

L'ASTRARIUM • LE JEU DES ERREURS SÉDUISANTES • GROSSESSE ET HYPERTENSION

Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

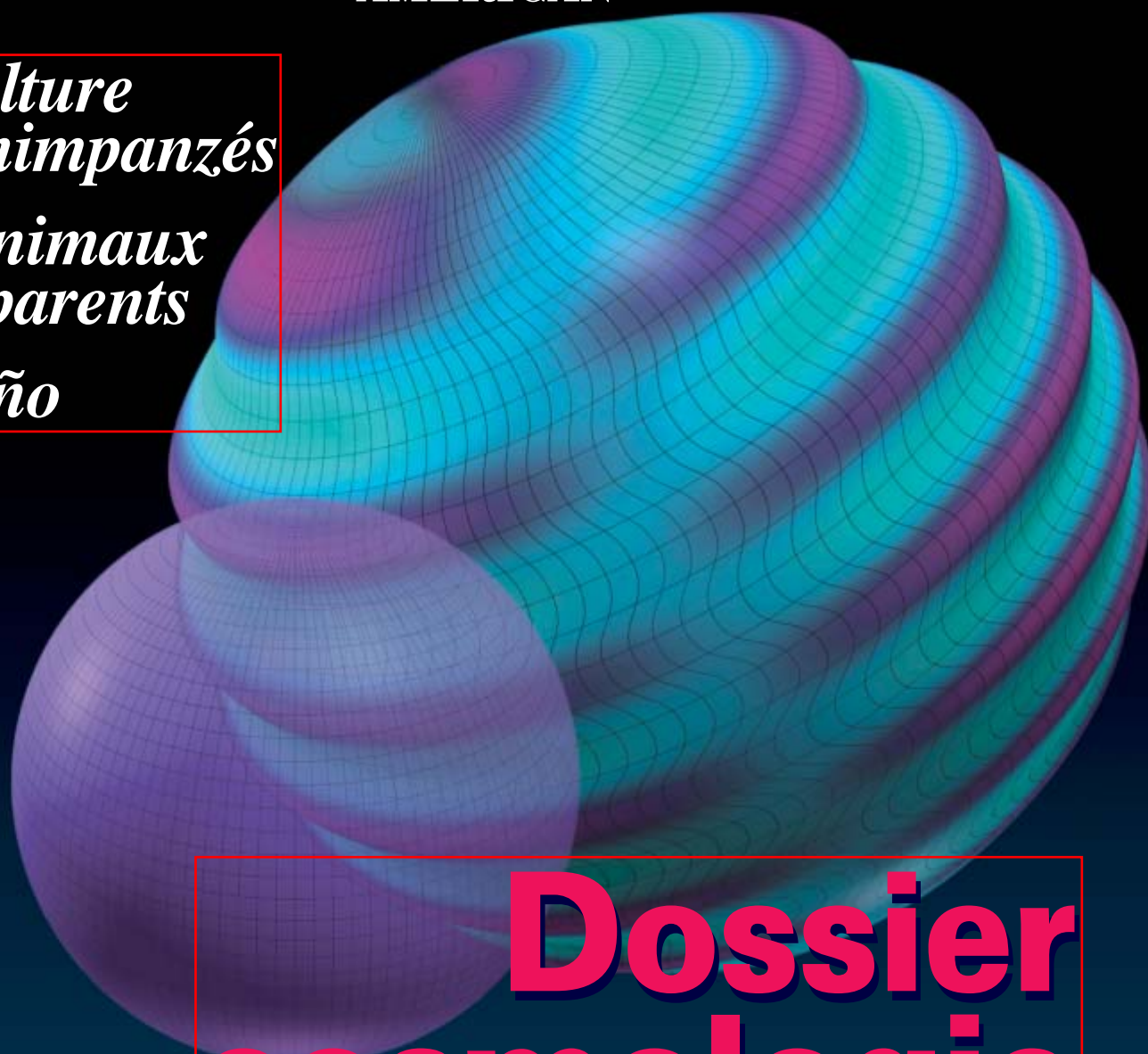
Mars 2001

édition française de

www.pourlascience.com

SCIENTIFIC
AMERICAN

*La culture
des chimpanzés*
*Les animaux
transparents*
El Niño



Dossier cosmologie

Canada : \$ 8,95 / Belgique : 285FB / Suisse : 11,20FS

M 2687 - 281 - 39,00 F



BLOC-NOTES

4

de Didier Nordon

SCIENCE ET ÉCONOMIE

5

Diabolique équilibre

par Ivar Ekeland

TRIBUNE DES LECTEURS

6



SCIENCE ET GASTRONOMIE

7

Allergies alimentaires

par Hervé This

POINT DE VUE

Galápagos : une marée noire révélatrice

8

par Christophe Grenier

La recherche publique sur les OGM

10

par Daniel Nahon



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

12

■ Les biologistes coupent les cheveux en quatre
■ Tourner autour du mot ■ Lente lumière ■ Des dents

en éventail ■ Rivalité sexuelle ■ Le séisme de Bhuj ■ Nouveau
thermomètre intergalactique ■ Des glaciers voués à la disparition
■ Échange d'énergie dans l'atome ■ Riche hérité islandaise

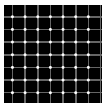


PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

24

L'astrarium de Giovanni Dondi

par Emmanuel Pouille



ART ET SCIENCE

94

Variations sur une grille

par Jacques Ninio

LOGIQUE ET CALCUL

100

Le jeu des erreurs séduisantes

par Jean-Paul Delahaye

VISIONS MATHÉMATIQUES

106

Un démineur millionnaire

par Ian Stewart



IDÉES DE PHYSIQUE

108

Chaleur en perdition

par Roland Lehoucq et Jean-Michel Courty



ANALYSES DE LIVRES

110

■ Copain des petites bêtes, de Léon Rogez ■ Le mètre du
monde, de Denis Guedj ■ Guyane, Guyanes, une
géographie «sauvage» de l'Orénoque à l'Amazone, de Emmanuel Lézy
■ Histoire des grands scientifiques français, d'Ambroise Paré à
Pierre et Marie Curie, de Éric Sartori et Pierre-Gilles de Gennes
■ Photo-guide des champignons d'Europe, de Régisse Courtecuisse.



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

Grossesse et hypertension

28

par Françoise Ferré et Bruno Carbonne



Les obstétriciens et les biologistes tentent d'élucider les raisons de la mortalité des femmes enceintes. Une forme d'hypertension, la prééclampsie, est au banc des accusés.



Mini-dossier :

La cosmologie en effervescence

35

Les échos du Big Bang

36

Robert Caldwell et Marc Kamionkowski

Les empreintes laissées par les ondes gravitationnelles dans le fond diffus cosmologique qui baigne l'Univers détiennent peut-être les clés de son origine.

Cartographe cosmique

42

Charles Bennett, Gary Hinshaw et Lyman Page

Le satellite MAP de la NASA mesurera les fluctuations de température du fond diffus cosmologique, afin de fournir aux cosmologistes une vision plus précise de l'Univers primordial.

Le cinquième élément cosmique

44

Jeremiah Ostriker et Paul Steinhardt

Un champ d'énergie invisible, la quintessence, domine depuis peu l'évolution de l'Univers, et en accélère l'expansion.

Le sens caché de la cosmologie moderne

54

James Peebles

Les nombreuses théories cosmologiques vous laissent perplexes? Tant mieux!

Les cosmologies de repli

56

João Magueijo

Au cas où les théories cosmologiques modernes échoueraient, il faut en rechercher d'autres.

Le recyclage des protéines

58

par Alfred Goldberg,
Stephen Elledge et Wave Harper

Diverses maladies apparaissent quand les protéasomes, des structures qui détruisent les protéines, fonctionnent trop ou, au contraire, pas assez.



L'effet tunnel et les protéines

64

par Mark Johnson et Gordon Kearley

Une sonde à effet tunnel explore les interactions au sein des molécules biologiques. Elle devrait révéler les mécanismes de repliement des protéines, qui commandent l'activité de ces molécules.

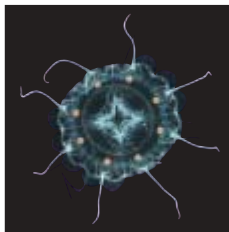


Les animaux transparents

70

par Sönke Johnsen

Grâce à d'ingénieuses adaptations physiologiques, de nombreux animaux marins sont devenus transparents.

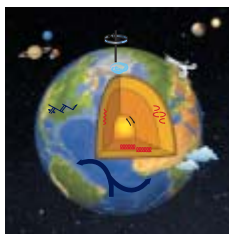


El Niño et la rotation de la Terre

78

par R. Abarca del Rio, D. Gambis,
D. Salstein et B. Dewitte

El Niño naît dans le Pacifique tropical, mais modifie la circulation atmosphérique à l'échelle planétaire, et même la vitesse de rotation de la Terre.



Les cultures des chimpanzés

86

par Andrew Whiten
et Christophe Boesch

Les chimpanzés ont des comportements qui ne peuvent être interprétés qu'en termes de «traditions» et qu'ils se transmettent de génération en génération.



L'histoire du début du monde

Au commencement, il y a 15 milliards d'années, fut le *Big Bang* et nous en avons une image par la lumière émise lorsque les protons et les électrons se sont combinés pour constituer les premiers atomes. Longtemps cette image de la naissance des atomes massiques fut d'une désespérante uniformité et l'on s'expliquait mal comment les galaxies et les étoiles avaient pu se former. Les hétérogénéités de la soupe primordiale n'ont été mesurées qu'il y a une dizaine d'années : elles ont créé, par attraction gravitationnelle, les grandes structures du cosmos (voir le Minidossier *Cosmologie*, pages 35 à 57).

D'où venaient ces hétérogénéités? Des ondes gravitationnelles qui sillonnaient la soupe de l'Univers primordial. À quoi sont dues ces ondes gravitationnelles (les particules correspondantes sont les gravitons)? À l'inflation et aux phénomènes quantiques : le vide engendre en permanence des couples de particules virtuelles, notamment de gravitons. La forte dilatation qui a suivie le Big Bang les a séparés. Les ondes gravitationnelles, en comprimant et en dilatant le milieu, l'ont structuré. Quelle a été la cause de cette formidable dilatation au tout début de l'Univers? Mystère : la chaîne des explications s'arrête, momentanément, à ce stade.

La relativité générale nous interdisant de localiser l'Univers spatialement et temporellement, nous pensons que les lois qui le régissent sont inchangées dans l'espace et le temps. L'Univers est alors compréhensible et les physiciens ont toutes les audaces, dont ils sont récompensés : le début de l'Univers est expliqué par les insolites lois de la mécanique quantique, nées il y a 100 ans. Telle est l'accélération de l'histoire : 100 ans pour élucider (partiellement) 15 milliards d'années... La soupe primordiale contenait les ingrédients qui, après une longue évolution biologique, nous ont donné 30 000 gènes et un cerveau capable de comprendre la formation «physique» de l'Univers. Cette vision biologique est à préciser grandement : la biologie est une science jeune qui ne s'est pas conceptualisée autant que la physique. Elle sera plus explicative lorsque la chrysalide biologique, encore descriptive et contemplative, sera devenue papillon aussi extravagant et vraisemblable que la physique.

Philippe BOULANGER



BLOC-NOTES

DIDIER NORDON

Foin de Lagrange!

« La vérité est simple, et peut être toujours mise à portée de tout le monde, quand on veut en prendre la peine », écrivait d'Alembert en conclusion de l'article « Différentiel » de l'*Encyclopédie*. Plus exigeant encore, Lagrange estimait à la même époque : « Un mathématicien n'a pas parfaitement compris ses propres travaux tant qu'il ne les a pas clarifiés au point de pouvoir aller dans la rue les expliquer à la première personne venue. » Agissait-il effectivement ainsi, ou sa posture relève-t-elle du pur fantasme ? Aux historiens de le dire. Reste que, jusqu'au XIX^e siècle, partager fut un idéal intellectuel de nombreux savants.

Presque plus rien de tel aujourd'hui. Aux yeux des chercheurs, sauf rares exceptions, soumettre leurs ultimes découvertes aux réactions du tout-venant serait une tentative absurde, contre-productive. Même celui qui aime vulgariser prétend moins se confronter au premier venu qu'instruire des gens avertis. En outre, il n'espère pas de ses lecteurs un regard neuf, donc, peut-être, instructif à son tour. Il donne mais ne partage pas.

Que penser de cette évolution des mentalités ? Question de goût, comme chaque fois qu'il s'agit d'interpréter un fait. L'un approuvera. Les modernes ne font que tirer la leçon de la formidable complexité atteinte par la science ; prétendre que n'importe qui peut la comprendre

serait pure démagogie. L'autre critiquera. Au XVIII^e siècle, le calcul différentiel n'était pas moins ésotérique que, par exemple, la physique corpusculaire aujourd'hui ; seulement, les savants du XVIII^e siècle, humanistes, s'astreignaient à un effort que les chercheurs du XXI^e, plus techniciens, préfèrent éviter.

Quant à nous, précautionneux, gardons-nous d'approuver comme de critiquer. Car, mine de rien, cela revient à trancher un problème de type poule/œuf. C'est, bien sûr, parce que l'envie d'expliquer aux autres est déjà là que naît la possibilité de le faire. Et c'est, bien sûr, parce que la possibilité d'expliquer aux autres est déjà là que naît l'envie de le faire. Contentons-nous de profiter du bon côté de l'histoire : l'insécurité a diminué dans nos rues, puisque l'innocent citoyen peut désormais s'y promener sans plus craindre d'être harponné par un savant qui ne le lâchera pas tant que son message n'aura pas été compris.

La preuve par neuf et plus

Lorsque la mode était à enseigner les sept preuves de l'existence de Dieu, certains esprits forts – et néanmoins avisés – rétorquaient que, si ces preuves étaient vraiment décisives, une seule suffirait largement : à trop vouloir prouver...

Révérence gardée, on retrouve à peu près la même idée dans des romans policiers. Résumons. Les soupçons se sont focalisés sur un individu ; les explications convaincantes pour lesquelles il aurait commis le meurtre prolifèrent. Vient alors le moment inéluctable où le détective songe : « Tout cela fait trop de bonnes raisons, donc aucune n'est la bonne. » Suite à quoi, bien entendu, il découvre que le coupable, en effet, n'est pas celui que « tout accusait ».

Commune aux esprits forts et aux détectives, cette observation éclaire d'un jour inquiétant le petit jeu, cher aux mathématiciens, qui consiste à multiplier les démonstrations différentes de certains résultats majeurs. Leur arsenal contient au moins dix démonstrations indépendantes du théorème fondamental de l'algèbre (*alias* théorème de d'Alembert), cinquante de la loi de réciprocité quadratique, trois cents du théorème de Pythagore... Abondance de biens ne nuit pas, dit-on. Voire... Pourquoi les mathématiciens seraient-ils logés à une autre enseigne que Dieu ou les assassins ? En s'acharnant à trouver une démonstration supplémentaire d'un résultat déjà connu, ils éveillent automatiquement la suspicion



non seulement sur la pertinence des démonstrations précédentes, mais encore sur la véracité du résultat ! S'il était vrai, éprouveraient-ils ce besoin impérieux de s'en convaincre par des voies si diverses ?

Osons le dire : plus nombreuses sont les démonstrations du théorème de Pythagore, plus il devient douteux. Et, par conséquent, plus il devient urgent d'en proposer enfin la démonstration !

Nous, les hommes d'appareils

Quand j'ai besoin d'une photocopie, la dernière chose à quoi j'ai envie de m'intéresser, c'est le photocopieur. Je veux seulement qu'il me suffise d'appuyer sans réfléchir sur un bouton. Autrement dit, plus le photocopieur offre de fonctions différentes – dont les programmes complexes me font perdre mon latin et mon temps alors que je n'ai qu'un désir : avoir vite ma photocopie – moins bien il remplit sa fonction. Que les fabricants de photocopieurs le sachent une fois pour toutes : ils sont les seuls à s'intéresser à leurs appareils ! De même, désirer manger un poulet ou écouter de la musique ne signifie pas que je m'intéresse à la programmation des fours micro-ondes ou à celle des lecteurs de CD. Le but d'une technique est de s'effacer derrière la fonction qu'elle remplit.

De ce point de vue, Internet est exemplaire de ce qu'il ne faut pas faire – et que les objets techniques ne font que trop souvent. Il devrait aider à trouver le renseignement dont on a besoin, et s'en tenir là. Plût au Ciel ! L'envahissante manie du surf montre que, loin de s'effacer, Internet s'impose à la place de la fonction qu'il est supposé remplir. On y va non pour chercher un renseignement, mais pour surfer. Surfer, pourquoi ? Mais, pardi, pour surfer, c'est tout ! Ce serait désolant si ce moyen qu'est Internet réussissait définitivement à se faire passer pour un but.



Matyo



Diabolique équilibre

IVAR EKELAND

En politique, qui veut faire l'ange fait la bête : il faut faire avec des diables dont les pouvoirs équilibrés concourent au bien commun.

Du temps du regretté André Franquin, j'étais un grand lecteur des aventures de Spirou et de Fantasio. Je me souviens particulièrement d'un album intitulé *Le prisonnier du Bouddha*, où ils portaient à la rescousse d'un savant américain, prisonnier de la Chine de Mao. Au terme d'incroyables péripéties, ils parvenaient à leurs fins, et celui-ci déclarait à ses sauveurs : «Je savais on trouver deux gars courageux pour venir me délivrer.» Fantasio lui répondait, d'un air désabusé : «Non, on n'en a pas trouvé. Alors c'est nous qui sommes venus avec la pétouche.»

Il y a là une leçon : en matière humaine, il faut faire avec ce qu'on a. Un journaliste de *The Economist*, commentant l'élection présidentielle américaine, prône le même précepte : «Les Américains savent que les anges n'existent pas, et qu'il faut mettre des diables qui se surveillent mutuellement.»

Comme c'est vrai ! S'il y avait des anges parmi nous, comme la politique serait facile ! On en mettrait un à la présidence de la République, un autre Premier ministre, un troisième président du Conseil constitutionnel, et les choses iraient certainement beaucoup mieux. Allons plus loin : aurions-nous besoin d'une constitution et d'une république ? Si nous avons un ange à la tête de l'État, la monarchie absolue est le régime qui convient : que souhaiter de mieux qu'un monarque bienveillant et omniscient ? Ce despote parfaitement éclairé gérerait au mieux les affaires communes, ayant en vue notre intérêt et non le sien, et nous pourrions vaquer aux nôtres en toute tranquillité.

Malheureusement, il n'y a pas d'anges, il n'y a que des diables. Les diables ne sont pas tous pareils, il y en a qui sont bêtes et il y en a qui sont malins, il y en a de plus méchants que d'autres, mais il n'y a que des diables. Cessons de nous lamenter que les hauts personnages de l'État ne soient pas des anges et en faisons journellement la preuve : ils ne sont ni meilleurs ni pire que nous. Le meilleur mode de gouvernement ne consiste donc pas à chercher un ange, à le mettre à la

tête de l'État et à lui laisser les mains libres. Procéder ainsi serait éminemment dangereux, car les diables voudront se faire passer pour des anges, et quand nous les aurons mis en place il sera trop tard pour réparer notre erreur. Quand nos hommes politiques dissertent sur la réforme de l'État et réclament «une autre politique», je vois des diables tout noirs, affublés d'une robe blanche et d'ailes emplumées, chanter les mérites de la vertu. Celle-ci ne viendra pas d'une conversion, mais d'une contrainte : il faut que les diables aient intérêt à être vertueux.

Aussi, dans le meilleur mode de gouvernement, chaque diable est surveillé par un autre diable qui trouve un intérêt personnel à dénoncer ses diableries. Nous en avons une illustration dans le scénario institutionnel qui a conduit à l'élection de Georges W. Bush : entre les candidats, les institutions de Floride et la Cour suprême des États-Unis, il n'y avait certainement personne que l'on puisse qualifier d'ange, ou même qui ait fait preuve d'un minimum d'impartialité.

