étudiant les deux types de permutations (A et B) des brins des courbes (numérotés de un à six après le croisement des courbes de la première colonne) à mesure qu'ils passent les colonnes. La permutation A correspond au passage d'une colonne sans miroir, la permutation B à celui d'une colonne avec miroirs. L'analyse des combinaisons de permutations, ici BAB, montre qu'un motif requiert une seule courbe quand $n-1$ est un multiple de quatre, m courbes sinon.



© Africa Museum Tervuren, Belgique



4. L'akwa kuta sona (à gauche), ou expert en sona, est le gardien de la tradition de son peuple, les Chokwe. Il raconte des histoires qu'il illustre par des dessins, les sona, tracés de son doigt dans le sable (à droite). Il trace au préalable une grille de points.

La nage des poissons

JEAN-MICHEL COURTY • EDOUARD KIERLIK

Les poissons nagent selon des modes comparables aux deux principales techniques de rame qui tirent parti soit de la traînée, soit de la portance.

Au XVIII^e siècle, les marins ne ramaient pas : ils «nageaient». Aujourd'hui le rameur assis le plus près de la poupe d'un «huit» est le «chef de nage» : il donne le rythme à suivre par les autres rameurs. L'expression est profonde de sens : du point de vue physique, les poissons emploient leurs nageoires soit comme un aviron, soit comme une godille. Tandis que la première méthode est idéale pour fuir, la seconde est insurpassable pour nager vite et loin.

Comment se propulse un poisson? Examinons les forces qui s'exercent sur un corps mobile dans un fluide. Une aile d'avion, assimilable à une nageoire, subit deux forces, la traînée et la portance. La traînée, de direction opposée à la vitesse, freine le mouvement de tout mobile dans un fluide. La portance est perpendiculaire à ce mouvement et, comme son nom l'indique, soutient en l'air les avions et les oiseaux. Toutes deux sont proportionnelles au carré de la vitesse de l'objet. La géométrie de l'objet ainsi que son orientation dans le fluide déterminent les coefficients de proportionnalité, nommés coefficients de traînée et de portance. Pour un objet effilé comme une aile d'avion, le coefficient de traînée est typiquement dix fois plus faible que le coefficient de portance. Lorsqu'ils se propulsent, les poissons exploitent soit la traînée, soit la portance, soit... les deux à la fois! Comment?

PROPULSION PAR LA TRAÎNÉE

Les poissons qui se propulsent grâce à la traînée s'appuient sur l'eau comme les rameurs. Quand il tire sur son aviron, le rameur qui tourne le dos à la proue déplace sa pelle (la partie immergée de la rame) de l'avant vers l'arrière du bateau ; la force de traînée qui s'exerce sur la pelle s'oppose à son mouvement. Dirigée vers l'avant, elle constitue la force propulsive du bateau. Pour l'accroître, un rameur s'efforce de présenter une

surface maximale à l'eau pendant qu'il tire sur sa pelle immergée. Il la ramène de l'arrière vers l'avant du bateau en la sortant de l'eau pour éviter de produire une force de traînée de sens contraire qui freinerait le bateau. La rascasse se propulse aussi en utilisant la force de traînée : elle avance en poussant sur ses nageoires latérales déployées, puis elle les couche pour les ramener vers l'avant en minimisant la traînée.

Cette «nage par traînée» a l'inconvénient de n'être efficace que si la vitesse de la nageoire est supérieure à la vitesse relative de l'eau par rapport au rameur : plus le poisson nage vite, moins ses nageoires le propulsent! Fixons-nous les idées en examinant le cas d'un jeu de nageoires de dix centimètres carrés. Pour démarrer, leur propriétaire les ramène vers l'arrière à une vitesse de un mètre par seconde : la loi donnant la traînée indique que ses nageoires induisent alors une force de un newton. Quand le poisson avance de 50 centimètres par seconde, la vitesse relative de ses nageoires par rapport à l'eau chute à 50 centimètres par seconde et la force propulsive qu'elles induisent (proportionnelle au carré de la vitesse) est alors quatre fois plus faible. Si le poisson avançait de un mètre par seconde, la force de propulsion deviendrait nulle.

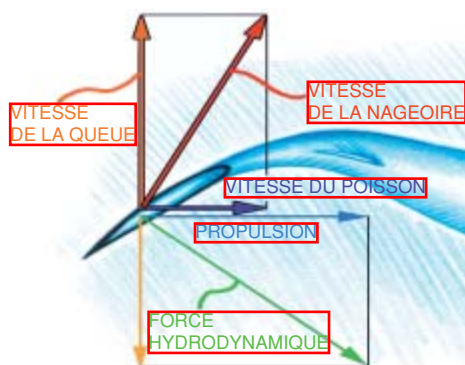
Puisque la «nage de traînée» est d'autant plus efficace que la vitesse est faible, la plupart des poissons l'utilisent pour leurs manœuvres à faible vitesse ; en outre, elle leur sert aussi à s'enfuir à partir de l'immobilité. Au lieu de pratiquer «l'aviron de croisière», ils fouettent l'eau de leur nageoire caudale. Les truites en fuite, par exemple, se plient en forme de C, avant de se déplier en un éclair rejetant l'eau vers l'arrière. Elles atteignent des accélérations de plusieurs dizaines de mètres par seconde carré (l'accélération g de la pesanteur, vaut environ dix mètres par seconde carré) ; flèche multicolore, la truite arc-en-ciel se dépie en 80 millisecondes et obtient une accélération de 4 g . Les poissons n'ont pas l'apanage de ces départs foudroyants : les crevettes atteignent plus de 10 g lors de départs arrêtés!