La beauté de la constitution américaine est qu'elle a fait intervenir beaucoup de diables différents, chacun avec ses propres intérêts : on peut espérer que cette diversité d'interventions et d'intérêts donne un résultat final pas trop éloigné de celui qu'aurait décidé un observateur omniscient et désintéressé. Le diable particulier nommé Georges W. Bush ne pourra guère profiter de son avantage : il a suscité trop d'animosité chez ses adversaires, qui ont conservé trop de pouvoir pour ne pas lui faire payer cher ses écarts, et cela a déjà commencé.

Concevoir l'organisation de l'État comme une pyramide où les informations montent de la base vers le sommet, et où les décisions prennent le chemin inverse, aboutit nécessairement à ce que l'État soit géré au profit de ceux qui occupent le sommet. Il faut au contraire concevoir l'organisation de l'État comme un jeu, où divers groupes se voient attribuer des rôles, et dont les règles sont conçues pour que l'intérêt de chacun des groupes soit de

contraindre les autres à jouer le rôle qui leur est assigné. C'est ainsi que Montesquieu identifie trois pouvoirs, le législatif, l'exécutif et le judiciaire, et prend soin qu'ils soient exercés par des groupes différents, chacun limitant l'action de l'autre : c'est le fameux «équilibre des pouvoirs», dont la constitution des États-Unis nous donne le plus bel exemple, alors que les Français continuent à s'imaginer que les gouvernants sont bons, soucieux de l'intérêt public, et qu'il faut donc leur faciliter la tâche.

Toutes ces idées peuvent aujourd'hui être formalisées à l'aide des outils mathématiques issus de la théorie des jeux. Les économistes français de l'École de Toulouse, reprenant la grande tradition de Montesquieu, se sont illustrés dans cette voie, et je renvoie ceux qui ne craignent pas les mathématiques au livre récent de Jean-Jacques Laffont. Ils retrouvent ce faisant nombre d'économistes plus anciens, qui avaient déjà pressenti ces principes de gouvernement et en avaient tiré des conclusions pratiques.

Examinons un exemple : c'est par méfiance des décideurs qu'Adam Smith, dès 1776, recommande de financer la construction des voies de communication par des péages prélevés sur les utilisateurs plutôt que par les fonds publics. Il sait très bien que, d'un strict point de vue économique, il serait plus avantageux que tout soit financé par l'impôt, ou à la rigueur que l'on finance la construction par l'impôt et l'entretien par les péages. Mais, dit-il, on court alors le risque qu'une grande route magnifique ne soit construite à travers une région déserte où il n'y a guère ou pas de commerces, simplement parce qu'elle mène à la résidence de campagne de l'intendant de la province, ou de quelque grand seigneur auquel l'intendant juge opportun de faire sa cour. Un ouvrage d'art pourrait être construit au-dessus d'un fleuve, à un endroit où personne ne passe, simplement pour embellir la vue des fenêtres de quelque château voisin.

Les diables sont éternels, et ceux d'Adam Smith sont toujours parmi nous.

TRIBUNE DES LECTEURS

Les deux arithmétiques

L'article de Patrick Dehornoy (voir *Pour la Science*, décembre 2000) appelle une remarque. Pris ensemble, les théorèmes de Goodstein et de Kirby-Paris semblent contredire le théorème de complétude de Gödel. En effet, si le théorème de Goodstein était valide dans tous les modèles de l'arithmétique ordinaire, c'est-à-dire dans la théorie du premier ordre fondée sur les axiomes de Peano, il admettrait une preuve dans cette théorie. C'est ce qu'exclut le théorème de Kirby-Paris.

L'explication de ce paradoxe est la suivante. La démonstration de Goodstein requiert l'emploi des ordinaux. Or ceux-ci interviennent dans la description d'un modèle unique M de l'arithmétique au sein d'un modèle univoquement choisi E de la théorie des ensembles. M est l'ensemble des ordinaux qui précèdent le premier ordinal limite ω . Mais il existe dans E une infinité de modèles de l'arithmétique ordinaire. Le théorème de Goodstein est valide dans M , mais il est non valide dans un autre modèle au moins de l'arithmétique dans E . Autrement dit, l'énoncé de Goodstein est un théorème dans une théorie arithmétique plus exigeante que l'arithmétique de Peano.

Il existe donc deux théories arithmétiques. La première comporte les théorèmes «ordinaires» qui ne découlent que des axiomes du premier ordre de Peano. La seconde comporte en outre des théorèmes qui requièrent toute la force de la théorie des ensembles et qui ne sont pas valides dans l'arithmétique de Peano. C'est le cas du théorème de Goodstein.

Le théorème de Goodstein ne peut pas être substitué au premier théorème d'incomplétude de Gödel. Il ne donne pas un théorème prouvant l'existence, dans l'arithmétique de Peano supposée consistante, d'une formule dont on ne peut prouver ni qu'elle est vraie ni qu'elle est fausse. Il montre qu'il existe, dans la théorie des ensembles, des théorèmes d'arithmétique qui ne sont pas valides dans l'arithmétique de Peano. Il est intéressant d'observer l'irruption de théorèmes non banals de logique mathématique dans un domaine mathématique qui semble à l'abri de telles intrusions.

André DELESSERT, Lausanne

Réponse de Patrick Dehornoy

La remarque d'André Delessert est tout à fait juste. Les théorèmes de Goodstein et Kirby-Paris ne se substituent en aucun cas au théorème de Gödel, et ils ne le redémontrent pas non plus : ce qu'ils font est

d'illustrer de façon simple la situation d'incomplétude décrite par le théorème de Gödel.

Parler de deux arithmétiques ne doit pas abuser le lecteur : il ne faudrait pas imaginer que l'arithmétique de la théorie des ensembles s'oppose à celle de Peano ; les deux s'accordent sur ce qui constitue tout le noyau central des mathématiques et, justement, il faut aller chercher des bizarreries comme le théorème de Goodstein pour les séparer.

Un tunnel alpin

Dans l'article sur les tunnels alpins (voir *Pour la Science*, février 2001), les auteurs semblent ignorer le percement au XV^e siècle, sous la crête frontière de partage des eaux, entre la haute vallée du Pô et le Queyras, du tunnel, nommé Perthuis du Viso, à côté duquel le premier percement signalé dans l'article en 1707 dans une gorge est bien modeste.

L'étude de Louis Vaccarone *Le Perthuis du Viso*, qui se réfère à des documents du XV^e siècle, reprise dans l'ouvrage *Le Queyras*, écrit par le Général A. Guillaume et édité par la Société d'études des Hautes-Alpes, apporte quelques compléments d'informations.

Ainsi, «avant son percement, le transport des marchandises de France vers le marquisat de Saluces et vice versa, exigeait un voyage long et pénible».

«Louis, Marquis de Saluces, pensa qu'il était possible d'ouvrir à travers le Viso une galerie qui offrirait une route plus commode, plus courte devant activer le commerce entre la France et le marquisat, surtout celui du sel de Provence.»

«Des ingénieurs procédèrent aux études nécessaires. C'est ainsi que fut prise la décision d'ouvrir, sous le col de la Traversette, un tunnel.»

«Antonio Ferrero di Borgo Alice fut envoyé auprès du Parlement de Grenoble au mois de juin 1475 pour lui exposer la décision prise par le Marquis Louis de Saluces dont il était le conseiller.»

«Le parlement de Grenoble, ayant peu de confiance dans les chances d'une telle entreprise, ordonna aux auditeurs de la Chambre du Dauphiné de prendre des informations secrètes à son sujet.»

«Les quatre auditeurs désignés répondirent, après avoir prêté serment, qu'ils connaissaient le mont Viso ; qu'il était possible de percer cette montagne au grand avantage du Roi Dauphin Louis, du Marquis de Saluces, de leurs sujets et de tous les voyageurs en général.»

«La galerie était livrée à la circulation à la fin de 1480. Le Marquis de Saluces annonça cette heureuse nouvelle au Roi de France au mois de février 1481.»

Il y a quelques années, ce tunnel a été remis en état surtout par des bénévoles, notamment du Club alpin français local. Il n'a pas été utilisé bien longtemps, mais il est peut-être le plus ancien tunnel des Alpes.

Claude LABRE, Embrun

Des noms d'oiseaux

Dans son article sur la laideur des noms de plantes (Voir *Pour la Science*, février 2001) Didier Nordon ne va pas au bout du problème. Le Français a oublié le nom de ses plantes, et il y en a de merveilleux. On en trouve en nombre dans la Flore illustrée de France de Bonnier. Tous les noms cités ne sont que des noms scientifiques récemment inventés et qui sont utilisés en français, souvent à la place de mots que l'on pourrait trouver dans les parlers régionaux. C'est un manque total de curiosité et de culture qui a conduit les biologistes français à ignorer totalement le vocabulaire magnifique et très riche de leur langue pour lui substituer un artificiel jargon élitiste hermétique. À l'inverse, l'Allemand a conservé un riche vocabulaire de noms de plantes.

Pour les oiseaux, les premiers ornithologues ont souvent su trouver dans les parlers régionaux des noms pour désigner les espèces qui n'étaient pas connues dans la région de Paris, où se faisait la plupart des travaux scientifiques. Ainsi, chocard, crave, mauris, tarin, bruant, même s'ils ne désignent plus les espèces auxquelles ils se rapportaient, survivent-ils encore. À part troglodyte, tichodrome, œdicnème, percnoptère, et quelques autres espèces affublées de noms scientifiques, les oiseaux européens sont-ils désignés par des noms français. À cet égard, nous essayons de faire connaître le travail de Michel Deshayes sur l'origine des noms d'oiseaux.

Il est bien entendu beaucoup plus difficile de s'y retrouver pour le nom des plantes, car d'une région à l'autre, il peut désigner des espèces différentes. Ce qui a manqué, c'est une autorité qui aurait eu l'audace de proposer une liste des noms français pour les plantes, différente de la liste des noms scientifiques. Peut-être n'est-il pas trop tard.

Jean-Claude PRAZ, Sion (Suisse)

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.



Allergies alimentaires

HERVE THIS

Comment prévoir et prévenir les risques d'allergie aux aliments transgéniques.

Au pays de la gastronomie, tout n'est que fumets, goûts, plaisirs... Pourtant, plus du quart de la population, dans sept États de l'Union européenne, se dit sujette à des allergies ou à des intolérances alimentaires. Quand on confirme le diagnostic par des tests cliniques, on mesure que les véritables allergies alimentaires sont moins nombreuses qu'elles ne sont déclarées (environ 3,5 pour cent de la population), mais elles posent un important problème de santé publique, car la gravité des accidents observés augmente : depuis dix ans, le nombre de chocs anaphylactiques consécutifs à une allergie alimentaire a quintuplé, et beaucoup de ces accidents sont mortels, notamment ceux qui sont provoqués par l'ingestion de produits dérivés de l'arachide. Au Laboratoire d'immuno-allergie alimentaire INRA-CEA, à Saclay, Jean-Michel Wal et ses collègues ont notamment montré comment une protéine du lait de vache provoque des allergies, malgré ses ressemblances avec une protéine humaine qui, elle, est parfaitement tolérée. Les biologistes de l'INRA explorent également, chez l'animal, une méthode d'«immunisation génique» pour prévenir les allergies.

Pourquoi l'accroissement récent des allergies alimentaires ? L'augmentation du nombre d'aliments incriminés semble liée au développement des allergies respiratoires dues aux pollens des végétaux : les anticorps produits par l'organisme contre un antigène de pollen réagissent parfois aussi contre des molécules d'origines très différentes. Ces «réactivités croisées» sont dues à des épitopes communs, c'est-à-dire à des fragments moléculaires analogues, qui sont la cible du système immunitaire. Ce type de phénomène explique comment la multiplication des allergies aux fruits exotiques (avocats, kiwis, bananes...) peut être associée au développement des allergies au latex, elles-mêmes en augmentation.

À ces aliments «classiques», s'ajoutent les aliments dérivés des organismes génétiquement modifiés. Ces produits contiennent des protéines normalement absentes des aliments classiques et la question s'impose avant la com-

mercialisation : sont-ils allergéniques ? Peu de cas ayant été rapportés jusqu'ici, comment déterminer leur allergénicité ? Plusieurs approches sont aujourd'hui envisagées : tests à l'aide de sérums de patients allergiques (les anticorps de ces sérums se lient aux molécules allergéniques), tests cutanés (on dépose les molécules soupçonnées sur la peau afin de détecter une éventuelle réaction allergique), études avec des animaux (on administre les molécules soupçonnées à des animaux sensibilisés) et prévision théorique de l'allergénicité à partir de la séquence des protéines en acides aminés.

Cette dernière voie est d'avenir, mais sa mise en œuvre doit être préparée par l'établissement de banques de données de séquences bien caractérisées, pour des protéines dont on connaît l'allergénicité. Grâce à de telles banques, J.-M. Wal et ses collègues ont comparé la réactivité immunitaire de la caséine bêta humaine et de la caséine bêta bovine.

Les caséines constituent 80 pour cent des protéines du lait. Elles sont de quatre types nommés alpha S1, alpha S2, bêta et kappa. La caséine bêta du lait de vache est un allergène important : 92 pour cent de sérums provenant de personnes allergiques aux caséines contiennent des anticorps responsables des réactions allergiques, les immunoglobulines E, spécifiquement dirigées contre la caséine bêta.

En 1997, les immunologistes de Saclay avaient démontré l'existence, dans le sang de personnes allergiques, d'immunoglobulines E spécifiques d'une protéine du petit lait bovin, et ils avaient observé que ces immunoglobulines E réagissent également avec la protéine correspondante humaine. Ce même type de réactivité croisée existait-il pour la caséine bêta ? Les immunologistes ont récemment testé le sérum de 20 personnes allergiques à la caséine bêta de lait de vache. Ils en ont dosé les immunoglobulines E spécifiques de la caséine bêta bovine et ils ont ensuite vérifié que ces immunoglobulines réagissent également avec les caséines bêta humaines.

Pourquoi ces réactions croisées ? Parce que les caséines bêta humaine et bovine ont en commun 50 pour cent de leurs acides aminés. D'où l'intérêt d'étudier les parties communes. Un des domaines communs, par exemple, correspond à une séquence en acides aminés qui se replie en hélice dans les protéines bovines et humaines. Un autre domaine commun contient les principaux «sites de phosphorylation» : après l'enchaînement des acides aminés qui constitue les protéines, ces dernières sont modifiées, notamment par addition de groupes phosphate (c'est la phosphorylation). De telles modifications chimiques «post-traductionnelles» influencent les propriétés des molécules, en changeant leur charge électrique ou leur repliement. Les immunologistes de l'INRA ont montré que la phosphorylation du second domaine influe sur l'allergénicité de la caséine bêta.

Ace jour, les études qui préparent les évaluations des nouveaux aliments dérivés d'organismes génétiquement modifiés ou contenant de tels organismes n'ont pas révélé d'allergénicité particulière. Ces études s'accompagnent d'une recherche de méthodes de prévention des allergies alimentaires. Dans le cas de la caséine bêta, les substitutions de lait sont inefficaces, car les caséines des divers laits sont très semblables. Le groupe de Saclay préfère aujourd'hui tester (chez la souris) l'immunisation génique, c'est-à-dire l'injection d'ADN d'origine bactérienne, où ils introduisent l'ADN codant une protéine étudiée : une telle injection apporte des séquences qui activent une réaction du système immunitaire de type non allergique, laquelle «éteint» la réaction allergique. Dans le cas d'une telle prévention contre les allergies à la bêta lactoglobuline bovine (une autre protéine du lait de vache), la méthode réduit considérablement et durablement la production d'immunoglobulines E spécifiques de cette protéine.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 27 mars 2001, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Galápagos : une marée noire révélatrice

CHRISTOPHE GRENIER

La marée noire qui a souillé les Galápagos a nuí davantage à l'image de l'archipel qu'à son environnement, déjà menacé par une gestion économique et politique désastreuse de ce qui devait être une précieuse réserve naturelle.

Vendredi 27 mars 2003

La mort de quelques oiseaux de mer, iguanes et otaries sur des côtes souillées par le pétrole a mis à mal le mythe d'un «paradis» situé dans un archipel de l'océan Pacifique. Cette légende a été élaborée par les responsables de la conservation de ces îles pour y conforter leur action, et par les entreprises de tourisme. En fait, cet événement révèle une menace plus réelle pour la singularité de cet archipel : son ouverture croissante sur le reste du monde. L'isolement de ces îles, qui avait permis, par spéciation géographique, la sélection d'espèces animales et végétales caractéristiques des Galápagos, a tellement diminué en trois siècles de fréquentation, d'exploitation et de peuplement, que l'archipel est plus un espace ouvert qu'un sanctuaire naturel.

Paradoxalement, cette ouverture s'accélère depuis la création, en 1959, du Parc national des Galápagos sur 97 pour cent de l'archipel, le reste étant laissé aux habitants, répartis sur quatre îles, et aux militaires. En 1968, les premières croisières touristiques sont organisées aux Galápagos, qui deviennent la vingtième province équatorienne en 1973 (ce qui y

autorise la libre immigration des Équatoriens), et où le premier vol commercial se pose en 1975 sur la piste construite par les Américains en 1942. En 1974, alors que l'archipel compte 4 000 habitants et accueille 8 000 visiteurs, le premier plan de gestion du Parc national des Galápagos impose un quota de 12 000 touristes par an, calculé d'après un nombre limité (14) de concessions de bateaux de croisière et de places (300) à bord. L'année suivante, le deuxième plan prétend restreindre les migrations vers l'archipel. En vain : en 1982, 6 200 personnes vivent aux Galápagos, visitées par 18 000 touristes ; en 1984, le troisième plan admet 25 000 visiteurs par an, au maximum ; en 1990, l'archipel compte 9 800 habitants et reçoit 40 000 touristes, chiffres qui ne cessent de croître, puisqu'en 2000, la population est estimée à 20 000 âmes, et que près de 70 000 visiteurs s'y sont rendus.

La crise écologique des Galápagos tient à la contradiction entre leur isolement originel, que le parc national est censé préserver, et leur ouverture croissante au marché mondial et équatorien. Six difficultés découlent de ces deux aspirations inconciliables : la forte croissance démographique, un tourisme inadapté, un accès trop facile, une pêche dévastatrice, une conservation mal conduite, une impuissance des institutions qui, parfois, profitent de la situation.

La population insulaire augmente très vite, par immigration d'Équatoriens souvent chassés du continent par la misère et attirés aux Galápagos par l'État, le tourisme, la pêche d'exportation ou des réseaux communautaires. Les pouvoirs publics ne peuvent limiter les impacts écologiques de cette croissance démographique : elle entraîne une détérioration des conditions de vie des «Galápagueños», que les immigrés concurrencent en matière d'emplois et de salaires.

Cet afflux de population se traduit par l'importation massive d'aliments, de combustibles, de véhicules et de matériel de construction, qui produisent toujours plus de déchets et de pollution dans le parc.

À cette forte croissance démographique, s'ajoute un tourisme débridé : aucun quota de visiteurs ou de bateaux de croisière n'a été respecté (on a atteint 90 bateaux totalisant 1 600 places, en 1996). Depuis 1991, l'État, conseillé par la Fondation Darwin, l'organisation non gouvernementale internationale créée en 1959 pour veiller à la conservation des Galápagos par le biais de la Station biologique du même nom, a renoncé aux quotas au profit de la politique dite du «tourisme sélectif» ; cette politique visait à réduire le secteur touristique local, afin de décourager les migrants de venir y travailler. Cela a accéléré la mainmise des entreprises continentales sur le marché des Galápagos, où elles possèdent 90 pour cent des places à bord des bateaux de croisière.