PROPULSION PAR LA PORTANCE

Les poissons qui se propulsent grâce à la portance pratiquent une technique analogue à la godille. La portance est perpendiculaire au mouvement de la nageoire par rapport à l'eau. Pour que cette force soit dirigée vers l'avant, le poisson fait aller et venir sa nageoire caudale perpendiculairement à la direction de progression. Ce principe est celui de la godille, technique de propulsion des bateaux avec une seule rame : les matelots qui la maîtrisent enfoncent un aviron dans l'eau à l'arrière de l'embarcation. Ils effectuent un va-et-vient de la gauche vers la droite en changeant l'inclinaison à chaque passage. La pelle reste quasi parallèle à l'arrière du bateau, son bord d'attaque légèrement vers l'avant. La godille exige un bon «coup de poignet», car elle perd vite son efficacité quand la pelle n'est pas correctement placée par rapport à la marche du bateau.



Tel un rameur, la rascasse se propulse en battant des nageoires latérales. Elle manœuvre ainsi avec aisance à faible vitesse.



Les thons et les requins sont d'excellents nageurs, à tel point qu'il leur arrive de traverser des océans. Pour nager vite et loin, ils « godillent », c'est-à-dire qu'ils tordent leurs nageoires caudales de façon à augmenter la portance (la force hydrodynamique motrice) qui s'y applique.

La godille a de multiples avantages sur l'aviron : la continuité de son mouvement lui confère une grande souplesse ; en outre, elle est mieux adaptée au déplacement de lourdes charges. Pour nous en convaincre, supposons qu'un marinier essaye successivement de déplacer une barge, en appuyant sur le fond avec une perche, en ramant ou en godillant. Dans le premier cas, la perche s'appuie sur le fond sans glisser : tout le travail du marinier est alors utilisé pour propulser l'esquif, mais la profondeur ne peut être trop grande. Lorsqu'il rame, la traînée de la pelle est la force propulsive. Comme la pelle se déplace par rapport à l'eau (elle « glisse »), une puissance non négligeable est dissipée inutilement (frottements, tourbillons). Quand le matelot godille, la force propulsive n'est pas la traînée, mais la portance, approximativement perpendiculaire au mouvement de la rame ; elle travaille peu à ralentir la godille puisque le travail d'une force perpendiculaire au mouvement est nul. Seule source de perte d'énergie, la traînée sur la godille est environ dix fois plus faible que la portance qui s'y applique. Ainsi, à force propulsive et vitesse de rame égales, le marinier dissipe dix fois moins d'énergie dans l'eau quand il godille que quand il rame.

LA GODILLE EST PLUS EFFICACE

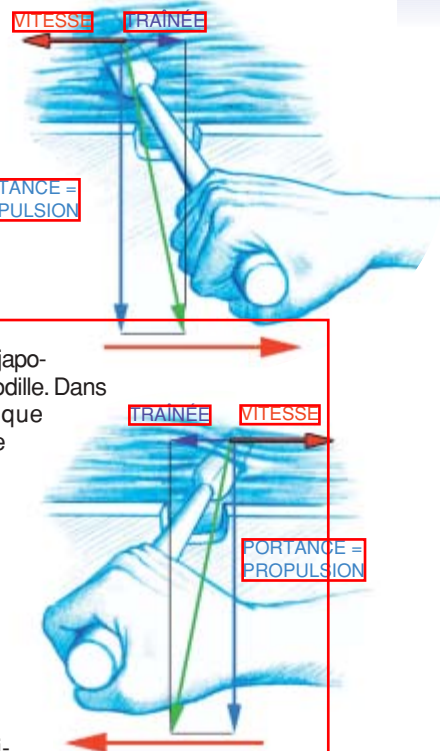
De plus, contrairement à la rame, la godille augmente en efficacité avec la vitesse. Prenons l'exemple d'une godille de dix centimètres de large et de un mètre de long (partie immergée). Déplacée de un mètre par seconde, le bateau étant à l'arrêt, elle engendre une force propulsive d'environ 40 newtons (4 kilogrammes-forces). Si le matelot continue son mouvement à l'identique quand le bateau est lancé à un mètre par seconde, la vitesse relative de la rame par rapport à l'eau est d'environ 1,4 mètre par seconde (la longueur de l'hypoténuse du triangle isocèle rectangle formé par les deux vitesses de un mètre par seconde) et orientée à 45° par rapport à la direction du bateau. Comme la portance est proportionnelle au carré de la vitesse de la rame par rapport à l'eau, elle est donc deux fois plus importante que précédemment.