De surcroît, les bateaux abordent peu les bourgades de l'archipel, ce qui prive leurs habitants de revenus. Enfin, ce tourisme dénature l'archipel en le banalisant : on «consomme» ces îles comme n'importe quel autre lieu. Les touristes ne restent en moyenne que quatre jours dans l'archipel, utilisent des bateaux rapides et de fort tonnage (jusqu'à 100 lits) qui dépensent de grandes quantités d'énergie pour relier divers sites de visite dans tout l'archipel. Une rotation rapide de la clientèle garantit des profits élevés. Le pétrolier Jessica alimentait en carburant l'un de ces paquebots pour visiteurs pressés.

La croissance démographique et l'augmentation incontrôlée du tourisme nécessitent de meilleurs transports entre l'Équateur continental et les Galápagos : en 1986, un deuxième aéroport y a été inauguré, un troisième en 1995. Tandis

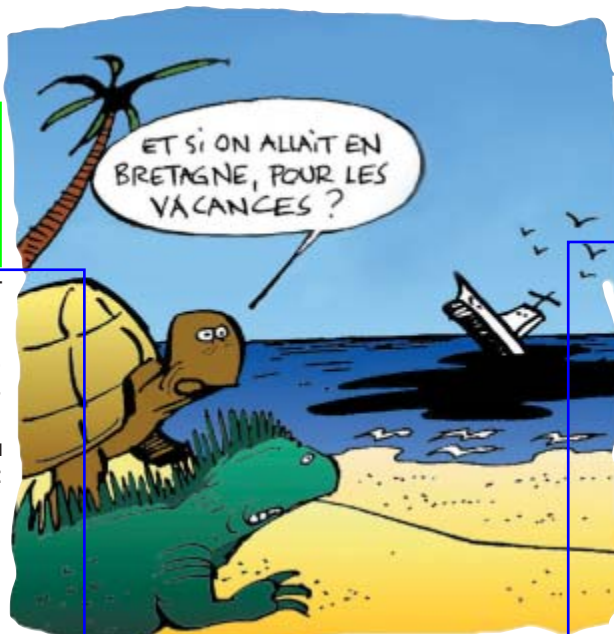


qu'en 1975, l'archipel était desservi par un avion par semaine et par un cargo qui accostait tous les trois mois, on compte aujourd'hui quatre avions par jour et quatre cargos par mois.

La déficience de la quarantaine phytosanitaire symbolise le peu de cas que les autorités font de cette ouverture synonyme de développement. L'accessibilité croissante des Galápagos se traduit par l'explosion du nombre d'espèces introduites : près de 500 espèces de plantes continentales y étaient recensées en 1998, contre une trentaine dans les années 1940. Certaines espèces, telles que les chèvres ou les arbres à quinine, représentent une grave menace pour les écosystèmes insulaires, mais semblent impossibles à éradiquer. On pratique alors une conservation *ex situ*, c'est-à-dire que l'on prélève, par exemple, les œufs ou les jeunes tortues menacées, on les transporte sur un site d'élevage, on les élève en captivité et, quand les tortues sont devenues adultes, on les réimplante dans leur île d'origine. La conservation *ex situ* au sein d'un parc censé protéger la nature *in situ* pourrait être l'aveu de l'échec de la conservation du Parc national des Galápagos, mais la Station Darwin en tire une notoriété médiatique garante de dons financiers.

Les dégâts en mer n'ont rien à envier aux dommages sur terre. Bien que la Réserve de ressources marines des Galápagos, créée en 1986, n'autorise que la pêche artisanale dans les eaux de l'archipel, celles-ci sont soumises à une pêche de type minier, où les «gisements» de langoustes, de requins et d'holothuries, destinés à l'exportation, sont exploités jusqu'à leur épuisement. Cette pêche est surtout pratiquée par les habitants d'Isabela et de San Cristóbal (deux îles peu touristiques) et par de nouveaux migrants attirés par l'argent vite gagné. Elle se fait en liaison avec de grosses entreprises équatoriennes et étrangères, dont les chalutiers et les bateaux usines restent au large et sont approvisionnés par de puissants canots (quand ils ne s'aventurent pas eux-mêmes dans la réserve!).

La pêche intensive cause de gros dégâts écologiques marins, littoraux et terrestres : les chaînes trophiques sont désorganisées par la surpêche, et les campements de pêcheurs s'accompagnent de la dévastation des mangroves, dont le bois sert à fumer les holothuries, et de l'introduction de graines, d'insectes et de rats dans des écosystèmes très fragiles. Partagé entre plusieurs groupes de



pression qui se partagent la rente des Galápagos, l'État tergiverse : la marine et les entreprises de pêche estiment que les étrangers ne sauraient faire la loi dans une province équatorienne, tandis que les entreprises de tourisme et les conservationnistes jugent cette pêche incompatible avec l'image internationale du Parc.

Des quotas sont accordés aux pêcheurs, mais ils ne sont pas plus respectés que ceux du tourisme. Lorsque l'on rappelle les limites autorisées, on déclenche parfois de violentes réactions : en 1994, 80 tortues terrestres ont été massacrées, à Isabela ; en 1995, une grève insurrectionnelle s'est déclenchée dans tout l'archipel, et les locaux du Service du parc national des Galápagos et de la Station ont été occupés ; en 2000, des locaux de la Station et du Service du parc national ont été incendiés, et les aéroports occupés.

La conservation des Galápagos a été mise en œuvre par des naturalistes et pour eux. Ils veulent en faire des «îles pour la Science», mais la Station leur a surtout servi de base pour des recherches sans applications conservationnistes. La Fondation Darwin s'est contentée de mettre en place des programmes «éducatifs» pour la population locale, qu'elle n'a jamais su – ni jamais voulu – intéresser économiquement à la conservation. Si cette organisation combat la pêche d'exportation qui fait vivre de nombreux insulaires, elle a tissé des liens étroits avec des entreprises de tourisme continentales... dont les clients lui allouent des dons. Dès lors, le sentiment que le Parc est réservé à l'usage des étrangers (les touristes et les naturalistes) se répand dans une population qui se plaint d'être moins considérée que les animaux. La Fondation est perçue par nombre d'habitants comme la représentante des parties adverses, dont

elle légitime «scientifiquement» l'usage d'un Parc devenu un territoire disputé, voire contesté.

Malgré, ou plutôt à cause d'une pléthore d'administrations équatoriennes dans l'archipel, de huit plans d'aménagement des Galápagos en 25 ans, d'une importante aide internationale et d'innombrables lois visant à protéger le Parc national des Galápagos, cette protection est loin d'être assurée : ce «panjuridisme» est synonyme de laisser-faire. La conservation des Galápagos n'a jamais été une priorité de l'État équatorien, qui consacre l'essentiel des dépenses publiques au développement de la province insulaire. Les bateaux du Service du parc national des Galápagos et de la Marine ne patrouillent pas régulièrement dans tout l'archipel, par manque de moyens ou à cause de l'argent corrupteur du tourisme et de la pêche. Quant à l'UNESCO, si elle a fait des Galápagos l'un des premiers patrimoines de l'humanité, elle reconnaît la pleine souveraineté des États sur ces sites classés. Elle est incapable d'arrêter la dégradation de ces îles, comme le savent bien les gouvernements équatoriens auxquels se rient des timides reproches qui sont proférés à leur égard et ne sont jamais suivis d'effets.

La conservation des Galápagos n'aura lieu que si l'on parvient à limiter les flux qui y entrent (les touristes, les immigrants et les espèces animales et végétales) et qui en sortent (les produits de la mer). Cela ne suffira pas : la population doit pouvoir vivre décemment aux Galápagos en y conservant la nature, ce qui impliquera une modification des modes de vie et un changement du système touristique. Enfin, cette conservation ne sera assurée que si elle est mise en œuvre par des autorités publiques locales, nationales et internationales. Celles-ci devront disposer des moyens financiers, techniques et humains indispensables, mais aussi du pouvoir politique nécessaire pour faire respecter les lois qui garantissent la conservation.

La marée noire du Jessica peut faire prendre conscience à la communauté internationale que les Galápagos sont devenues un lieu commun, soumis à un type d'exploitation économique à courte vue. Peut-être y mettra-t-on alors en œuvre une politique de conservation de la nature, qui ferait preuve de plus d'imagination et de fermeté, et qui serait plus efficace que la politique en vigueur depuis 40 ans.

Christophe GRENIER est géographe à l'Université de Nantes.



La recherche publique sur les OGM

DANIEL NAHON

Le principe de précaution impose à la recherche publique d'étudier les possibilités et les dangers des organismes génétiquement modifiés.

La transformation génétique des plantes cultivées et la possibilité de leur utilisation en agriculture suscitent interrogations et inquiétudes. Ces interrogations sont légitimes et partagées par les chercheurs. Toutefois, l'expression de ces inquiétudes n'est pas acceptable quand un militantisme amalgame, dans une même condamnation sans nuance, les difficultés des exploitants agricoles, le commerce international et sa régulation, la politique des grandes entreprises privées, le progrès scientifique et ses applications. Cette confusion occulte les véritables enjeux, le rôle et les missions de la recherche publique.

La génomique est un outil d'analyse scientifique qui ouvre de nouveaux champs à la recherche en physiologie et en écologie. Elle améliore l'efficacité de la sélection classique et obtient plus rapidement des plantes hautement performantes sans avoir, précisément, à les modifier par génie génétique. Mener, dans des conditions d'expérimentation encadrées, des recherches sur les plantes «transgéniques», ce n'est pas les exploiter à grande échelle ou les répandre de façon inconsidérée dans l'environnement.

Si les interrogations ne manquent pas sur la nature et la probabilité des risques liés à la généralisation éventuelle de plantes génétiquement modifiées, d'autres questions tout aussi fondamentales se posent. Pouvons-nous affirmer que l'agriculture biologique représente, dans nos pays, une alternative réaliste au mode actuel d'exploitation intensive, même si nous n'en ignorons pas les limites ? Sommes-nous certains que l'agriculture industrielle qui utilise massivement les pesticides soit porteuse de moins de risques, pour l'environnement ou la santé des consommateurs, que des plantes plus rustiques qui se défendraient seules contre un certain nombre de maladies ou de prédateurs ?

Enfin, qui peut assurer que le génie génétique ne sera pas capable demain

d'apporter des éléments de solution aux problèmes d'aujourd'hui ?

La France ne peut abandonner une bonne partie de ses ambitions scientifiques, économiques, culturelles et politiques. Interrogeons-nous : le XXI^e siècle ne serait-il pas, comme le croient la plupart des analystes, celui des biotechnologies ? Et si demain ou après-demain, la transformation génétique s'imposait dans les principaux pays agricoles de la planète ? Nos successeurs ne seraient-ils pas fondés à nous reprocher notre pusillanimité et notre refus de développer les compétences qui nous auraient permis, soit de freiner des évolutions fâcheuses, soit de profiter pleinement d'un nouveau moteur de croissance de l'économie ?

L'un des premiers devoirs de la recherche publique n'est-il pas le devoir d'anticipation ? L'une de ses premières missions n'est-elle pas d'envisager le champ du possible, d'être présente sur le front de l'avancée des connaissances et d'explorer l'intérêt potentiel à long terme des nouvelles découvertes ? N'est-ce pas ainsi, et seulement ainsi, qu'elle pourra mieux apprécier les risques associés à l'usage des plantes transgéniques et valider leur intérêt supposé ou, au contraire, en justifier l'interdiction ?

S'il ne revient pas aux experts de décider des questions de société, ils demeurent irremplaçables pour limiter les marges d'incertitudes et constituer un garde-fou contre les intuitions parfois trompeuses. Par des expérimentations rigoureuses et soumises à la critique, ils apportent certaines réponses, ne serait-ce que partielles. Les organismes publics de recherche fournissent aussi une contre-expertise objective pour éviter que l'étude des risques ne soit laissée aux seuls soins des intérêts privés. Ils aident les hommes politiques à assumer leurs responsabilités de décision et leur fournissent des arguments de négociation précieux dans les enceintes internationales.

Compte tenu de l'ampleur des moyens à mettre en œuvre et des résultats déjà

acquis par le secteur privé, les organismes publics de recherche en biologie ne peuvent se dispenser de coopérer avec les entreprises. Mais, ce n'est pas parce que la recherche publique travaille avec le secteur privé qu'elle s'éloigne pour autant de sa mission et de ses valeurs.

Le principe de précaution, dont se prévalent à juste titre les opposants les plus déterminés aux expérimentations sur les OGM, implique-t-il d'arrêter toute recherche ? Serait-il raisonnable d'attendre qu'un risque soit avéré pour l'affronter ? En cherchant à nous prémunir contre des dangers potentiels, parfois irréalistes, gardons-nous de la politique de l'autruche qui nous ferait oublier les dangers qui nous menacent. Les chercheurs ne sont pas des apprentis sorciers. Ils savent qu'une extrême prudence s'impose pour extrapoler les résultats expérimentaux et passer du laboratoire à l'expérimentation à grande échelle, voire à l'industrialisation et à la diffusion commerciale.

Les enjeux liés aux biotechnologies concernent la société et les organismes de recherche s'adaptent aux besoins sociaux. Ceux qui cherchent à empêcher les établissements publics d'éclairer les choix se trompent de combat. Il est toujours dangereux pour la démocratie qu'une minorité, quelle que soit la sincérité de ses intentions, s'arroge le monopole de la légitimité et de l'intérêt général. Un débat citoyen sur ces questions doit se substituer aux actions violentes. La recherche publique, citoyenne, démystifiée, plus proche de la société y trouvera, n'en doutons pas, sa mesure et sa place.

N'est pas Don Quichotte qui veut, et si l'on peut comprendre les motivations des Luddites, l'histoire ne leur a pas donné raison.

Daniel NAHON est président du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

soit **4 € seulement par numéro** au lieu de ~~5,20 €~~

Pour consulter et télécharger
en toute liberté sur www.pourlascience.fr
les 12 prochains numéros
dès leur parution.



Oui, je m'abonne
à *Pour la Science* 100 % numérique
1 an (12 numéros) pour 48 €

Je préfère découvrir toutes
les offres d'abonnement disponibles
en cliquant ici.

Les biologistes coupent les cheveux en quatre

Ils découvrent les cellules souches du système pileux.

L'homme est un animal étrange qui, contrairement à la plupart des autres mammifères, n'a pas de pelage... à l'exception de ses cheveux dont les chauves regrettent amèrement la disparition. Comment pourrait-on empêcher les follicules pileux qui produisent les poils, les cheveux et les moustaches de se mettre au repos? Pourrait-on les stimuler chez les grands brûlés à qui l'on greffe une peau dépourvue de système pileux? Aujourd'hui, on sait préparer de la peau artificielle qui contient tous les éléments cellulaires de la peau normale : les cellules de l'épiderme et du derme superficiel, les mélanocytes responsables de la coloration et les cellules de Langerhans qui constituent les défenses cutanées. Il manquait encore un élément : le système pileux. Cette lacune devrait bientôt être comblée, puisque l'équipe de Yann Barrandon, à l'INSERM-École normale supérieure, à Paris, a localisé chez la souris les cellules souches capables de donner naissance à toutes les lignées de cellules épithéliales de la peau : les kératinocytes (les cellules de l'épiderme), les glandes sébacées, qui produisent le sébum, et les follicules pileux.

Les poils, les cheveux et les moustaches sont élaborés par les follicules pileux, des structures de l'épiderme ancrées profondément dans le derme sous-jacent. On dénombre ainsi quelque 50 follicules pileux par millimètre carré chez la souris contre cinq, environ, chez l'homme. Depuis quelques années, on les soupçonnait d'abriter des cellules souches, des cellules qui ont un fort potentiel de multiplication et qui sont responsables du renouvellement des tissus. Personne n'avait encore réussi à en localiser la source.

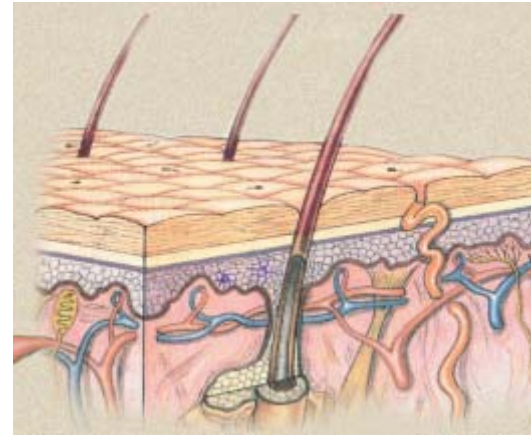
La clé de cette longue quête des cellules souches se trouvait dans les follicules pileux, qui ont la propriété de subir des cycles de croissance (une phase de pousse suivie d'une phase de régression, puis d'une phase de repos). Même si l'on avait découvert quelques cellules souches,

on ignorait où est localisée la vraie source de ces cellules. Pour le savoir, Y. Barrandon et ses collègues ont étudié des follicules de moustaches de souris. Ces follicules, plus gros que les follicules du pelage, mesurent environ deux millimètres, et jouent un rôle tactile important. Les biologistes ont sectionné en quatre morceaux plusieurs follicules, mis en culture des cellules prélevées sur chacun d'entre eux et observé que la majorité des cellules formatrices de colonies (environ 1 500 cellules) se trouvent au même endroit, dans une zone renflée de la partie supérieure du follicule. Pour préciser le rôle de ces cellules, ils ont alors effectué de la micro-chirurgie sur un follicule pileux de souris blanche : ils ont prélevé une partie de la zone «réservoir» potentielle et l'ont remplacée par un morceau identique prélevé sur une souris transgénique où tous les tissus se colorent en bleu en présence d'un réactif adapté. Plusieurs follicules «chimériques» ont ainsi été préparés et implantés sur des souris qui tolèrent bien les greffes de tissus étrangers. Les biologistes en ont prélevés à différentes périodes de leur développement et ont observé le devenir des «cellules bleues».

Au bout de quatre semaines, presque toutes les cellules souches sont encore dans la partie renflée du réservoir ; à huit semaines, elles essaient vers le haut et vers le bas ; à 10 semaines, les cellules parvenues dans la région du bulbe forment le poil qui remonte vers la surface, tandis que celles qui sont montées directement participent à la formation des glandes sébacées et de l'épiderme. Ainsi, au cours de leurs périodes respectifs, les cellules souches reçoivent des messages de différenciation différents, liés à l'environnement, sur leur parcours migratoire. Pendant la période de repos du cycle folliculaire, les cellules souches restent dans le réservoir ; pendant la phase d'activité du follicule, elles prolifèrent et migrent.

Une autre expérience a confirmé que les cellules souches adultes du réservoir

Les cellules souches de toutes les lignées de cellules épithéliales de la peau sont localisées dans une zone renflée de la partie supérieure du follicule pileux (en vert). Certaines cellules migrent (flèches en violet) directement vers le haut et participent à la formation des glandes sébacées et de l'épiderme. D'autres cellules descendent (flèches en marron) pour former le poil qui remonte vers la surface.



voir sont bien pluripotentes, c'est-à-dire capables de reconstituer, après différenciation, des cellules de l'épiderme, des glandes sébacées et des follicules pileux complets, matures et fonctionnels.

Les applications potentielles de cette découverte sont considérables. Sur le strict plan biologique, le système folliculaire constitue un terrain d'étude remarquable des mécanismes de contrôle de la migration et de la différenciation des cellules souches. Sur le plan médical, les domaines concernés sont multiples. L'équipe de Y. Barrandon va étudier la multiplication et la différenciation *in vitro* de ces cellules pluripotentes, et espère pouvoir ainsi reconstituer des peaux «artificielles» tout à fait comparables à la peau naturelle, avec des follicules pileux et des glandes sébacées. De plus, quand on aura identifié les facteurs de la différenciation des cellules souches en cellules épidermiques, on pourra aussi accélérer les mécanismes de cicatrisation.