La godille est une technique pour propulser une embarcation avec une seule rame dont l'extrémité trace dans l'eau des zigzag.

Bien que cette force ne soit plus dirigée vers l'avant, sa composante dans le sens du mouvement reste supérieure de 40 pour cent à la force obtenue lorsque le bateau est au repos.

Ces avantages expliquent pourquoi les mariniers chinois et japonais employaient beaucoup la godille. Dans ces deux pays, elle se pratique avec une rame spéciale nommée *yuloh* en chinois et *ro* en japonais. Longue et légèrement recourbée, cette rame est placée presque à l'horizontale sur le plat-bord de la poupe. Une corde la maintient à son extrémité, de sorte que le rameur, n'ayant pas à maintenir son *yuloh*, se concentre sur les efforts à fournir pour lui imprimer un va-et-vient. Il modifie aussi l'orientation de la rame avant chaque retour. Un marinier chinois habile déplace un sampan de six mètres de long à cinq kilomètres par heure!



Mouvement aller-retour de la godille et forces mises en jeu.

LES POISSONS HAUTURIERS GODILLEN

Les meilleurs nageurs des mers emploient aussi la godille. Poissons et cétacés possèdent un corps massif emmanché d'une mince queue terminée par une large nageoire. Verticale chez les requins et les thons, la nageoire caudale est horizontale chez les dauphins et les baleines. En forme d'aile, sa dimension perpendiculaire au corps est supérieure à sa profondeur et sa surface effilée maximise la portance. Elle est aussi très souple, ce qui permet aux poissons, comme aux cétacés, de la tordre fortement pour optimiser la portance qu'elle engendre. Ce mode de propulsion est si efficace que certains thons atteignent et maintiennent des vitesses supérieures à 80 kilomètres par heure. Quant aux requins, nombre d'entre eux vivent de thon...

M. SFAKIOTAKIS, D. M. LANE et J.C. DAVIES, *Review of fish swimming modes for aquatic locomotion*, IEEE journal of oceanic engineering, vol. 24, p. 237, 1999.

S.F. MANNING, *How to scull a boat*. Wooden Boat, 1991.

Science et littérature

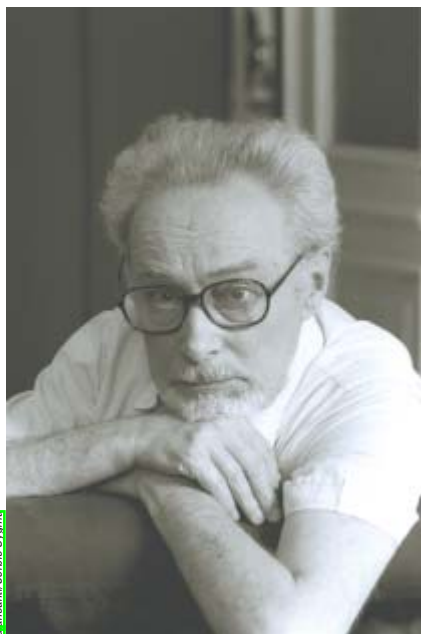
Primo Levi, le double lien : Science et Littérature

sous la direction de W. Geerts et J. Samuel. Éditions Ramsay, Paris, 2002 (326 pages, 21 euros).

Primo Levi est né en 1919 à Turin. Il y soutient une thèse de doctorat en chimie en 1941. En 1943, après avoir rejoint un groupe de partisans, il est arrêté par la police fasciste italienne. Juif, il est livré aux Allemands et déporté à Auschwitz. Il sera libéré en janvier 1945 par les Soviétiques. Levi s'est suicidé en 1987.

Dès son retour à Turin, il rédige *Si c'est un homme*, un des sommets de la littérature sur l'univers concentrationnaire nazi. Le livre paraît en 1947 dans l'indifférence quasi générale ; il faudra attendre une réédition en 1958 pour que le livre et son auteur commencent à trouver un public. Le style de Levi, que l'on retrouve dans ses autres œuvres, est fait de précision, de concision, de refus de tout lyrisme et de toute véhémence. Ce style, Levi affirmera l'avoir acquis dans les laboratoires de chimie.

En 1975, il peut abandonner son activité de chimiste – la direction d'une petite usine de peintures et de vernis – et se consacrer entièrement à l'écriture. Il a



Primo Levi (1919-1987).

laissé une œuvre importante, au premier plan de laquelle figurent *Si c'est un homme* et *La trêve* parmi les œuvres «concentrationnaires», une autobiographie «chimique» intitulée *Le système périodique* – que Saul Bellow, prix Nobel de littérature américain qualifia, à sa parution, de «chef-d'œuvre» – un roman «technologique», *La clef à molette*, des récits de fiction et de science-fiction et de nombreux recueils d'essais. En France, le succès est venu lentement, mais depuis la mort de Levi, son audience ne cesse de croître, comme le montrent la diffusion de ses ouvrages, et le nombre d'articles et d'études qui lui ont été consacrés.