Des études permettront aussi de mieux comprendre les phénomènes de cancérisation aboutissant à la formation de carcinomes cutanés, les cancers les plus fréquents chez l'homme, et de protéger les cellules souches lors d'une chimiothérapie. Peut-être parviendra-t-on à inhiber la pousse des poils ou, au contraire, à activer la repousse des cheveux. Enfin, cette découverte intéresse même les ophtalmologistes, car la peau et la surface de l'œil, la cornée, se ressemblent. La cornée est un tissu en renouvellement constant, mais qui peut dégénérer, voire subir des phénomènes de cancérisation. Parviendra-t-on à programmer des cellules souches de peau pour qu'elles se différencient en cellules de cornée que l'on pourrait greffer? C'est le prochain objectif de l'équipe de Y. Barrandon.

Marie-Thérèse LANDOUSY

Tourner autour du mot

Les mots qu'on a sur le bout de la langue résultent d'un manque temporaire de coordination entre divers domaines du cerveau.

Définition : renoncer au trône, en huit lettres. Vous le savez, c'est certain, vous avez le mot sur le bout de la langue, mais vous ne pouvez l'énoncer. Les noms des capitales, des ministres, ou des mots peu usités nous échappent souvent. Quand, malgré nos efforts, un mot continue à se dérober, il fait naître un sentiment de frustration. Cette incapacité de prononcer un nom connu est fréquente chez les personnes âgées. Elles s'en plaignent et considèrent qu'elle détériore leurs relations sociales : elle est perçue comme une marque de sénilité. Vous avez trouvé ? *Abdiquer*. « Ah, bien sûr ! ». Pourquoi donc ne l'avez-vous pas dit plus tôt ?

Ces mots qui résistent à l'énonciation sont une aubaine pour les psychologues. Ils les exploitent pour expliquer la production de la parole. La majorité des modèles de production de la parole séparent les mémoires sémantique (le sens du mot), lexicale (le mot lui-même) et phonologique (les sons associés au mot). En résumé, une parole spontanée fait d'abord intervenir l'examen des ressources sémantiques (« Voilà ce que je veux dire »), puis un choix parmi les ressources lexicales (« Voilà les mots qui conviennent pour le dire ») et enfin, la sélection de la représentation phonologique associée à ce mot.

Lori James et Deborah Burke, psychologues à l'Université de Los Angeles et de Ponom College, ont montré que les mots qu'on a sur le bout de la langue proviendraient d'une difficulté à faire appel aux représentations phonologiques des mots. Jusqu'à présent, on admettait qu'un mot résiste à l'énonciation quand un autre mot interfère avec lui, créant un blocage. Après deux expériences qu'ils ont menées avec plus de 100 sujets, L. James et D. Burke réfutent cette hypothèse. La

moitié des sujets étaient des jeunes d'une vingtaine d'années, l'autre moitié des personnes âgées de 72 ans en moyenne.

Dans la première expérience, le sujet était placé devant un ordinateur et dix mots s'affichaient, les uns après les autres, sur l'écran. Le sujet devait prononcer chaque mot à voix haute. À la fin de la liste, une question apparaissait. La réponse à cette question était un mot connu, mais peu utilisé, tel *amnésie*, *vaudeville*... Le sujet donnait la réponse, annonçait qu'il l'ignorait ou alors qu'il la connaissait sans pouvoir la formuler. Dans ce dernier cas, on lui soumettait trois mots, parmi lesquels figurait la bonne réponse, pour vérifier qu'il la connaissait bien.

La liste des mots à énoncer contenait soit des mots qui partageaient un ou deux phonèmes avec la réponse, par exemple *abject*, le mot à trouver étant *abaque* ou *marinade* pour *sérénade* ; soit des mots choisis au hasard sans lien avec la réponse. L'exercice de prononciation des dix mots corrélés phonétiquement à la réponse diminue la proportion de mots que les sujets ont sur le bout de la langue : il augmente aussi la proportion de bonnes réponses. La répétition des mots ayant des phonèmes semblables renforce dans le cerveau les liens entre le mot que l'on veut dire et sa représentation phonologique.

Dans la deuxième expérience, le sujet était toujours face à l'écran, mais on lui posait d'abord la question destinée à lui faire énoncer un mot peu usité. Quand il répondait qu'il ne savait pas ou qu'il avait le mot sur le bout de langue, alors seulement on lui faisait énoncer, un à un, les dix mots de la liste. Quand la liste contenait des mots reliés phonologiquement au mot recherché, le nombre de réponses correctes augmentait, mais seulement quand le sujet disait avoir le mot sur le bout de la langue (pas quand il disait ignorer la réponse). Ce résultat confirme que la liste de mots reliés ravive le lien entre le mot activé dans le registre lexical et sa représentation phonologique. En revanche, quand le sujet disait ne pas connaître la réponse, aucun stratagème ne l'aidait. Par ailleurs, l'effet d'activation par la répétition de phonèmes identiques à la réponse fonctionne aussi bien dans les groupes des jeunes et des personnes âgées : cet effet semble indépendant de l'âge.

Quand on a un mot sur le bout de la langue et qu'au prix d'efforts, on parvient à le prononcer, le cerveau a probablement produit d'autres mots aux phonèmes similaires dont on n'a pas conscience ; il « tourne autour du mot » jusqu'à activer la représentation sonore correcte. Plus on utilise le langage, plus on augmente ses chances de préserver longtemps les liens entre les différents domaines cérébraux. Soyez bavards !

BRÈVES

Arsenic et vieilles fougères

Comment débarrasser certains sols riches en arsenic, tels des sites industriels, du poison qu'ils contiennent ? Des équipes américaines ont peut-être la solution : ils ont découvert que les plants de la fougère *Pteris vittata*, commune dans les régions tempérées, extraient du sol et stockent dans leurs feuilles de grandes quantités d'arsenic, sans en souffrir. Non seulement cette fougère décontaminerait les sols pollués, mais sa croissance semble favorisée par l'arsenic.



Menace d'éruption du Mont Fuji

Le Mont Fuji, au Japon, connaît un regain d'activité volcanique depuis six mois. Au mois d'octobre 2000, 133 séismes de faible amplitude ont été enregistrés, et 221 au mois de novembre, tandis que les sismologues n'en comptaient pas plus de 10 par mois en moyenne au cours des années précédentes. Ces séismes, imperceptibles, mais d'une durée de 30 minutes, sont considérés par les sismologues japonais comme les signes annonciateurs d'une éruption. Le Mont Fuji appartient à une chaîne volcanique qui comprend le Mont Oyama, entré en éruption en juin 1999, et les îles de Shikine, Kozu et Nijijima, également soumises à des séismes depuis quelques mois. La dernière éruption du Mont Fuji remonte à 1707.

Être humain

Qu'est-ce qui fait de nous des humains ? Probablement, la capacité, entre autres, de décoder chez les autres les signes de gaieté, de déception, d'ironie... Ces capacités d'identification des sentiments d'autrui seraient localisées dans le cortex préfrontal droit. C'est ce qu'ont montré Donald Stuss et son équipe de l'Université de Toronto après avoir étudié 32 personnes dont les lobes frontaux étaient endommagés à la suite d'un accident. Au cours d'un des tests, on demandait aux patients de deviner sous quelle tasse était cachée une petite balle. Pour les aider, un assistant exprimait soit la déception lorsque la personne allait soulever la mauvaise tasse ou, au contraire, la satisfaction si c'était la bonne tasse. Contrairement aux sujets témoins, les personnes qui ont des lésions dans le cortex préfrontal droit ne percevaient pas les messages que véhiculent les mimiques.



Brevet lipogramme

Le brevet d'invention numéro 2 795 457, délivré à son inventeur, Robert Signore, par le très sérieux Institut national de la propriété industrielle, porte sur un dispositif propulsif utilisant un corps noir. Rien de bien exceptionnel? Que si : le brevet tout entier est un lipogramme, le texte ne comportant, comme son titre, aucune lettre e. Ce fait d'armes digne des écrivains qui ont fondé l'ouvrage de littérature potentielle, réconcilie définitivement deux cultures trop longtemps séparées, la technique et la littérature.

La vie en rose

Les personnes extraverties, optimistes et sociables réagissent plus aux images positives que les personnes plus renfermées et inquiètes, d'après une étude par IRM (imagerie par résonance magnétique) fonctionnelle menée par Turhan Canli et son équipe de l'Université de Stanford. Ces psychologues ont évalué le degré d'extraversion de 14 femmes, puis leur ont présenté des images négatives (des scènes de guerre, des cimetières...) ou positives (des couples heureux, des crèmes glacées...) pour déclencher des réactions émotionnelles. Le cerveau des femmes les plus extraverties réagit plus aux images positives (signaux plus intenses et plus nombreux) qu'aux images négatives ; les femmes les moins extraverties ne réagissent pas aux images positives. Certaines personnes voient vraiment plus la vie en rose que d'autres...

Les neurones du grattage

Quelles sont les bases neuronales des démangeaisons? Existe-t-il des voies neuronales séparées pour la douleur et pour le prurit? Ce sont des sensations différentes, mais intimement liées : les substances opiacées, par exemple, réduisent les sensations douloureuses, mais peuvent déclencher des démangeaisons ; inversement un stimulus douloureux peut inhiber le prurit. Des neurobiologistes de l'Institut Barrow, à Phoenix, ont découvert des neurones de la moelle épinière, connectés au thalamus (qui transmet les informations sensorielles au cortex), et spécifiquement associés aux démangeaisons. Connaissant ces neurones, on trouvera sans doute des substances spécifiques pour inhiber le prurit associé à certaines maladies de la peau, du foie ou du rein.



Lente lumière

Les physiciens ralentissent la lumière dans un milieu ultrafroid.

Debout sur un quai de gare, un voyageur est intrigué par une sorte de soie iridescente tendue en travers de la voie. Voilà qu'un TGV surgit et fonce vers le tissu. Le voyageur n'en croit pas ses yeux : au lieu de déchirer la soie, le train y disparaît en quelques secondes, puis, aussi soudainement qu'il a disparu, il réapparaît dans toute sa longueur de l'autre côté de la soie avant de disparaître au loin.

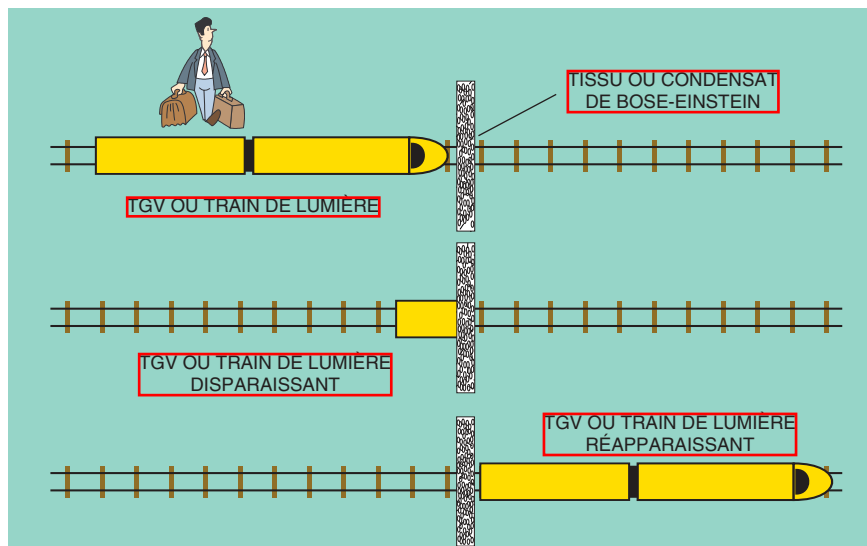
Cette scène fait penser à un effet spécial de cinéma plutôt qu'à la physique. Elle illustre pourtant à merveille les jeux de trains de... lumière auxquels se livre le groupe de Lene Vestergaard Hau, à l'Université d'Harvard. Ces physiciens réduisent la vitesse de la lumière en exploitant les interférences optiques dans un milieu qu'ils ont préparé. Ils sont parvenus à ralentir les photons à une vitesse de seulement 17 mètres par seconde... celle d'un cycliste. Dans une autre expérience, ils stockent dans ce milieu l'image d'un train de lumière, qu'ils régénèrent à volonté.

Pour ralentir la lumière, le groupe de Harvard contrôle la transparence d'un nuage d'atomes de sodium ultrafroids à l'aide d'un laser. Rappelons que si la lumière se propage plus lentement dans un milieu transparent que dans le vide, c'est parce qu'elle y crée des interférences. En se propageant, elle excite les atomes du milieu, modifie le mouvement de leurs

électrons et leur fait diffuser à leur tour de la lumière qui interfère avec le rayonnement incident. Il en résulte une réduction de la vitesse des paquets de photons qui traversent le milieu. Ainsi, dans le verre, la lumière ne dépasse pas 200 000 kilomètres par seconde, soit les deux tiers de sa vitesse dans le vide.

Dans le nuage d'atomes de sodium, la vitesse de groupe des photons n'excède pas un dix millionième de sa valeur dans le vide ! Pour la réduire à ce point, les physiciens contrôlent la transparence d'un milieu constitué d'atomes de sodium ultrafroids à l'aide d'un « laser de contrôle ». Le faisceau du « laser d'essai », celui qui émet les trains de lumière étudiés, est combiné à celui du laser de contrôle. Les photons issus du faisceau combiné excitent les atomes de sodium dans un état particulier, l'état noir. Malgré ce nom, un nuage d'atomes de sodium excités dans cet état quantique laisse passer la lumière. Les photons du faisceau combiné excitent de cette façon certains atomes de sodium ou interfèrent avec les photons émis par d'autres atomes qui se dés excitent. Ils produisent des interférences destructives qui réduisent à l'extrême la vitesse de groupe des photons du laser d'essai.

Qu'observent les physiciens ? Trois microsecondes d'émission du laser d'essai produisent, par exemple un train de lumière de presque un kilomètre de longueur. Les physiciens le joignent au faisceau continu du laser de contrôle, puis l'envoient dans le nuage d'atomes de sodium, épais de 0,3 millimètre. Ils constatent alors que le train de lumière disparaît dans le milieu ; il y chemine pendant une dizaine de microsecondes, avant de réapparaître quasi identique à lui-même, bien qu'atténué.



Les physiciens ont réussi à freiner la lumière, au point qu'elle reste piégée dans un milieu adapté ; on parvient à la restituer, identique à elle-même. C'est comme si un TGV s'engouffrait dans un morceau de tissu, y disparaissait quelques secondes et réapparaissait, identique à lui-même, de l'autre côté du tissu.

Les physiciens d'Harvard portent des atomes de sodium à une température extrême : moins d'un millionième de degré au-dessus du zéro absolu. Ils s'affranchissent ainsi des effets parasites de l'agitation thermique. Ces atomes froids s'accumulent tous dans leur état de plus basse énergie, nommé l'état fondamental. Ils forment alors un condensat de Bose-Einstein, un état où ils se comportent de façon collective, dite cohérente. Des photons issus d'une source lumineuse fournissent un autre exemple d'ensemble de particules cohérentes.

Les physiciens ont voulu étudier comment la cohérence d'un train de photons est transmise à un tel groupe d'atomes cohérents. Pour ce faire, ils arrêtent le laser de contrôle à l'instant même où un train de lumière disparaît dans l'échantillon. Puis, ils attendent une demi-milliseconde avant de rétablir le laser de contrôle. Pour des photons, une demi-milliseconde est une éternité ; dans

le vide, elle leur suffit pour parcourir 150 kilomètres. Pourtant, dès que le laser de contrôle fonctionne à nouveau, le train de lumière émerge du milieu gazeux, comme si aucune interruption n'avait eu lieu.

Que s'est-il passé ? En l'absence du faisceau de contrôle, le gaz d'atomes de sodium n'est plus transparent (puisque c'est le faisceau de contrôle qui rend le milieu transparent), de sorte que la lumière ne peut plus s'y propager. Que reste-t-il alors du train de lumière initial ? Seulement l'information relative à sa cohérence, qui s'imprime dans le condensat. L'holographie repose sur un phénomène analogue. Proche de la photographie, cette technique permet de stocker des images tridimensionnelles. Dans ce cas aussi, un milieu récepteur enregistre les informations sur la forme de l'objet holographié ; celles-ci sont restituées quand on éclaire le milieu récepteur avec un faisceau cohérent.

L'équipe de Lene Vestergaard Hau a mis en évidence qu'il fallait un milieu récepteur cohérent pour enregistrer un train de lumière cohérent. Une fois stockée, cette information reste inscrite dans le condensat d'atomes aussi longtemps que l'agitation thermique ne la détruit pas. Dans un nuage d'atomes ultrafroids, ce temps est extrêmement long (à l'échelle de temps des phénomènes optiques), puisque pratiquement aucune agitation thermique n'y règne.

L'empreinte du train de lumière y reste disponible, prête à s'imprimer dans le rayonnement du laser de contrôle, une fois celui-ci rétabli. Éteignant, puis rallumant par intervalles leur laser de contrôle, les physiciens ont même montré que des lectures successives sont possibles. Ils espèrent que leur dispositif ouvrira la voie à la réalisation de systèmes de stockage d'informations cohérentes, précieux pour les futurs ordinateurs quantiques.

Des dents en éventail

Un petit dinosaure bipède d'un nouveau genre a été découvert à Madagascar.

A la fin du XIX^e siècle, le paléontologue français Charles Depéret décrit pour la première fois des fossiles de dinosaures provenant de Madagascar. Depuis, des fouilles épi-sodiques ont été menées, mais elles se sont intensifiées récemment, avec les travaux d'équipes de paléontologues américains au Nord-Ouest de l'île, dans des terrains datant de la fin du Crétacé (entre -73 et -65 millions d'années). Scott Sampson, du Musée d'histoire naturelle de Salt Lake City, Matthew Carrano et Catherine Forster, de l'Université de New York, viennent de découvrir un nouveau genre de dinosaure carnivore dans le bassin de la rivière Mahajamba ; ils l'ont nommé *Masiakasaurus knopfleri*. Ce nom vient du malgache *masiaka*, qui signifie violent ou haineux, et du nom du chanteur du groupe *Dire Straits*, Mark Knopfler, dont les compositions semblent avoir inspiré les découvreurs durant leurs fouilles sur le terrain.

Les paléontologues disposent de quelques dizaines d'os qui proviennent de six animaux (au moins) et représentent environ 40 pour cent d'un squelette de *Masiakasaurus*. L'animal était un petit dinosaure bipède carnivore qui mesurait environ 60 centimètres de hauteur et 1,8 mètre de longueur, du bout du museau

au bout de la queue. S. Sampson et ses collègues l'ont classé dans le groupe des abelisaurides, des dinosaures carnivores (théropodes) qui vivaient au Crétacé, sur des continents qui se trouvaient alors dans l'hémisphère Sud (notamment en Amérique du Sud, en Inde et à Madagascar) et en Europe de l'Ouest. Certains étaient très grands, tel *Carnotaurus*, qui mesurait environ huit mètres et vivait en Amérique du Sud. Dans la plupart des régions où ils vivaient, les abelisaurides occupaient presque toutes les niches écologiques de prédateurs, petits ou grands. En revanche, à la même époque, en Amérique du Nord et en Asie, les prédateurs appartenaient à d'autres familles de dinosaures carnivores, tels les Tyrannosauridés. D'un continent à l'autre, les dinosaures étaient d'espèces très différentes.

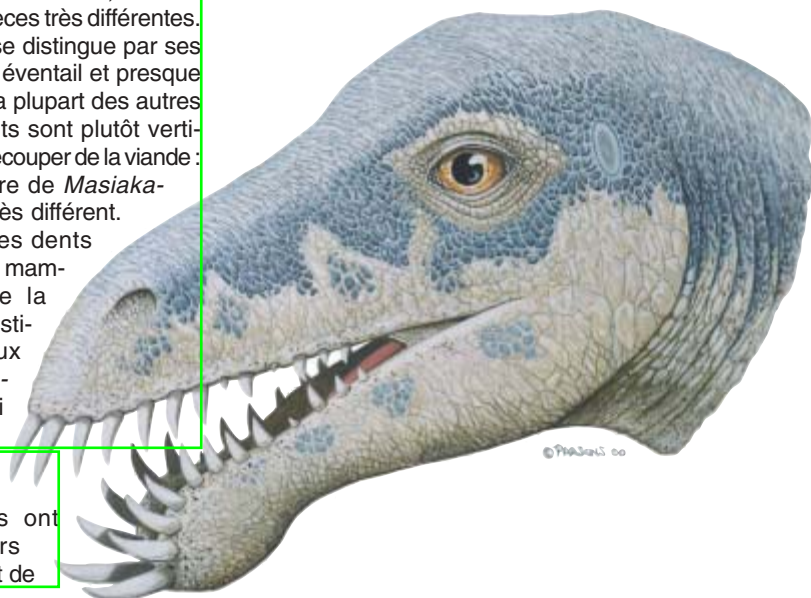
Masiakasaurus se distingue par ses dents de devant, en éventail et presque horizontales. Chez la plupart des autres théropodes, les dents sont plutôt verticales et servaient à découper de la viande : le régime alimentaire de *Masiakasaurus* devait être très différent. Cette disposition des dents existe chez certains mammifères actuels de la famille des *Caenolestidés*, des marsupiaux insectivores. *Masiakasaurus* était-il, lui aussi, insectivore ?

Dans les mêmes couches géologiques, les paléontologues ont découvert plusieurs espèces d'oiseaux et de

crocodiles, des dinosaures herbivores de la famille des Titanosauridés et un *Majungatholus*, un grand prédateur du même groupe que *Masiakasaurus*, mais aux dents bien plus classiques.

Les découvertes de dinosaures sur un continent austral sont exceptionnelles : aujourd'hui, nous n'avons qu'une connaissance médiocre de la diversité et de la paléobiologie des dinosaures en dehors de l'Amérique du Nord et de l'Europe. On estime connaître entre 5 et 15 pour cent des espèces de dinosaures qui ont vécu sur Terre. Les autres ont probablement vécu sur les continents du Sud, où les recherches paléontologiques sont encore rares.

Jean LE Lœuff, Musée d'Espéranza

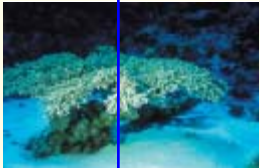


Intelligence et douleur

Des souris transgéniques notablement plus intelligentes que les autres ont vu le jour il y a plusieurs mois. Elles produisent, en quantité supérieure à la normale, une protéine qui facilite l'apprentissage et améliore la mémoire. Cette superintelligence a son revers : les souris ont des réactions exacerbées face aux douleurs chroniques et prolongées. Elles sont plus sensibles à ce type de douleurs, mais conservent des réactions normales face à la douleur aiguë, une brûlure, par exemple. Cette découverte aura sans doute des conséquences non pas sur les éventuelles relations entre intelligence et douleur, mais plutôt sur les circuits de la douleur : quand on administre une substance qui inhibe les douleurs chroniques, la sensation de douleur aiguë, celle qui fait que l'on retire la main du feu, doit rester intacte.

Corail mal en point

Selon le dernier rapport du réseau mondial de surveillance des coraux, 16 pour cent des récifs coralliens du monde ont disparu en 1998, principalement dans l'océan Indien, le Sud-Est asiatique et le golfe Persique, tandis que l'océan Pacifique semble avoir été épargné. Cette destruction serait la conséquence d'épisodes El Niño et La Niña, ainsi que de l'augmentation de la température des océans. Environ 50 ans seront nécessaires au corail pour retrouver son ancien niveau... si on lui en donne l'occasion.



Virus de riz

La structure du virus de la panachure jaune du riz a été identifiée. Cette maladie, qui menace la riziculture irriguée en Afrique, est transmise par un coléoptère, et elle est due à un virus résistant et dévastateur. Les variétés cultivées dans les rizières africaines qui ont un rendement élevé, sont très sensibles au virus de la panachure jaune du riz. Après avoir identifié des variétés de riz résistantes à ce virus, les agronomes de l'IRD ont identifié des gènes de résistance à la maladie : ils bloquent la propagation du virus dans la plante. Aujourd'hui, la structure du virus est élucidée, des gènes de résistance sont identifiés : on devrait trouver comment éviter la propagation du virus en Afrique et éviter qu'il ne touche les rizières asiatiques, qui représentent près de 90 pour cent de la production mondiale.

Rivalité sexuelle

Les conditions climatiques semblent influencer sur les stratégies de reproduction des tortues des steppes.

Chez les tortues, mais aussi chez les mammifères, les mâles entrent en compétition pour la conquête des femelles. En général, les mâles les plus grands et les plus forts reçoivent davantage que les petits les faveurs des dames. Chez la tortue terrestre *Gopherus agassizii*, qui vit aux États-Unis, dans les zones désertiques, les grands mâles dominent les petits, remportent les combats et s'accouplent avec un nombre plus élevé de partenaires. Cette compétition explique en partie pourquoi les mâles sont généralement plus grands que les femelles chez la plupart des tortues terrestres. La tortue des steppes fait exception : les mâles sont plus petits que les femelles.

Leur carapace mesure en moyenne 12,5 centimètres, tandis que les femelles ont une taille moyenne de 16 centimètres. La période d'accouplement ne dépasse pas trois semaines, à cause de l'environnement désertique, et les mâles s'affrontent parfois plusieurs fois par jour, pendant plus d'une heure, dans de violents combats. Alors que les grands mâles devraient être avantagés, pourquoi sont-ils plus petits que les femelles ? Pour le savoir, nous avons observé les tortues de la réserve de Boukhara, en République d'Ouzbékistan. Nous avons étudié 56 groupes de trois mâles adultes – un petit, un moyen et un grand – dans un enclos. Nous y avons introduit une femelle, pour observer les différents comportements de parade et de combat des mâles. Comme les altercations se soldent souvent par le retournement de l'un des adversaires sur la carapace, nous avons placé 49 tortues mâles sur le dos, pour déceler une éventuelle relation entre la taille et la capacité qu'ont les tortues à se remettre sur leurs pattes. Force nous a été de constater que taille, capacité de retournement, intensité de la parade et efficacité au combat sont indépendantes. Quelle que soit leur taille, les mâles accèdent également aux femelles (tout du moins dans l'enclos). Sur le terrain, le nombre de partenaires qu'un mâle rencontre dépend de l'in-

tensité avec laquelle il prospecte son territoire : les grands mâles, plus rapides, sont peut-être favorisés.

En mesurant l'écart entre les stries, sur les carapaces des tortues, nous avons montré que la croissance des jeunes tortues varie en fonction des conditions météorologiques. Les stries des tortues, comme les cernes des troncs d'arbres, reflètent la rapidité de la croissance, laquelle dépend directement des conditions climatiques. Elles sont très variables d'une année à l'autre : il tombe de 4 à 27 centimètres de pluie par an, ce qui détermine la quantité de nourriture disponible. Au cours des années de sécheresse, la végétation est clairsemée et pauvre en nutriments. En revanche, durant les années de fortes pluies, la végétation est dense et de meilleure qualité. Dans ces conditions, les jeunes grandissent plus vite. Ils atteignent alors leur maturité sexuelle plus rapidement, généralement avant l'âge de 10 ans.

Nous avons constaté que les tortues qui grandissent vite ont, une fois adultes, une petite taille. Ainsi, les tortues qui bénéficient de conditions climatiques favorables ne profitent pas de l'abondance des ressources pour continuer à grossir, mais s'arrêtent plus tôt de croître pour acquérir, précocement, leur maturité sexuelle : le territoire qu'ils prospectent à la recherche de femelles est plus restreint, mais le handicap est compensé par une vie reproductive précoce. Dans les années de sécheresse, les tortues grandissent lentement, atteignent leur maturité sexuelle tardivement, mais leur taille est supérieure. Cette maturation tardive engendre une vie reproductive retardée, compensée par une plus grande capacité de prospection. Au sein d'une même population, deux stratégies reproductives permettent aux mâles de s'adapter au mieux aux conditions météorologiques.

D. CHARFALLOT, A. LEGRAND, F. LAGARDE et X. BONNET, Laboratoire d'Herpétologie, Centre d'études biologiques de Chizé



Le mâle des tortues des steppes est plus petit que la femelle. Quand il part à la recherche de partenaires, il est pénalisé parce qu'il n'avance pas vite. En revanche, il atteint sa maturité sexuelle plus tôt que ses rivaux plus gros, de sorte que sa période reproductive est plus longue.

Le séisme de Bhuj

Le séisme intraplaque du 26 janvier 2001, prémisse d'une cassure du continent indien en avant de l'Himalaya?

A la nouvelle qu'un séisme catastrophique de magnitude 7,6, résultant d'une compression Nord-Sud, venait de se produire en Inde, beaucoup de personnes ont pensé que l'épicentre devait se situer dans la zone très sismique de l'Himalaya. En effet, le front de cette chaîne est jalonné par une grande faille de chevauchement qui cause périodiquement des séismes destructeurs, en faisant avancer les reliefs sur le continent indien. Or, le séisme de Bhuj s'est produit à environ 1 000 kilomètres plus au Sud, dans une région de faibles reliefs. L'emplacement du séisme est étonnant, mais est-ce une première? Comment expliquer ce séisme qui paraît inhabituel?

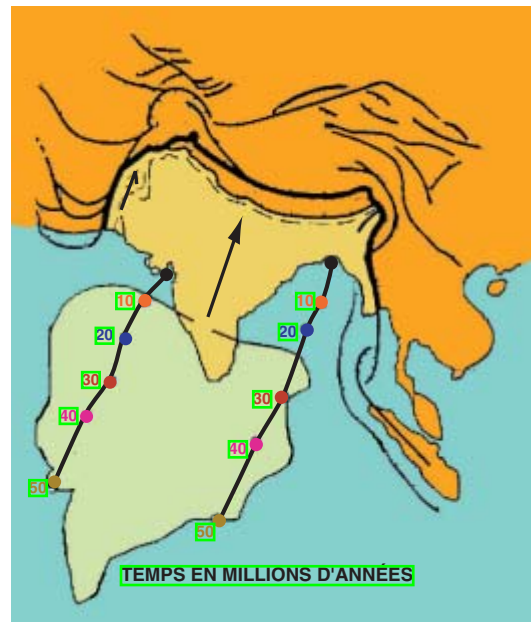
Remarquons d'abord que l'épicentre se trouve dans ce qu'on nomme la «plaque indienne» et que l'Inde correspond à un vieux continent analogue à l'Australie (à laquelle elle était accolée, il y a plus de 120 millions d'années). Le continent est constitué, pour l'essentiel, de roches très anciennes (allant de 600 millions d'années à 2 500 millions d'années), difficiles à déformer, ce qui explique la rigidité et l'apparente stabilité de

cette plaque continentale où les séismes sont rares.

Toutefois, nous savons que les grands continents «stables» peuvent être touchés par des séismes très importants, mais aussi très espacés dans le temps. Un bilan sur ce type de séismes a été présenté il y a dix ans par Arch Johnston et Lisa Kanter (*Pour la Science*, mai 1990) ; ils signalaient qu'un très important séisme s'était produit en Inde, en 1819, à Kutch, situé à 200 kilomètres au Nord-Ouest du séisme de Bhuj. Lors de ce séisme de magnitude 7,7, il s'était formé, sur une longueur de près de 100 kilomètres, un escarpement en faille inverse (c'est-à-dire de compression), d'une hauteur de six à neuf mètres, qui fut dénommé le «Mur de Dieu.»

Ainsi, en presque 200 ans, la plaque indienne a été affectée dans la même région par deux séismes majeurs. Quelle est leur signification? Pour essayer de répondre, situons-nous dans le contexte général de la collision Inde-Asie représenté sur la figure 1.

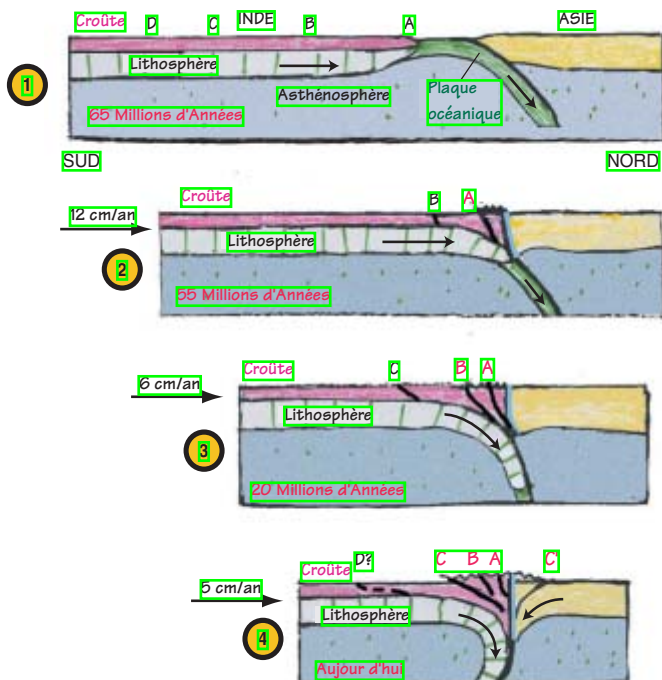
Il y a 65 millions d'années, le continent indien se trouvait à environ 5 000 kilomètres de sa position actuelle, et il était bordé au Nord d'une plaque océanique qui s'enfonçait sous l'Asie par une subduction (*phase 1 de la figure 2*). Il y a 55 millions d'années, la plaque océanique s'étant entièrement enfouie, les deux continents sont rentrés en collision (*phase 2*), et



1. Déplacement de la plaque indienne au cours des 50 derniers millions d'années.

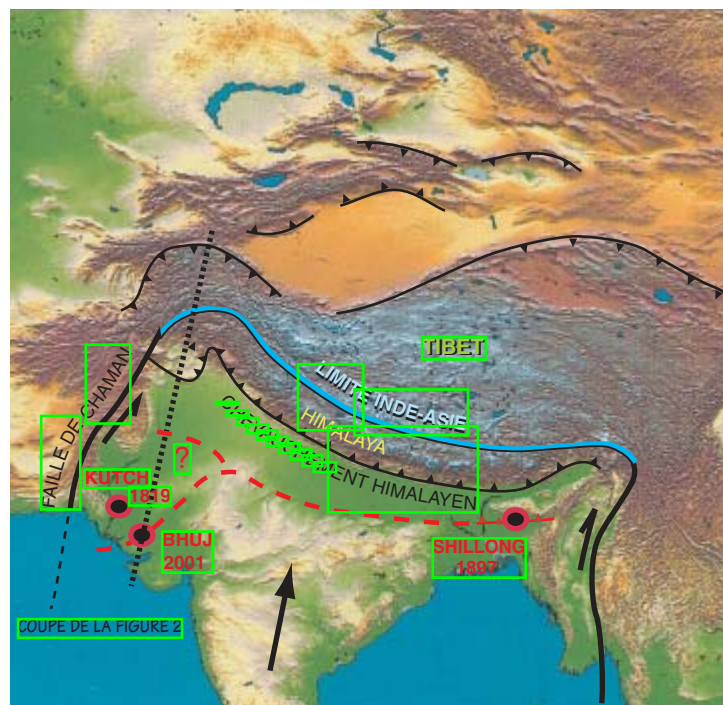
une chaîne de montagne a commencé à s'édifier au dépens de la croûte indienne, alors que la lithosphère était englobée dans l'asthénosphère (*voir la figure 2*). Dès le début, la chaîne montagneuse était limitée au Sud par un chevauchement (A). Il y a 20 millions d'années (*phase 3*), une grande partie de la plaque indienne est déjà enfouie dans l'asthénosphère, tandis qu'en surface, la chaîne himalayenne agrandie est limitée par un nouveau chevauchement (B).

Lors des derniers 20 millions d'années, la chaîne himalayenne continue



(La limite entre l'Inde et l'Asie a été supposée fixe.)

2. Evolution, en coupe, de la collision entre l'Inde et l'Asie.



3. Les séismes récents présagent peut-être d'une cassure de la plaque indienne.

de s'élargir et de progresser vers le Sud par sauts successifs ; elle est limitée par le chevauchement (C). Ainsi, depuis le début de sa formation, l'Himalaya a fonctionné comme un prisme d'accrétion crustal (accumulation de lambeaux de croûte dans une zone triangulaire, voir la figure 2). Et pour la première fois, la déformation affecte l'Asie, avec un chevauchement (C') vers le Nord, qui correspond à une subduction continentale qui plonge vers le Sud. La chaîne s'est donc encore élargie et présente une allure en éventail dissymétrique.

Quel est le mécanisme qui a permis d'aboutir à cette structure générale de la chaîne ? Dès le début de la collision, le continent Indien a été soumis à des forces compressives d'autant plus importantes que l'on se rapprochait du contact Inde-Asie. En raison de sa faible densité (2,7) par rapport à celle du manteau (3,3), la croûte ne peut être entraînée à grande profondeur, et elle se désolidarise du manteau plus dense et plus rigide. En avant du chevauchement himalayen, à intervalles réguliers, les forces tectoniques atteignent le seuil de rupture des roches en provoquant des séismes. De nouvelles failles apparaissent par cassures successives, et le prisme d'accrétion s'élargit.

Actuellement, au stade 4, le continent indien n'est ébranlé que par quelques séismes rares, mais de forte puissance, tels ceux de Kutch et de Bhuj. Un séisme encore plus puissant s'est produit en 1897 dans l'Est du continent indien, sur le versant Sud du massif de Shillong, à 200 kilomètres du front de l'Himalaya. Ce séisme de magnitude 8,7 s'est manifesté par une faille de chevauchement Est-Ouest et un ressaut de plus de dix mètres de haut (plus haut que le Mur de Dieu !)

Comme, aujourd'hui, le front himalayen s'avance vers le Sud à une vitesse de deux centimètres par an, il ne tardera pas à absorber le massif de Shillong, dans à peine cinq millions d'années. Revenons à l'Ouest ; les séismes de Kutch et de Bhuj sont à environ 1 000 kilomètres du front himalayen ; celui-ci n'avancera pas aussi loin, mais cette partie de l'Inde sera profondément modifiée, car le continent indien aura certainement continué sa marche tranquille à la même vitesse qu'aujourd'hui, soit cinq centimètres par an, 500 kilomètres en 10 millions d'années.

Les failles de Kutch et de Bhuj pourraient être une préfiguration d'une grande faille (nouvelle cassure D) qui coupera le Nord-Ouest de l'Inde et qui finira par rejoindre vers l'Est le front d'une chaîne himalayenne qui aura beaucoup changé et qui aura bien avancé vers le Sud.

Hervé PHILIP et Maurice MATTAUER

Nouveau thermomètre intergalactique

Des astrophysiciens ont mesuré la température du fond diffus cosmologique dans un nuage intergalactique lointain.

La théorie du Big Bang stipule que notre univers est issu d'une gigantesque explosion primordiale et que, depuis, son rayon croît et sa température diminue. Il y a environ 15 milliards d'années, cette température est passée au-dessous d'une valeur critique telle que les électrons et les protons ont pu se combiner. L'Univers est devenu transparent, car les photons ont cessé d'interagir avec le mélange des particules qui emplissait l'Univers primordial. Un gaz de photons s'est maintenu dans tout l'espace. Ce gaz que les astrophysiciens nomment le fond diffus cosmologique se refroidit selon une loi décrite par la relativité générale : la température du cosmos décroît comme l'inverse du rayon de l'Univers. Une nouvelle évaluation de cette température vient d'être réalisée par Patrick Petitjean de l'Institut d'astrophysique de Paris, Cédric Ledoux de l'Observatoire européen austral et Raghunatan Srianand du Centre interuniversitaire pour l'astronomie et l'astrophysique de Pune, en Inde.