En novembre 1999, un colloque s'est tenu à Strasbourg, dont ce livre présente les actes. Son thème est ainsi présenté dans l'avant-propos : «Toute son œuvre à partir de *Si c'est un homme* est traversée par cette polarité : la possibilité du mal absolu et l'infini potentiel humain que représente, éminemment, la science. Sa position de témoin d'Auschwitz, ses qualifications scientifiques et son invention littéraire font de lui un cas unique sur lequel il est urgent de faire le point.»

Les 14 interventions faites au colloque ont été organisées autour de trois thèmes : «Témoignages et véracité», «Science, texte et langage», et «Science, philosophie et vision du monde». Une table ronde et une discussion ont clos le colloque.

Pierre-Gilles de Gennes et Jean-Marie Lehn ont participé au colloque de Strasbourg. Dans son intervention «Primo Levi et les métiers de la science», P.-G. de Gennes a rapproché des épisodes du *Système périodique*, des passages de *La clef à molette*, et sa propre expérience pour montrer les résonances profondes que l'œuvre de Levi peut susciter chez les physiciens et les chimistes d'aujourd'hui. Levi fait partie de ce que très joliment P.-G. de Gennes nomme son «cercle des amis de l'au-delà», des amis qu'il n'a pas connus, qu'il aurait aimé connaître et dont il se sent extraordinairement proche. Dans ce cercle restreint, Levi voisine avec Jules Michelet, l'«historien de passion», le physicien américain Richard Feynman et Jean Giono, le «conteur des Alpes du Sud» où P.-G. de Gennes a grandi pendant la guerre.

J.-M. Lehn n'a pas présenté d'intervention, mais sa participation à la discussion qui a clos le colloque a été très importante. Lui aussi part du *Système périodique* ; il montre la façon dont il s'intègre à la chimie, science de transformation de la matière dans ses manifestations au niveau de l'atome, particule ultime du chimiste.

J.-M. Lehn revient, pour l'approuver, sur le bel «éloge de l'impureté» en chi-

mie que Levi a écrit à propos du zinc. Il a des phrases stimulantes sur la place de l'homme dans l'évolution, l'apparition de la vie et l'apparition de la pensée, sur la responsabilité que nous avons de léguer aux générations à venir «toutes les possibilités qui existent».

Je recommande ce livre aux lecteurs de Levi... et à tous ceux qui ne l'ont encore jamais lu. Les premiers y trouveront un matériau dense pour alimenter les réflexions de leurs lectures, et les seconds des raisons, j'en suis sûr, convaincantes, pour aborder son œuvre.

Georges BRAM,
Université de Paris-Sud (Orsay)

Paléontologie

Les requins sont-ils des fossiles vivants?

Gilles Cuny, EDP-Sciences, collection Bulles de Science, 2002 (205 pages, 18 euros).

Dans cet ouvrage agréablement illustré par Alain Bénéteau, Gilles Cuny retrace 430 millions d'années d'histoire naturelle des chondrichthyens, les «poissons cartilagineux», requins, raies et chimères. On ne peut qu'être fasciné par les détails de la vie sexuelle des chondrichthyens du Carbonifère ou par les cas de cannibalisme intra-utérin chez le requin-taureau actuel (*Carcharias taurus*). On apprendra à ne pas confondre le poisson-scie (*Pristis pristis*), qui est une raie, et les requins-scies, qui constituent deux familles de requins (les sclérorhynchidés et les pristiphoriformes) distinctes dont la «scie» dentée est apparue indépendamment. On découvrira les invraisemblables eugénéodontiformes du Paléozoïque, tel *Helicoprion*, muni d'une étonnante «scie circulaire» à l'avant de sa gueule. Les ancêtres des requins actuels (les néosélaciens) sont apparus au Trias, les premiers représentants des ordres actuels au Jurassique et au Crétacé seulement et ne peuvent donc guère être considérés comme des «fossiles vivants» ; leur remarquable similitude avec les formes plus anciennes comme *Cladoselache* du Dévonien n'est due qu'à une convergence morphologique superficielle.

Apparus voici 430 millions d'années, les requins illustrent à merveille les vicissitudes de l'histoire de la vie depuis le milieu du Paléozoïque. Ainsi le groupe connaît-il un développement spectaculaire



Helicoprion, étonnant requin du Paléozoïque doté d'une scie «circulaire»...

Il y a 354 millions d'années, après la grande crise biologique de la fin du Dévonien ; cet essor soudain est probablement lié à l'extinction des grands prédateurs des mers dévoniennes, des poissons cuirassés du groupe des placodermes. Après une importante diversification durant la fin de l'ère primaire, la crise de la limite permotriasique est à nouveau fatale à un grand nombre de groupes de poissons cartilagineux, tels les principaux ordres de chimères ou les fameux eugénodontiformes. Parmi les survivants de cette grande crise, des requins d'eau douce, les xénacanthes, qui s'éteindront un peu plus tard, lors de l'extinction en masse de la fin du Trias...

Durant l'ère secondaire se développe un groupe original, les hybodontes, qui s'éteindra à la limite Crétacé-Tertiaire, quatrième extinction de masse à laquelle certains néosélaciens, obstinés, vont

néanmoins survivre, alors que la plupart des prédateurs disparaissent, tels les grands reptiles marins. Au Crétacé apparaissent les premiers grands lamniformes (l'ordre de l'actuel grand requin blanc, héros des *Dents de la mer*) ; leur entrée en scène pourrait avoir été fatale aux ichtyosaures, ces reptiles marins qui disparaissent voici 90 millions d'années. Les requins ne sont pas pour autant les plus grands prédateurs de la fin du Mésozoïque, dominés par de gigantesques reptiles carnivores comme les mosasaures. C'est donc seulement à l'aube de l'ère tertiaire qu'ils deviendront les principaux prédateurs marins ; *Carcharocles megalodon* (qui n'appartient pas au genre *Carcharodon*, auquel il a longtemps été rapporté par erreur) sera le plus grand d'entre eux au Miocène, avec ses 13 mètres de longueur ! Sa disparition, il y a deux millions d'années, est contem-

poraine de l'apparition d'un concurrent, un mammifère cette fois-ci : l'Orque (*Orcinus orca*, ou «baleine tueuse»), qui est le plus grand prédateur marin aujourd'hui, avec *Carcharodon carcharias* (le grand requin blanc). En mêlant agréablement biologie et paléontologie, Gilles Cuny offre dans ce plaisant ouvrage une clé de la compréhension de 400 millions d'années d'évolution. Parce que les requins ont survécu à quatre grandes crises biologiques fatales à tant d'autres groupes zoologiques, ils constituent un matériau d'étude exceptionnel pour la compréhension de ces moments clés de l'histoire de la vie. Un peu de chance et une succession d'adaptations, voici la clé de ce succès selon Gilles Cuny.

Jean LE Lœuff, Musée d'Espéraza

Art et science

Histoire secrète des chefs-d'œuvre

Didier Dubrana, Éditions SPE-Barthélémy, 2001 (244 pages, 59 euros).

Lorsque la science s'en mêle, les chefs-d'œuvre livrent leurs secrets, même s'ils conservent parfois leurs énigmes. N'y a-t-il pas dans cette volonté de comprendre au-delà du visible, une indiscretion choquante, voire une profanation ? Ne faut-il pas respecter le cheminement et le mystère de la création, les repentirs d'un peintre dont le dessin évolue lors de l'exécution du tableau, les blessures d'une statue restaurée ou la nature des pigments d'une stèle polychrome ?

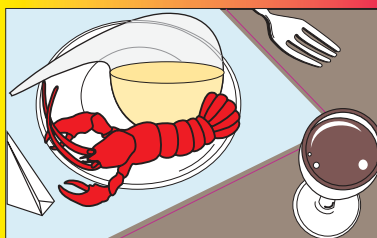
La légitimité des interventions sur les œuvres vient du désir (justifié) d'authentification ou de la nécessité d'un diagnostic précis avant de réparer ce que le temps menace. Ce souci de protéger un patrimoine à transmettre, fait tout l'intérêt du Centre de recherche et de restauration des Musées de France (C2RMF) localisé au Musée du Louvre, sous les Jardins du Carrousel, et dont la direction est assurée par un fervent partisan de l'alliance entre l'art et la science, Jean-Pierre Mohen. Cette institution a une longue histoire qui a débuté en 1920 par une démonstration : les radiographies de tableaux réalisées par André Chéron. Ensuite deux médecins argentins (dont l'un était un mécène) ont développé au Louvre un Institut d'analyse scientifique des tableaux (1931). Malgré un

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 juillet 2002.



L'analyse radiographique des *Noces de Cana*, attribué à Véronèse, a été réalisée au Centre de recherche et de restauration des Musées de France. Elle a confirmé que la toile est l'œuvre d'un seul peintre dont on a compris la technique.

coup d'arrêt durant la Seconde Guerre mondiale, le laboratoire reprend son activité, en 1946, sous la houlette de Magdeleine Hours durant plus de 30 ans ; sa forte personnalité a su concilier le pouvoir politique (le soutien d'André Malraux) et des présentations médiatiques (expositions et émissions de télévision). Au fil des années, les techniques et les appareils se diversifient, le fleuron étant l'accélérateur de particules, *Aglaré* (Accélérateur Grand Louvre pour analyse élémentaire) inauguré en 1989, équipement unique pour un musée.