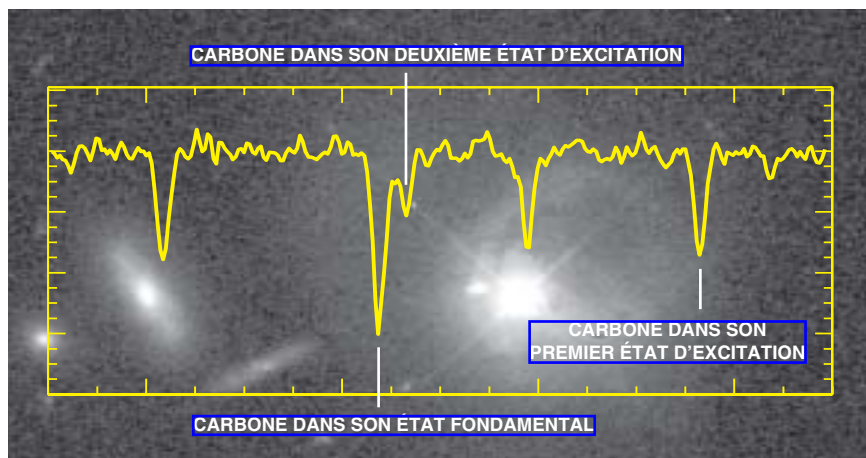
La loi de refroidissement constitue l'un des piliers du modèle cosmologique standard, la théorie cosmologique acceptée aujourd'hui. Découvert fortuitement par

Arno Penzias et Robert Wilson en 1965, ce « rayonnement fossile » a pu être mesuré il y a une dizaine d'années par le satellite COBE, et le résultat était en parfait accord avec ce que prévoit le modèle cosmologique standard.

Toutefois, il n'a été testé qu'au voisinage immédiat de la Terre. Il se pourrait que le rayonnement perçu sur la Terre n'existe que dans son voisinage, ou dans celui de la galaxie. Il s'agirait alors non pas d'un fond cosmologique, qui, par définition, doit être présent dans tout l'Univers, mais d'un fond local qui créerait, dans notre voisinage, l'illusion d'une explosion primordiale. P. Petitjean et ses collègues viennent de lever le doute.

Ils ont découvert un moyen indirect de mesurer la température du fond diffus cosmologique dans les nuages du milieu intergalactique situés sur le chemin qui nous sépare des quasars. Les quasars (en anglais *quasi stellar objects*, c'est-à-dire objets quasi stellaires) sont des objets très lumineux situés aux confins de l'Univers observable, qui seraient en cours d'effondrement dans un trou noir. Pour évaluer cette température, les astrophysiciens utilisent le fait que des nuages de gaz composés d'éléments divers se trouvent sur l'axe qui nous relie à ces géants éloignés. Ainsi, ils ont découvert la présence de raies d'absorption dans le rayonnement qui nous parvient du quasar PKS1232+0815. Ces raies sont les signatures spectrales des éléments chimiques présents dans le nuage intergalactique analysé.

Les électrons superficiels des atomes responsables de ces raies ont subi des transitions qui les ont fait passer de leur



Les trois formes du carbone présent dans le nuage intergalactique analysé (neutre et dans deux états d'excitation) ont des raies d'absorption différentes : au centre, la plus grande des raies est celle du carbone dans son état fondamental ; les trois raies de taille voisine qui entourent la grande raie sont celles du carbone neutre excité dans son premier niveau d'énergie. Deux petites raies, l'une à droite de la grande raie centrale et l'autre à l'extrême droite, sont celles du carbone neutre excité dans un deuxième état d'énergie. Ces mesures montrent que le fond diffus cosmologique micro-onde a l'énergie et, par conséquent, la température adéquate pour faire passer les atomes de carbone présents dans ce nuage de leur état fondamental (raie principale) à leurs deux premiers états d'excitation. Ce spectre a été obtenu avec le spectrographe à haute résolution du télescope KUYEN de l'Observatoire européen austral au Chili.

état fondamental à un niveau d'énergie supérieur. Plusieurs mécanismes déclenchent de telles transitions, mais le plus fréquent est l'absorption de photons dont l'énergie correspond à celle du niveau excité. Les astrophysiciens ont constaté que le nuage qui entoure le quasar contient de nombreux atomes de «carbone neutre excité», c'est-à-dire comportant un électron dans son premier état d'excitation. Ils ont montré que seule la présence dans le nuage d'un rayonnement diffus à 10 kelvins pouvait expliquer l'énergie reçue par l'électron de ce carbone neutre excité.

Pour le prouver, les astrophysiciens ont estimé l'importance des mécanismes qui pourraient donner des signaux identiques à ceux du carbone neutre excité par le fond diffus cosmologique. Trois mécanismes – l'excitation des atomes de carbone par le rayonnement ultraviolet, leurs collisions avec des molécules d'hydrogène et leur collisions avec des électrons – devaient être pris en compte. P. Petitjean et ses collègues ont utilisé les raies du carbone ionisé et celles de l'hydrogène moléculaire pour estimer les quantités de carbone et d'hydrogène moléculaire

présents dans le nuage, ainsi que la densité et la température du nuage. Grâce à ces résultats, ils ont montré que les trois mécanismes concurrents ne peuvent, seuls, expliquer l'abondance du carbone neutre excité constatée dans le nuage. Ils en ont conclu qu'un fond diffus cosmologique y a aussi contribué et estimé que la température de ce rayonnement est comprise entre 6 et 12 kelvins, ce que prévoit la théorie de la relativité générale pour l'époque de l'émission de la lumière du quasar, il y a 15 milliards d'années.
Christophe PICHON

Des glaciers voués à la disparition

La fréquence accrue des épisodes El Niño accélère la fonte des petits glaciers des Andes tropicales

Contrairement aux glaciers alpins, qui fondent très peu en été et accumulent de grandes quantités de neige en hiver, les glaciers des tropiques fondent toute l'année dans leur partie inférieure, à cause de l'absence de saison froide marquée. De ce fait, ils sont particulièrement sensibles aux fluctuations climatiques. Quel sera leur devenir, dans le contexte actuel de réchauffement du climat? Cette question est d'autant plus pré-occupante que l'approvisionnement en eau des régions andines dépend en grande partie des glaciers de la Cordillère. Bernard Francou et ses collègues de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), ainsi que des glaciologues boliviens et équatoriens, ont montré que dans 10 ou 15 ans, un grand nombre de ces glaciers aura disparu.

Ils ont étudié le glacier de Chacaltaya, situé entre 5 100 et 5 400 mètres d'altitude, au Nord de la Bolivie, et celui de l'Antizana, entre 4 800 et 5 760 mètres, en Équateur. Par leur petite taille (inférieure à un kilomètre carré), ces glaciers sont représentatifs de ceux qui parsèment la Cordillère sous les tropiques. Depuis 1991 pour le premier, et 1995 pour le second, B. Francou et ses collègues évaluent chaque mois le volume de la glace dans la partie basse des glaciers : ils mesurent la hauteur émergente de balises fichées dans la glace et disposées en réseau dans cette zone du glacier. Ils ont ainsi estimé la différence entre la quantité d'eau reçue sous forme de précipitations solides et celle perdue par la fonte

et par la sublimation de la glace. Pour les périodes antérieures à ces mesures, les glaciologues ont réalisé ces «bilans de masse» d'après des photographies aériennes et des documents d'archives.

Les résultats montrent que l'avenir des petits glaciers andins est compromis. Depuis dix ans, Chacaltaya a perdu 1,4 mètre d'eau par an (l'équivalent en épaisseur moyenne d'eau répartie sur toute la surface du glacier du volume de la glace fondue). Entre 1991 et 1998, son épaisseur totale a diminué de 40 pour cent et son volume des deux tiers. Rien qu'entre 1992 et 1998, sa surface s'est rétrécie de 40 pour cent et ne représente plus, aujourd'hui, que 10 pour cent de celle de 1940. Si cette évolution se poursuit, Chacaltaya aura disparu d'ici 10 à 15 ans.

Antizana évolue de la même façon, mais à un rythme moins rapide : depuis 1956, il a perdu près du quart de sa surface. Dans les années 1990, les pertes d'eau se sont accrues, pour atteindre 0,6 mètre d'eau par an en moyenne.

Le recul des glaciers s'est-il intensifié récemment? Des études plus anciennes portant sur d'autres glaciers andins de la zone tropicale, notamment au Pérou, montrent que l'accélération de ce phénomène date du début des années 1980. Les résultats obtenus sur Antizana et Chacaltaya le confirment : ce dernier a perdu 0,2 mètre d'eau par an entre 1940 et 1963, 0,6 de 1963 à 1983 et 0,9 depuis 1983. La surface de l'Antizana s'est, pour sa part, réduite trois fois plus vite entre 1993 et 1998 qu'entre 1956 et 1993. Globalement, la perte de volume d'eau des deux glaciers a été trois à cinq fois plus élevée au cours de la dernière décennie que pendant les précédentes.

En étudiant le contexte climatique de ce recul exceptionnel des glaciers, les glaciologues ont découvert qu'il était relié aux événements El Niño et La Niña, respectivement les phases chaudes et les phases froides d'un phénomène qui touche le climat global : les bilans mensuels sur

les glaciers montrent que la fonte a été maximale pendant ou juste après les événements El Niño, notamment les événements particulièrement intenses de 1991-1992 et de 1997-1998, qui ont encadré une période chaude anormalement longue de 1991 à 1995. En revanche, pendant les événements La Niña, la perte d'eau a diminué ou s'est arrêtée. C'est le cas d'Antizana, dont la fonte a pratiquement cessé depuis le milieu de l'année 1998, quand un événement La Niña s'est déclenché et a perduré. En 1999 et 2000, Antizana a même gagné de la glace, avançant de 40 mètres sur les pentes de la montagne. Ainsi, cette étude confirme que les glaciers proches de l'Équateur réagissent davantage et plus vite aux variations climatiques liées au phénomène El Niño que ceux de Bolivie ou du Pérou.

La même équipe a aussi étudié le glacier Zongo, proche de Chacaltaya en Bolivie, mais de plus grande taille et plus élevé (il culmine à 6 000 mètres) : il réagit de façon semblable aux oscillations climatiques du Pacifique. Ainsi, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements El Niño observée depuis plus de 20 ans, expliquerait, du moins en grande partie, la récente accélération du recul des glaciers tropicaux andins.



Le glacier Antizana, au Nord de la Bolivie.

Échanges d'énergie dans l'atome

Dans certaines conditions, les électrons et le noyau d'un même atome échangent de l'énergie.

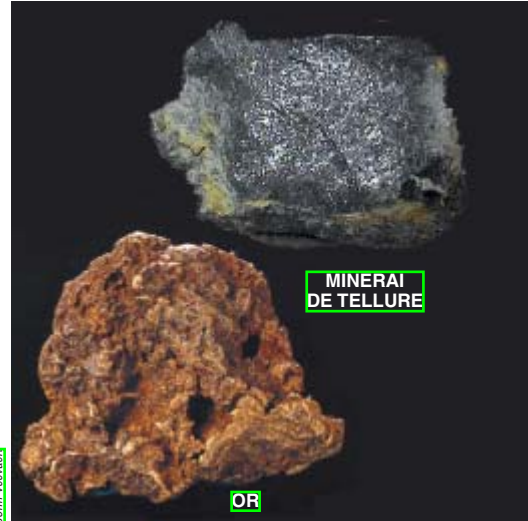
Le principe des vases communicants s'appliquerait-il au noyau atomique et à son cortège d'électrons ? Habituellement, le noyau et les électrons n'interagissent pas, car leurs domaines d'énergie sont très séparés. Pourtant, dans certains atomes, les électrons et le noyau échangent de l'énergie : parfois, quand un électron se désexcite, au lieu d'émettre un photon, il transmet son énergie excédentaire au noyau, excité à son tour. Inversement, quand le noyau est excité, il cède une partie de son énergie à un électron. Pour la première fois, nous avons observé, en même temps qu'une équipe japonaise, ces phénomènes très rares de transfert d'énergie.

Ces échanges sont rares, car les énergies des nucléons et des électrons sont très différentes. Selon les lois de la mécanique quantique, les électrons se répartissent sur des états d'énergie. Lorsqu'un électron passe d'un état à un autre, il absorbe ou émet une énergie dite de transition, égale à la différence des énergies entre les deux états considérés. De même, un noyau passe d'un état fondamental à un état excité, quand il absorbe une quantité d'énergie égale à la différence des

énergies entre deux états autorisés. Les énergies les plus élevées des électrons, ceux situés le plus près du noyau, sont de l'ordre de quelques milliers d'électronvolts, tandis que les énergies de transition entre deux états du noyau sont de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'électronvolts.

Ainsi, l'atome est considéré comme une superposition de deux systèmes quantiques indépendants. Cependant, dans certains isotopes, les énergies de transition dans le noyau et dans le cortège électronique sont du même ordre de grandeur. Dans ces conditions, le noyau et le cortège électronique ne sont plus deux systèmes quantiques indépendants : ils interagissent et échangent de l'énergie.

Expérimentalement, les énergies de transition dans le noyau et dans le cortège électronique doivent être ajustées avec une très grande précision. Pour cela, nous avons choisi un atome de tellure 125 (un isotope naturel très rare du tellure) et nous lui avons enlevé 45 électrons. Nous avons ainsi formé un ion tellure très chargé (il porte 45 charges positives), où seuls sept électrons, les plus proches du noyau, subsistent. Or, les états d'énergie des électrons les plus proches du noyau étant plus distants que ceux des électrons périphériques, les énergies de transition sont plus élevées et se rapprochent de certaines en jeu dans le noyau, qui sont de l'ordre de 35 milliers d'électronvolts dans ce noyau inhabituel. En outre, l'absence des électrons périphériques modifie les états d'énergie des électrons de cœur et les deux énergies de transition (nucléaire

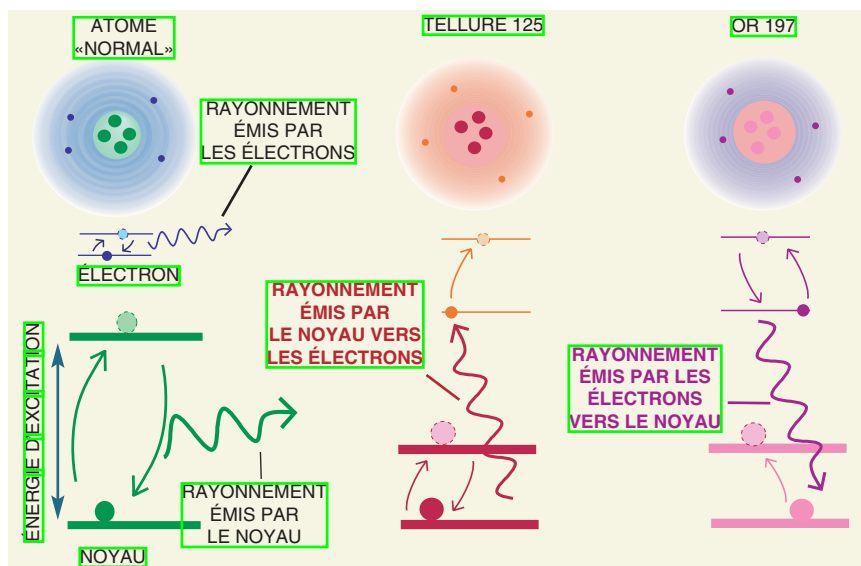


et atomique) sont ainsi ajustées avec une excellente précision.

Nous avons obtenu ces ions au grand accélérateur national pour les ions lourds, le GANIL, à Caen. Pour ce faire, on envoie à grande vitesse (un tiers de la vitesse de la lumière) des atomes de tellure sur une cible très mince. Les collisions des atomes avec la cible arrachent des électrons et excitent quelques noyaux de tellure, qui retrouvent leur état initial au bout de quelques milliardièmes de seconde. Pendant cette fraction de seconde, les noyaux des ions tellure, excités par les collisions, se désexcitent en émettant de l'énergie qu'ils cèdent au cortège électronique (les noyaux émettent un rayonnement gamma). Les électrons sont alors excités temporairement, puis ils retrouvent leur état initial en émettant des photons X. Ce mode de désexcitation d'un noyau, jamais observé jusqu'alors, est nommé BIC (pour *Bound Internal Conversion*, conversion entre états liés).

Simultanément, le mécanisme inverse, c'est-à-dire l'excitation du noyau grâce à l'énergie de désexcitation des électrons (effet NEET, pour *Nuclear Excitation by Electronic Transition*, ou excitation nucléaire par transition électronique), recherché depuis longtemps, a été mis en évidence par l'équipe japonaise de S. Kishimoto, de l'Université de Tokyo, dans le noyau d'or 197. Ces physiciens ont utilisé un rayonnement synchrotron pour exciter les électrons de l'atome. Dans la majorité des cas, le cortège électronique excité de l'or revient dans son état fondamental en émettant un rayonnement X, mais, parfois, le retour vers l'état fondamental se produit sans émission de rayonnement : le noyau d'or absorbe l'excès d'énergie des électrons et passe de son état fondamental vers son premier état excité. Il se désexcite ensuite en émettant des photons gamma. Ces échanges d'énergie sont-ils les prémices d'une nouvelle forme de stockage d'énergie au cœur même des atomes ?

Jean-François CHEMIN, Centre d'études nucléaires de Bordeaux-Gradignan



Dans un atome classique (à gauche), les énergies d'excitation du noyau sont beaucoup plus élevées que celles des électrons. En revanche, dans certains atomes, les énergies en jeu sont du même ordre de grandeur : le noyau et ses électrons échangent alors de l'énergie. Ainsi, dans l'ion tellure 125 (au centre), l'énergie de désexcitation du noyau sert à exciter le cortège électronique, et dans l'or 197 (à droite), les électrons se désexcitent en transférant leur énergie excédentaire au noyau.

Riche hérédité islandaise

Malgré leur isolement, les Islandais auraient la plus grande diversité génétique d'Europe.

Le gouvernement de l'Islande s'est livré, il y a deux ans, à une transaction commerciale hors du commun. Il a vendu à l'entreprise *deCODE Genetics* l'accès aux données génétiques et médicales des 275 000 Islandais. Ainsi, pour quelques millions de dollars, la société a obtenu, pour 12 ans, le droit exclusif d'étudier les liens entre les maladies héréditaires et le patrimoine génétique de chacune des familles d'Islande. Grâce à ces données, elle espère trouver les gènes qui participent à l'apparition de maladies aussi diverses que le psoriasis, le cancer du sein ou l'infarctus.

Pourquoi cette société s'intéresse-t-elle tellement aux Islandais ? Étant donné leur isolement, les généticiens de l'entreprise présument qu'une grande consanguinité doit régner dans la population islandaise : cette homogénéité génétique est supposée faciliter l'étude statistique qu'ils veulent entreprendre, car, à coup sûr, elle leur permettra d'évaluer les effets de tel ou tel gène dans un contexte génétique homogène.

Einar Arnason et ses collègues de l'Université de Reykjavik ont voulu vérifier que l'hypothèse était correcte. Ils ont évalué la variabilité génétique d'un échantillon de 73 Islandais qu'ils ont considérés comme représentatifs de la population générale, puis ils ont comparé le résultat avec ceux obtenus dans d'autres pays européens. Force a été de constater que la diversité génétique des Islandais est tout à fait comparable à celle des divers pays d'Europe ; elle semble même lui être supérieure !

Le résultat surprend ! Il tient sans doute aux vagues successives de colonisation. Ainsi, il y a 1 100 ans, les Norvégiens occupèrent l'Islande. Puis, des Vikings de passage ont sans doute apporté du sang neuf. Ultérieurement, nombre d'Islandais ont quitté l'île à la recherche de travail, puis ont ramené les familles qu'ils avaient fondées dans d'autres lieux. Ces apports expliqueraient la grande diversité génétique qui caractérise curieusement la grande île glacée perdue dans les brumes du Nord.

L'entreprise *deCODE Genetics* a au moins une consolation : en Islande, la recherche sur la transmission des maladies génétiques est facilitée par l'engouement des Islandais pour la généalogie ; ils connaissent parfaitement leurs ascendants sur de nombreuses générations.

Clio

l'art de voyager

Des conférenciers historiens ou spécialistes d'art vous feront partager leur passion.

Des voyages en petits groupes pour profiter des découvertes dans les meilleures conditions.

Plus de 200 circuits vers 80 pays, riches en trésors artistiques ou archéologiques.

27, rue du Hameau - 75015 Paris
Tél : 01 53 68 82 82 - Fax : 01 53 58 82 60
Lic. 075 95 0468 - Mél : information@clio.fr

Je souhaite recevoir gratuitement
le catalogue général des circuits Clio.

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

L'astrarium de Giovanni Dondi

EMMANUEL POULLE

La première horloge montrant le mouvement des planètes, tel que Ptolémée l'avait postulé, date du XIV^e siècle. Elle avait disparu, mais a été reconstruite d'après le manuscrit laissé par son inventeur.

La position des planètes dans le ciel a préoccupé les savants depuis l'Antiquité. Qu'ils s'y soient intéressés en tant qu'astrologues ou qu'astronomes, ils ont toujours tenté de respecter une démarche scientifique. Avant l'adoption du système héliocentrique, au XVII^e siècle, et la découverte de la forme elliptique des orbites par

courues par les planètes, trois étapes ont jalonné la prévision de leurs positions dans le ciel. Au II^e siècle, l'astronome grec Ptolémée élabore une décomposition géométrique des mouvements irréguliers des planètes en plusieurs mouvements réguliers. Il exprime ces mouvements sous forme de tables qui permettent de calculer les positions des

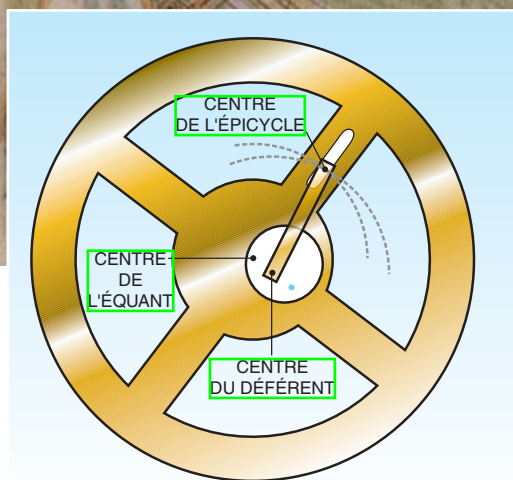
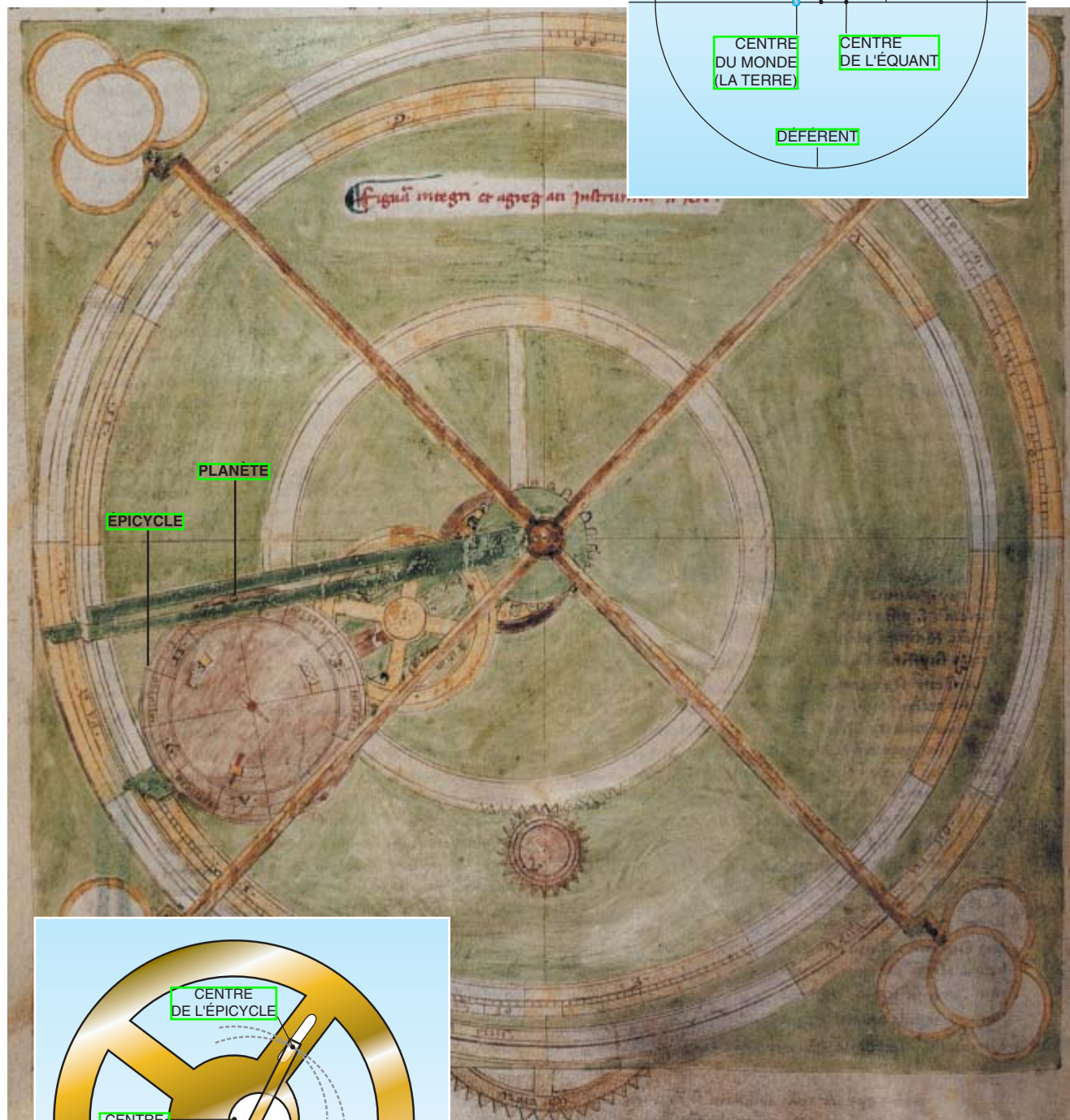
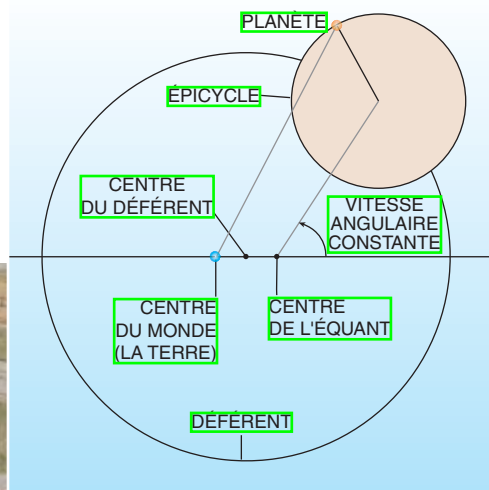
planètes à n'importe quelle date du calendrier. Au XIII^e siècle, le mathématicien italien Campanus de Novare imagine un instrument, l'équatoire, qui donne les mêmes résultats sans calculs : les disques dont il est constitué sont agencés de façon à former une représentation concrète des constructions géométriques de Ptolémée. Enfin, un siècle plus tard, Giovanni Dondi simplifie encore la procédure en concevant et en réalisant un équatoire mû automatiquement par un mécanisme d'horlogerie, qu'il nomme «astrarium». Cette œuvre unique est d'autant plus remarquable qu'elle a été réalisée à une époque où l'horlogerie et la conception des équatoires sont encore mal maîtrisées.

Au Moyen Âge, une horloge comporte un élément moteur (la chute d'un poids), un «foliot» qui freine cette chute et un engrenage qui transforme le mouvement du foliot en un décompte du temps. L'horlogerie définie par l'association de ces trois éléments remonte à la fin du XIII^e siècle, plus précisément aux années 1280 (le mot *horologium*, bien plus ancien, désigne seulement un dispositif donnant l'heure, par exemple un cadran solaire). Dès le début du XIV^e siècle, l'engouement pour les horloges est considérable :



1. La reconstruction de l'astrarium de l'Observatoire de Paris, (ci-contre) respecte scrupuleusement les instructions de Dondi. L'astrarium est une tour polygonale à sept côtés, qui porte les mécanismes des sept planètes (le Soleil, la Lune et les planètes que l'on connaît à l'époque : Mercure, Venus, Mars, Jupiter et Saturne). Le moteur d'horlogerie (dessiné ci-dessus) est installé au centre : le poids est accroché à la ficelle blanche, enroulée autour du tambour. Il fait tourner la «roue de l'année» (horizontale, sous les cadrans planétaires) d'un cran chaque jour. Ce mouvement actionne à son tour les mécanismes des sept planètes.

2. Selon la théorie de Ptolémée, qui fit autorité jusqu'à la Renaissance (*ci-contre*), la Terre est au centre du monde et chaque planète parcourt un petit cercle, l'épicycle, dont le centre suit un grand cercle, le déférent, excentrique par rapport au centre du monde. Le mouvement de la planète sur son épicycle est régulier. En revanche, le mouvement du centre de l'épicycle sur le déférent n'est régulier ni par rapport au centre du déférent ni par rapport au centre du monde, mais par rapport à un troisième point, dit centre de l'équant. Les centres du monde, du déférent et de l'équant sont alignés et le deuxième est situé à égale distance des deux autres.



3. Le centre de l'épicycle (*ci-contre*) tourne autour du centre du déférent, mais son mouvement est régulier par rapport au centre de l'équant : il est fixé sur une règle reliée au centre du déférent, mais entraîné par une roue tournant autour du centre de l'équant (dont le mouvement, actionné par le mécanisme d'horlogerie, est régulier). Il glisse dans une fente ménagée le long d'un rayon de la roue de l'équant pour encaisser les variations de longueur. Sur le cadran de Mercure (*ci-dessus*), on aperçoit un autre exemple de ce système de fente, qui permet à l'aiguille, dite du vrai lieu, d'être entraînée par la planète et d'indiquer sa position dans le zodiaque, sur la graduation du pourtour du cadran.

on apprécie d'abord les machines qui sonnent les heures, puis celles qui les affichent. L'idée naît alors de fabriquer des horloges astronomiques qui représentent, en plus du mouvement quotidien du Soleil (elles indiquent l'heure), son mouvement annuel. Dès leur apparition, les horloges astronomiques connaissent une grande vogue et contribuent, tout au long du XIV^e siècle, à la promotion de l'horlogerie elle-même. Vers 1350, Jacopo Dondi, le père de Giovanni Dondi, réalise pour sa ville de Padoue une horloge astronomique publique installée sur le Palais du Capitaine (elle y est encore, mais a subi de nombreuses transformations au cours de son histoire). Quant à l'équateur que Campanus avait imaginé vers 1260, il connaît également une certaine notoriété au XIV^e siècle, après son adoption par l'enseignement universitaire.

L'astrarium est la première horloge planétaire, conçue comme un équateur mécanisé où les mouvements des planètes sont mus par un mécanisme d'horlogerie. Dondi commence les calculs préalables à la conception de l'astrarium en 1365. Il met ensuite 16 ans à le réaliser. Il l'achève vers 1380, à un moment où les événements politiques le contraignent à quitter Padoue (l'Italie est alors organisée en plusieurs cités-états indépendantes dont les rivalités entraînent des troubles). Il se retire à Pavie, en Lombardie, en emportant son précieux chef-d'œuvre qui aurait dû faire la gloire de Padoue. Il reçoit des visiteurs illustres et enthousiastes qui considèrent

l'horloge comme la huitième merveille du monde et ne sont apparemment guère déçus de la trouver en panne : la documentation sur l'histoire de l'astrarium à Pavie se ramène, hélas, à des réparations répétées qui ne parviennent pas à le faire fonctionner correctement. Ses responsables ont dû se lasser de ces soins inutiles, car, à partir du début du XVI^e siècle, on perd toute trace de l'astrarium, qui a probablement fini ses jours à la décharge, comme toutes les vieilles horloges hors service.

Lors de la construction de l'astrarium, Dondi avait rédigé une sorte de compte-rendu d'atelier où il a décrit les étapes de sa réalisation. Grâce à ce document, le seul de ce genre qui nous vienne du Moyen Âge, nous connaissons tous les détails techniques de la construction de l'astrarium et nous avons reconstitué cet instrument unique.

L'astrarium est une tour polygonale à sept côtés d'environ 1 mètre de hauteur (voir la figure 1). Dans la partie inférieure se trouve le mécanisme d'horlogerie, installé au centre, ainsi qu'une horloge, sur l'une des faces : c'est une horloge ordinaire, à ceci près que le cadran comporte 24 graduations correspondant aux heures et que c'est lui qui tourne devant un repère fixe. Dans la partie supérieure se trouvent sept cadrans, sur chacune des faces, qui portent les mécanismes des sept planètes (le Soleil, la Lune, ainsi que les planètes que l'on connaît à l'époque : Mercure, Venus, Mars, Jupiter et Saturne). Chaque mécanisme est indépendant des autres. L'astrarium se veut le reflet du

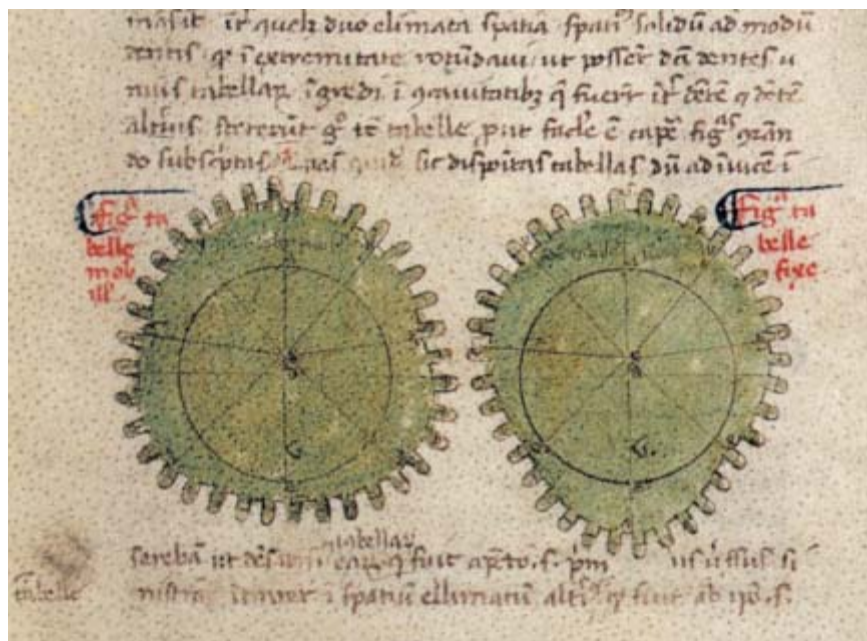
monde. Depuis Ptolémée, on admettait que le mouvement quotidien de la voûte céleste est le moteur de tous les autres mouvements célestes. De même, le mécanisme d'horlogerie commande tous les mécanismes planétaires.

Comment l'astrarium fonctionne-t-il ? Le mécanisme d'horlogerie fait tourner une grande couronne horizontale qui compte 365 dents, dite roue de l'année, située à la jonction de la partie inférieure et de la partie supérieure, sous les cadrans planétaires (voir la figure 1). Son centre est sur l'axe de la tour. Elle est le moteur commun de tous les mécanismes planétaires portés par les cadrans (sauf celui de la Lune). Elle avance d'un cran par jour, actionnant chaque mécanisme planétaire.

Les mécanismes planétaires des cadrans reproduisent les mouvements des planètes en matérialisant la construction géométrique de Ptolémée : la planète parcourt un petit cercle, l'épicycle, dont le centre parcourt un grand cercle, le déferent, excentrique par rapport au centre du monde, c'est-à-dire par rapport à la Terre. La vitesse angulaire du centre de l'épicycle sur le déferent est uniforme par rapport à un troisième point, dit centre de l'équant (voir la figure 2). Giovanni Dondi reproduit à petite échelle ce que l'on suppose alors être le mouvement des planètes. Il résout trois types de problèmes posés par la mécanisation : le respect de la périodicité, l'existence de deux excentricités (celle du centre du déferent et celle du centre de l'équant) et le mouvement épicyclique.

Afin que les périodicités des mouvements des planètes soit respectées, il fait des calculs compliqués pour concevoir des trains d'engrenages situés derrière et sur chaque cadran, qui font tourner respectivement la roue de l'équant et la planète sur l'épicycle aux vitesses voulues. Comme Dondi a limité le nombre de roues et de pignons, ses trains d'engrenages sont peu précis. D'ailleurs, il en a bien conscience puisqu'il complète son compte-rendu d'atelier par une longue liste d'instructions concernant la fréquence avec laquelle il convient d'avancer ou de retarder manuellement les mécanismes planétaires.

En revanche, Dondi résout avec brio la difficulté liée à l'excentricité en respectant, sans aucune concession, les règles de la théorie ptoléméenne. Comme le mouvement du centre de l'épicycle n'est régulier que par rapport au centre de l'équant, l'axe de l'épicycle est entraîné par une roue tournant autour de ce centre (actionnée par le mécanisme d'horlogerie). Le problème se pose alors de maintenir l'axe de l'épicycle à distance constante



4. Dondi a imaginé des aménagements particuliers pour tenir compte des caractéristiques propres de chaque planète notamment deux roues des engrenages qui transmettent son mouvement épicyclique à la Lune ont des contours irréguliers et complémentaires : l'une a un côté aplati (à gauche) alors que l'autre a un côté plus bombé (à droite).

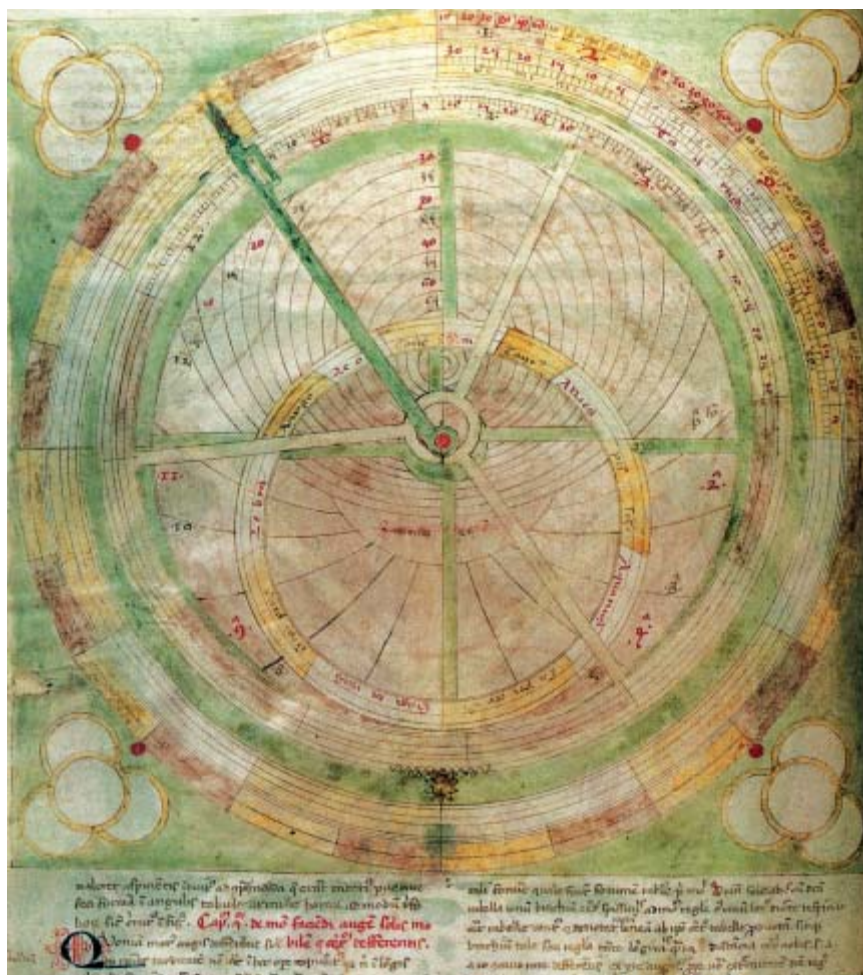
du centre du déferent : une règle, qui pivote autour du centre du déferent, porte l'axe de l'épicycle. D'autre part, ce dernier passe dans une fente ménagée dans l'un des rayons de la roue de l'équant, roue motrice de son mouvement (voir la figure 3). Ainsi, le centre de l'épicycle reste à distance constante du centre du déferent, grâce à la règle du déferent, et tourne régulièrement autour du centre de l'équant, grâce à la roue de l'équant.