Après cet historique fort instructif, les résultats sont évoqués au travers de thématiques variées. Par exemple, grâce au microscope électronique à balayage, on a compris pourquoi les tableaux de Van Gogh (1853-1890) ont perdu leurs couleurs roses et pourpres. Le maître a utilisé un produit largement commercialisé à l'époque, la « laque géranium » à base d'éosine qui se décompose à la lumière. L'utilisation combinée du microscope électronique à balayage et de l'accélérateur de particules a révélé l'identité des pigments des stèles funéraires d'Alexandrie (III^e siècle avant J.-C.) : certains sont connus (hématite, cérusite, goëthite, bleu égyptien, orpiment, cinabre) et d'autres non (mimétite, vanadinite et célestine).

Une restauration spectaculaire a été celle de l'un des plus célèbres tableaux du Louvre : *Les noces de Cana* de Paolo Caliari, dit Véronèse (1528-1588). L'exploration de la toile de 65 mètres carrés a nécessité 135 radiographies et plus de deux ans de travaux dans la salle d'exposition elle-même. On a maintenant la preuve que la toile monumentale est pratiquement l'œuvre du peintre seul, qu'il a eu de nombreux repentirs, qu'il a peint le visage d'un

bénédictin sur papier qu'il a ensuite marouflé sur la toile. Enfin l'examen a révélé un repeint grossier et apocryphe : le manteau rouge d'un intendant a laissé place à un vêtement vert, beaucoup plus finement exécuté.

Une technique de radiographie avec des rayons gamma (plus pénétrants que les rayons X) permet d'explorer le cœur des sculptures de pierre. On peut ainsi comprendre le travail préparatoire du sculpteur ou les secrets des restaurations. Ainsi *Le guerrier invincible* du sculpteur Agassia d'Éphèse a parlé sous gammagraphie : restauré en 1611, on voit nettement la cassure en 17 fragments, les goujons métalliques internes, les agrafes externes et le plomb de scellement.

Parfois, le C2RMF forme un partenariat et dans le domaine de la chimie, signalons la recherche conduite avec *L'Oréal* qui a permis d'identifier la nature des fards égyptiens à la fois produits de maquillage et de soins. Il a été prouvé à cette occasion que les Égyptiens maîtrisaient parfaitement la chimie des solutions.

Didier Dubrana, biologiste de formation et journaliste scientifique, a réussi une passionnante enquête et son ouvrage est une vraie réussite : les textes sont clairs, documentés et très bien servis par une maquette soignée et de très belles illustrations. Les techniques sont commentées et agrémentées de schémas très didactiques. C'est un beau livre (le premier d'une collection) qui s'adresse aussi bien aux amis du Louvre, qu'aux professionnels des Antiquités, aux amateurs d'art et à tout lecteur soucieux d'acquérir ou d'augmenter ses connaissances sur le sujet. Une invitation au partage des émotions nées de la contemplation des chefs-d'œuvre ne se refuse pas.

Michèle FEBVRE

Histoire des sciences

La science au péril de sa vie – Les aventuriers de la mesure du monde

Arkan Simaan, Éditions Vuibert/ADAPT, 2001 (206 pages, 19 euros).



Après les ténèbres et l'ignorance, le siècle des Lumières fut celui des connaissances et de toutes les curiosités. Le géocentrisme (la Terre serait au centre de l'Univers) a laissé la place à l'héliocentrisme (les planètes tournent autour du Soleil) et la Terre est à découvrir et à mesurer. Quelle est la forme de notre planète? Un débat particulièrement vif oppose les newtoniens partisans de la force d'attraction qui se transmet dans le vide (les particules de l'Univers s'attirent) et les cartésiens qui jugent cette force irrationnelle. Les premiers défendent l'idée d'une Terre aplatie aux deux pôles (sous l'effet de la force centrifuge) et les seconds réfutent cette assertion avec violence. Il faut donc vérifier. Deux missions complémentaires et concurrentes sont envoyées par l'Académie des sciences, l'une avec Charles Marie de La Condamine (1701-1744) au Pérou, en 1735, et l'autre avec Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759), en Laponie,

en 1736. Il s'agit de mesurer l'arc du méridien à des latitudes éloignées : si cet arc est identique dans les deux lieux, la Terre est sphérique, si l'arc est plus long en Laponie qu'au Pérou, alors la Terre est aplatie aux pôles. Dans chacune de ces aventures s'embarquèrent des académiciens, des médecins-naturalistes, ingénieurs, assistants et domestiques. Aux difficultés des voyages (climat, topographie) s'ajoutent celles des mesures (transport hasardeux du matériel, dérèglement des instruments), sans escamoter les rivalités personnelles, les détournements d'argent, les maladies et les morts violentes. C'est Maupertuis qui l'emporte en rapidité et en efficacité ; le 28 août 1737, il révèle à l'Académie des sciences, que la Terre est aplatie aux pôles! Pourtant le débat est loin d'être clos, les cartésiens ne désarment pas, contestent les résultats et Maupertuis, malgré sa triomphale réussite, tombe en disgrâce. Il poursuivra sa carrière comme président de l'Académie des sciences (1746)... à Berlin!

Autre préoccupation de l'époque, mesurer la distance de la Terre au Soleil. Pour se faire, Edmond Halley (1656-1742) avait compris l'importance du passage de Vénus devant le Soleil. C'est le 6 juin 1761 et le 3 juin 1769 que le phénomène a eu lieu et de nombreux pays se passionnèrent pour l'événement. On a recensé 62 sites et 120 observations lors du premier passage et 77 stations et 151 observations pour le deuxième, dans le monde entier. Parmi les savants oubliés et dont le nom est associé au passage de Vénus, il faut parler de l'opiniâtre abbé Jean Chappe d'Auteroche (1728-1769) qui a fait deux voyages, le premier en Sibérie (Tobolsk) et le second au Mexique, où il terminera ses mesures avant de succomber à une épidémie, sans doute de typhus. Suivre cet homme qui surmontait tous les obstacles pour remplir ses missions est impressionnant. Il a même su convaincre ses moujiks de traverser une rivière menacée de dégel, en prétendant que son thermomètre était un animal magique dont le déplacement du mercure autorisait le passage! Pour notre information, le prochain passage de Vénus est fixé au 8 juin 2004. Il sera alors certainement possible d'affiner cette distance Terre-Soleil qui est d'environ 150 millions de kilomètres.

Enfin l'auteur retrace, «pas à pas», l'histoire du système métrique. Que de lois révolutionnaires, de remaniements, de modifications des unités de mesure, avant d'arriver en 1889 au dépôt des prototypes internationaux du mètre et du kilogramme au Pavillon de Breteuil!

L'auteur de *La science au péril de sa vie*, Arkan Simaan est agrégé de physique. Il enseigne dans un lycée et se passionne pour l'histoire des sciences. Il a redonné vie à ces savants oubliés de la mémoire collective et parfois des dictionnaires et qui, pourtant, ont participé à la construction de la science. Il montre combien ces hommes avec leurs défauts et leurs qualités, certains soucieux de gloire et de pouvoir, d'autres respectueux d'éthique et de rigueur scientifique se sont lancés dans des périples dangereux où ils ne pouvaient compter que sur leurs forces et leur intelligence.

Pour les physiciens, l'ouvrage apporte des réponses précises sur les mesures du monde, pour les autres (et ils seront nombreux) on peut le lire comme un romanesque récit de voyage. Arkan Simaan a su admirablement illustrer la devise de Condorcet : «À tous les temps, à tous les peuples!».

Michèle FEBVRE

Épistémologie

De la science à la philosophie, Hommage à Jean Largeault

sous la direction de Miguel Espinoza, Éditions L'Harmattan, Paris, 2001 (290 pages, 22,90 euros).

Cet hommage à Jean Largeault est un livre réussi qui invite à découvrir ou à relire un épistémologue fécond. Les textes réunis font état des deux journées consacrées à la mémoire du grand épistémologue français, organisées à Strasbourg, en 1996, puis à Paris, en 1999. Coordonnateur de l'ouvrage, Miguel Espinoza a raison de signaler que «l'existence d'un penseur est un événement rare, et Jean Largeault en était un. Comment réunir en une seule personne tant d'exigence – profondeur, culture étendue, finesse concrète et généralité abstraite dans le raisonnement, indépendance dans le jugement, distance du bruit de la mode?»

Né en 1930, Largeault enseigna la philosophie à l'Université Paris IV à partir de 1967, puis à Toulouse, de 1973 à 1980. Après cette période, bien représentée dans l'ouvrage, il s'intéressa davantage à la philosophie de la nature, constatant que «l'épistémologie contemporaine s'était fourvoyée, car elle était

SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
www.pourlascience.com
Commande de dossiers ou de magazines :
01-55-42-86-12

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Françoise Pétry-Cinotti (Rédactrice en chef), Philippe Pajot (Rédacteur en chef adjoint), Loïc Mangin, Claire Le Poulennec, François Savatier, Laurence Plévert, Marie-Neige Cordonnier, Xavier Müller, René Cuillierier, Sébastien Bohler (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction/ Maquette : Annie Tacquenot, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Pierre Saminadin, Laurence Cristofoli. Site Internet : Nicolas Botta-Kouznetsoff. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel. Direction financière : Anne Guldorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz et Christine de Cacqueray. Presse et communication : Floryse Grimaud, assistée de Isabelle Huet. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Conseiller scientifique : Hervé This. Ont également collaboré à ce numéro : Iannis Dandouras, Pierre-Yves Deschamps, Mohammed Et-Touhaini, Vincent Guichard, Jean-Louis Hartenberger, Guilaine Lagache, Jean Masson, Félix Mirabel, Christophe Pichon, Daniel Shulz, Bernard Thierry, Jean-Louis Valatx.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Mariette Di Christina, Michelle Press, Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Steve Mirsky, George Musser, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Kate Wong, Philip Yam. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer : Gretchen Teichgraber. Vice-President : Chuck McCullagh and Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Catherine Teissier

8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97
Télécopieur : 01 43 25 18 29
Étranger : 415 Madison Avenue, New York.
N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Anne-Claire Ternois : 01 55 42 84 04
Ginette Grémillon : 01 55 42 84 04

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Christophe Vitiello : 01 55 42 84 81.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidus : Chemin des châteaux, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oides - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

Sous la direction de
Miguel ESPINOZA

DE LA SCIENCE À LA PHILOSOPHIE

Hommage à Jean Largeault

L'Harmattan

OUVERTURE PHILOSOPHIQUE

laissée sans contenu. [...] Les épistémologues modernes traitent de la connaissance de la connaissance, de notre façon de voir et de parler. En perdant de vue son objet, l'épistémologie devient insignifiante, une question de mots, une glose sans fin». Ce ne sont pas des mots vides, mais une conviction maintes fois étayée et défendue dans les très nombreux livres de Largeault, fruits de sa capacité de production originale hors du commun.

Largeault fut aussi un remarquable recenseur : il donnait en quelques lignes la substance d'une pensée (la recension doit être plus brève que l'ouvrage!) ; bien souvent, il expliquait pourquoi l'auteur du livre qu'il examinait péchait par ignorance (ou parfois par incompréhension!) des grands prédécesseurs. Pendant plus de 20 ans, il donna ses recensions aux *Archives de philosophie*, à la revue *Dialogue*, à la *Revue internationale de philosophie*, à la *Revue de synthèse*, à la *Revue philosophique*... et à *Pour la Science*, dont «il était, en son domaine, le recenseur le plus régulier». P. Magnard signale à juste titre que *Pour la Science* eut le privilège tout à fait remarquable de publier des textes éclairants, qui tiraient des livres une substance que leur auteur ne savait pas toujours y avoir mise. Parce qu'il savait les lecteurs de *Pour la Science* attentifs, intéressés et rigoureux, il accepta le jeu de la vulgarisation, ce qui n'était pas une mince affaire, puisque, dans un nombre de signes limité, la revue livre à ses lecteurs des textes qui doivent être aussi profonds qu'ils sont limpides. Les auteurs de *De la science à la philosophie* ignorent peut-être que la première recension qu'il livra à *Pour la Science* fut l'occasion d'une mémorable discussion,

Largeault ayant soumis un texte dont la difficulté était à la hauteur de sa compétence... Après la discussion serrée qui suivit, il comprit parfaitement le parti pris éditorial de la revue, et, de ce jour, il offrit des textes qu'il n'est pas inutile de relire. Quand des recueils reprendront-ils ces recensions? Ils feraient de meilleurs cours de philosophie que bien des traités actuellement disponibles...

Largeault avait une plume mordante : s'il avait été croyant, il aurait sans doute pris pour devise «Dieu vomit les tièdes». À la lecture du livre ici analysé, j'apprends que Largeault consultait des amis pour atténuer les coups qu'il portait aux livres dont il traitait : «Sans se permettre la moindre concession qui aurait fait injure à la vérité, il voulait ménager l'amour-propre de celui qu'il était tenu de redresser.» Qu'aurait-il écrit sans cette censure qu'il s'imposait! Sa passion de la vérité lui faisait recenser même de mauvais livres : «Vous comprenez, disait-il, leurs défauts, que j'identifie et que je pointe, me font comprendre ce que je pense, par opposition» et «Le mauvais livre fait penser quand bien même son auteur ne se serait pas avisé de penser.» Jean Largeault ne cessait de dénoncer le conformisme paresseux, l'usage de l'argument d'autorité favorisé par un enseignement académique de la philosophie qu'il critiquait souvent.

Quelles étaient les idées philosophiques de Largeault? Lire *De la science à la philosophie* est sans doute le meilleur moyen d'en découvrir les divers aspects, mais il faut également citer son livre *Énigmes et controverses*, ou ses *Principes de philosophie* dans lesquels il écrivait : «Les réussites de l'induction s'expliquent par la stabilité de la nature. Ses erreurs ou ses échecs, par la possibilité que des séquences causales très différentes aboutissent à des phénomènes d'allure similaire, ou que des séquences dont les origines sont très proches divergent à assez court terme.» Quant à ses idées sur la philosophie de la nature, elles sont bien résumées par cette citation de Bertrand Saint-Sernin : «Nous ne pouvons diviser la réalité entre une nature cause, qui produirait le monde sensible, et une nature effet, qui se donne à nos sens : nos théories doivent traiter des objets réels sous toutes les modalités où ils se livrent à nous ; il n'y a pas d'arrière-fond substantiel et causal du monde, dérobé à notre vue, opposé à un monde apparent livré par nos sens.»

La fin du livre, en hommage au philosophe trop tôt emporté, comporte des textes d'épistémologie qui sont sans rapport direct avec Largeault, et évoquent seulement des questions dont il était épris.

Hervé THIS, INRA - Collège de France