Les trains d'engrenages responsables du mouvement épicyclique doivent être organisés autour du centre de l'équant (puisque c'est par rapport à lui que les vitesses angulaires relatives au mouvement de la planète sont uniformes). La première roue, fixe, est centrée sur le déferent et les autres roues sont portées par l'un des rayons de la roue de l'équant. Pour que ces roues continuent d'engrener sur la roue fixe, quelle que soit la distance du centre de l'épicycle au centre de la roue de l'équant, tout le support du train, et par conséquent l'axe de l'épicycle, coulisse dans la fente précédente. Ce support est une réglette où sont fixés les axes des roues intermédiaires et l'axe de l'épicycle. Pour tenir compte des caractéristiques propres aux théories ptoléméennes de Mercure et de la Lune, Dondi a imaginé des aménagements particuliers : par exemple, le train épicyclique de Mercure comporte deux roues ovales, et celui de la Lune deux roues de contours irréguliers et complémentaires (voir la figure 4).

Comment les mécanismes planétaires indiquent-ils la position des planètes dans le ciel ? Avec une aiguille pivotant autour du centre du monde et percée d'une fente où passe le corps de la planète. Cette aiguille est ainsi entraînée par le mouvement de la planète et indique sa position sur la graduation fixe du pourtour du cadran, qui représente le zodiaque (voir la figure 3).

Le cadran du Soleil est différent de celui des autres planètes. Il est actionné directement par l'horloge ordinaire (dans la partie inférieure de la tour) qu'il surplombe. Le mouvement du Soleil est extrêmement simple (il n'a ni épicycle ni déferent). Il constitue un astrolabe mécanisé, l'astrolabe étant un instrument qui montre à la fois le mouvement quotidien du Soleil et son mouvement annuel dans le zodiaque (voir la figure 5).

Première horloge planétaire de l'histoire, l'astrarium inspira pendant 200 ans les concepteurs des modèles suivants. Ainsi, certains dispositifs sont quasiment devenus de règle, notamment les roues autour du centre de l'équant et les fentes aménagées pour faire varier la distance entre deux points en liaison mécanique. En revanche, les roues ovales et les roues



5. Le cadran du Soleil est un astrolabe mécanisé, qui montre à la fois le mouvement quotidien du Soleil et son mouvement annuel dans le zodiaque.

à contour irrégulier ne paraissent pas avoir fait école, peut-être parce qu'elles ont été tenues pour responsables des médiocres prestations de l'astrarium.

L'existence du compte-rendu d'atelier décrivant la construction de l'astrarium, conservé à la bibliothèque capitulaire de Padoue, a motivé trois entreprises de reconstruction. Cependant, les deux premières n'ont pas respecté en tous points les instructions de Dondi. Grâce à une bonne compréhension de son texte qui suppose des compétences à la fois en paléographie, en latin et en astronomie médiévale, mes collègues et moi-même avons réalisé une reconstruction fidèle de l'astrarium, conservée à l'Observatoire de Paris.

Elle est en laiton, comme l'original. Au Moyen Âge, on usait mécaniquement les dents des engrenages des horloges pour leur donner la forme adéquate. À cette méthode, nous avons préféré la conception assistée par ordinateur, pour tracer la forme des dents des roues, que Dondi n'a pas précisée. Nous avons vérifié leur bon fonctionnement sur des maquettes en contre-plaqué et avons

notamment constaté que les roues dont le contour n'est pas circulaire ne constituaient pas un obstacle à la bonne marche de l'astrarium, sous réserve que la forme des dents soit adaptée. Pour supprimer les frottements de la roue de l'année, nous l'avons installée sur un roulement à billes. Si l'astrarium était génial sur le plan scientifique, cette reconstruction a montré qu'il n'a sans doute jamais bien fonctionné. L'admiration qu'ont éprouvée ses visiteurs, au XV^e siècle, ne s'adressait pas tant à ce qu'ils voyaient qu'à ce qu'ils espéraient ou rêvaient voir.

Emmanuel POULLE est historien des sciences, directeur honoraire de l'École des chartes et secrétaire perpétuel de l'Académie internationale d'histoire des sciences.

John NORTH, *The Astrolabe*, in *Scientific American*, n° 230, pp. 96-106, 1974.

Emmanuel POULLE, *Pour une typologie de l'horlogerie astronomique médiévale*, Académie des inscriptions et belles lettres, Comptes-rendus, pp. 635-662, 1997.

Grossesse et hypertension

FRANÇOISE FERRE • BRUNO CARBONNE

Au XXI^e siècle, dans les pays industrialisés, et notamment en France, la mortalité des femmes enceintes reste encore trop élevée. Aussi les obstétriciens et les biologistes tentent-ils d'élucider les raisons de cet apparent archaïsme médical. Une forme d'hypertension, la prééclampsie, est au banc des accusés.

Chez les Égyptiens, le placenta, organe très élaboré, grâce auquel s'établit le premier dialogue entre la mère et son enfant, était conservé. Considéré comme faisant partie du nouveau-né, dont il était séparé lors de la naissance, il était son «âme externe». Il servait à prévoir, alors que la mortalité infantile était élevée, si le nouveau-né vivrait : on broyait dans du lait un petit morceau de son placenta et on lui donnait à boire le mélange. S'il vomissait ce «principe de vie», il mourrait ; s'il l'avalait, il vivrait. Ainsi, les Anciens avaient déjà compris que cet «organe», qui, chez la femme, représente le sixième du poids du nouveau-né, est essentiel au développement du fœtus.

On a récemment découvert que des anomalies siégeant dans le placenta sont responsables d'une pathologie spécifique de l'espèce humaine qui survient durant la grossesse : la prééclampsie, une forme d'hypertension grave. La prééclampsie est une cause importante de morbidité et de mortalité maternelles dans la plupart des pays développés. En France, elle concerne environ cinq pour cent des femmes qui n'ont pas encore eu d'enfant, et sa fréquence est supérieure lors des grossesses multiples, lors d'anomalies utérines et chez les femmes qui ont une hypertension et un dysfonctionnement rénal chroniques, avant même leur grossesse.

Elle est également plus fréquente lorsque la femme a plus de 38 ans lors de sa grossesse. La prééclampsie a des conséquences néfastes pour la mère, mais également pour le fœtus ; elle peut

notamment entraîner un retard de croissance intra-utérin, et représente la deuxième cause de morbidité et de mortalité périnatales.

En France, près de cinq pour cent des fœtus présentent un retard de croissance intra-utérin correspondant à un poids de naissance inférieur à 2 500 grammes, à terme. Même lorsqu'un nouveau-né ayant eu un retard de croissance intra-utérin (dû à une prééclampsie maternelle ou à une autre cause) récupère bien après la naissance, il risque d'avoir, quand il sera adulte, plus de troubles métaboliques et cardio-vasculaires que la moyenne de la population.

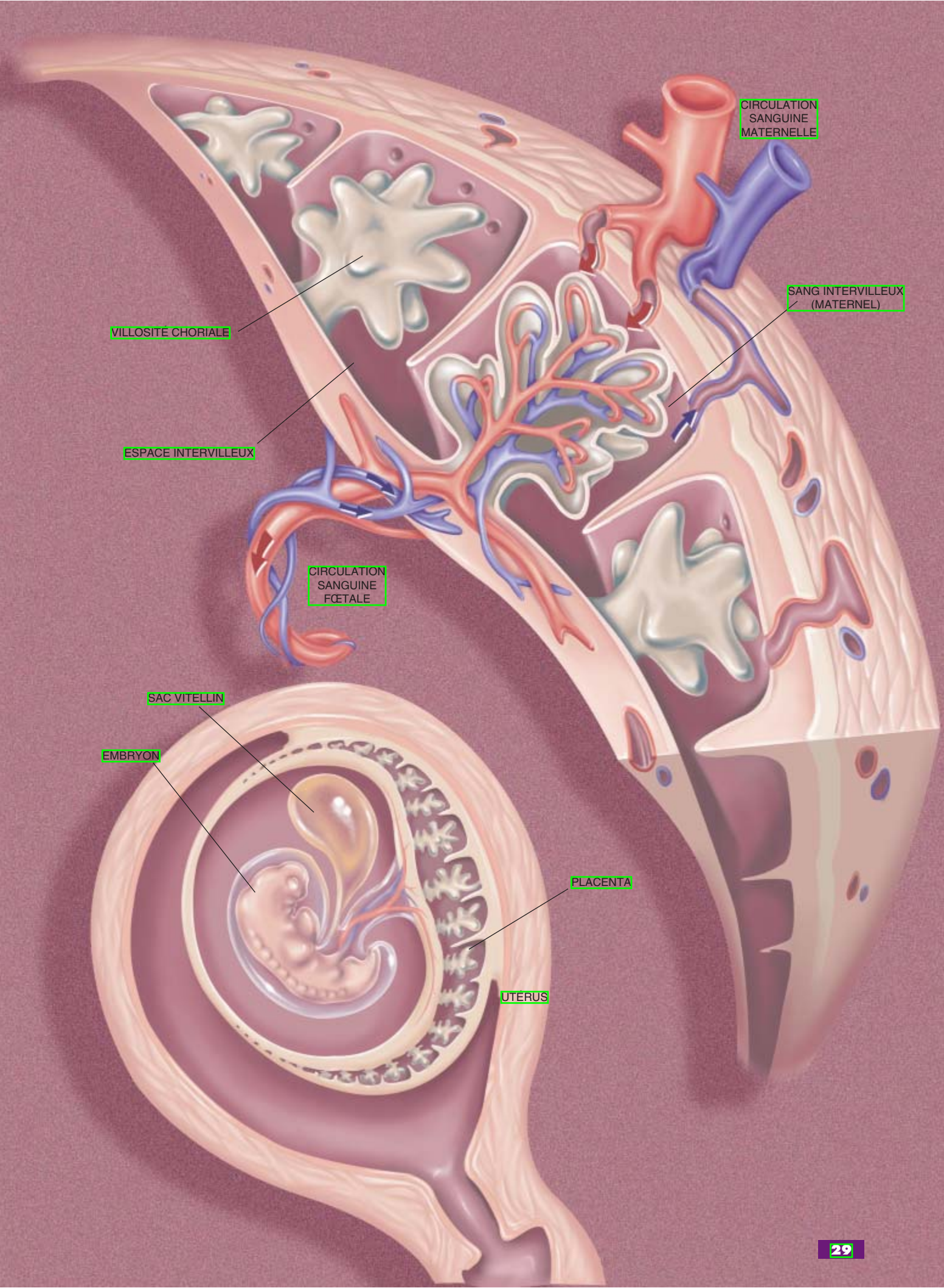
La prééclampsie est aussi l'une des principales causes de prématurité : pour éviter des complications fœtales graves liées à cette maladie, on doit souvent extraire l'enfant avant terme. Aujourd'hui, les traitements dont on dispose ne font pas régresser la pathologie sous-jacente, mais se contentent de réduire l'hypertension artérielle lorsqu'elle devient menaçante pour la mère. La prééclampsie de la mère et le retard de croissance intra-utérin de l'enfant surviennent parfois simultanément, mais aussi de façon indépendante : on peut observer une prééclampsie sans retard de croissance intra-utérin, et un tel retard, sans que les signes maternels de la prééclampsie soient encore apparus.

Après avoir décrit un peu plus en détail cette maladie, nous rappellerons le rôle essentiel du placenta dans l'établissement du dialogue materno-fœtal normal et, enfin, nous aborderons les mécanismes physiopathologiques à

l'origine de la maladie. Aujourd'hui, obstétriciens et biologistes sont persuadés que les pathologies vasculaires maternelles, les anomalies de la croissance fœtale et la prématurité spontanée sont intimement liées, et que les mêmes lésions placentaires sont à l'origine de la maladie de la mère et des troubles du développement du fœtus. Lorsque l'on saura dépister et traiter les femmes qui risquent de souffrir de prééclampsie, on aura fait un pas vers la sécurité de la grossesse et la diminution des risques courus par les femmes enceintes et par les nouveau-nés.

Normalement, la pression artérielle des femmes enceintes a tendance à diminuer au cours de la grossesse, en raison de l'augmentation du volume sanguin maternel. Certaines femmes peuvent être hypertendues à cause d'une hypertension artérielle préexistante, connue et généralement contrôlée par des médicaments, ou d'une hypertension artérielle gravidique pure (qui apparaît

1. LE PLACENTA se met en place dès le début de la grossesse et servira au fœtus de poumon, de rein et de tube digestif. Durant le premier mois (ci-contre, en bas), l'embryon se développe sur ses réserves, et les échanges avec la mère sont quasi inexistantes (sur cette représentation schématisée, l'embryon occupe, dans l'utérus, une place notablement plus importante que dans la réalité). En revanche, dès la fin du premier trimestre (détail en haut, à droite), le réseau sanguin maternel irrigue abondamment le placenta. Le réseau sanguin du fœtus s'est développé et le placenta est le lieu des échanges entre le sang fœtal et le sang maternel qui apporte l'oxygène et les éléments nutritifs au fœtus, et le débarrasse de ses déchets métaboliques.



durant la grossesse). Dans ce cas, les mécanismes physiopathologiques sont différents de ceux de la prééclampsie et leurs conséquences, tant maternelles que fœtales moins graves : la femme a une hypertension, mais le fœtus n'en souffre pas. Les obstétriciens distinguent ces différentes formes d'hypertension par des examens complémentaires, notamment par une analyse d'urine.

Hypertension et perte de protéines

En effet, chez les femmes ayant une prééclampsie, on constate, outre l'hypertension, une protéinurie, c'est-à-dire la présence de protéines dans les urines (normalement, on ne détecte pas de protéines dans les urines). Cette fuite de protéines est souvent associée à des œdèmes : la perméabilité des capillaires augmente de façon anormale, de sorte que du liquide quitte les vaisseaux, s'accumulant dans l'espace extracellulaire. Dans le glomérule rénal qui assure la filtration du sang et l'élimination des

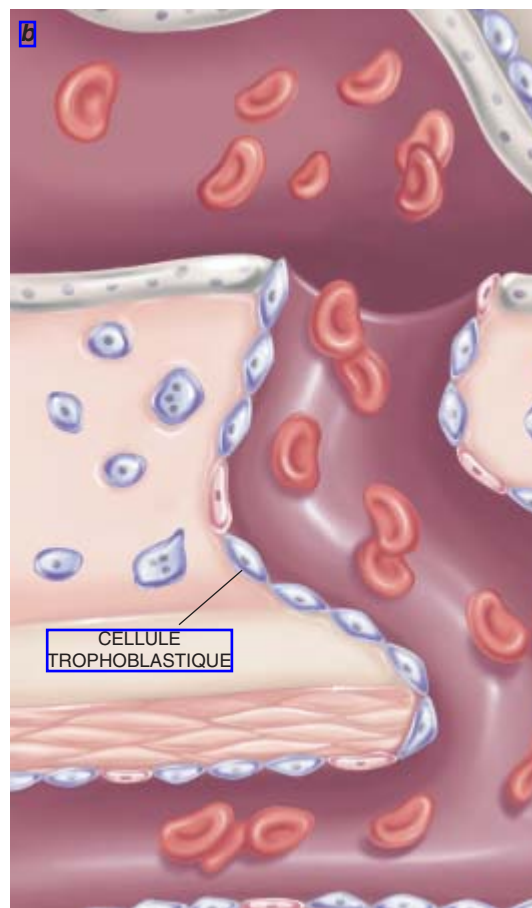
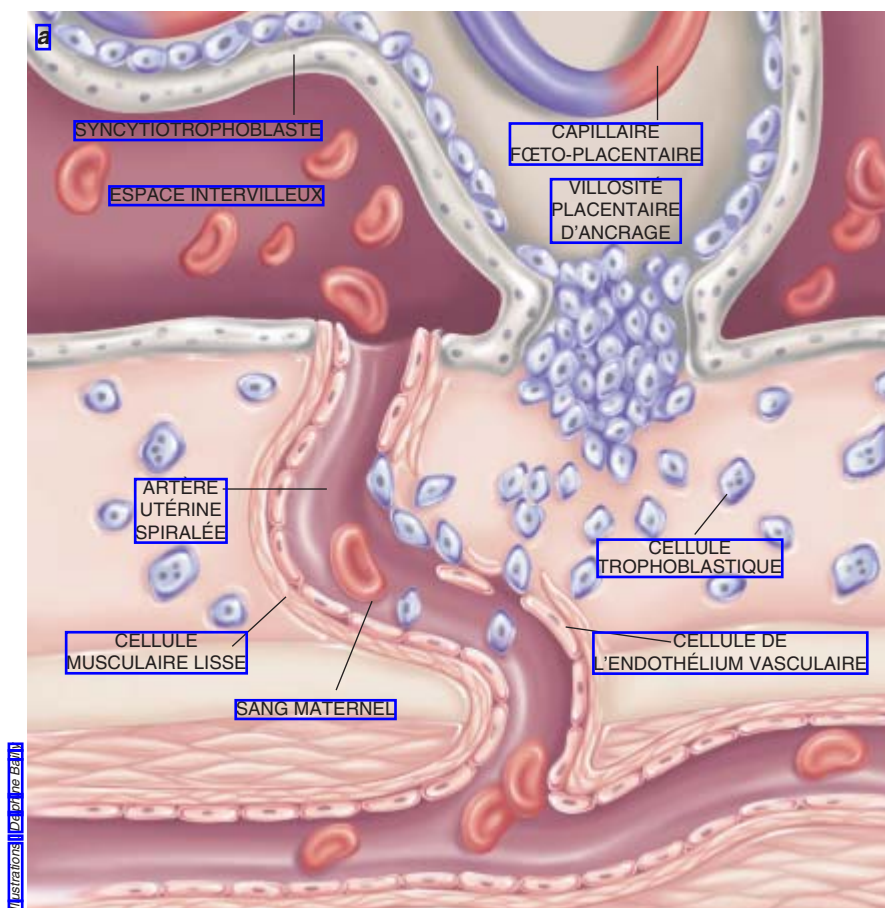
déchets vers les urines, la perméabilité excessive des capillaires autorise la fuite (normalement interdite) de protéines.

Une prééclampsie est généralement découverte tardivement, après la vingtième semaine de grossesse, souvent au cours du troisième trimestre. Les anomalies vasculaires responsables de l'hypertension et de la protéinurie engendrent des troubles vasculaires multiples : l'endothélium, la couche monocellulaire qui sépare le sang des autres constituants de la paroi des vaisseaux, est endommagé. De plus, l'aggrégation des plaquettes, les cellules sanguines qui participent à la coagulation, augmente et, avec elle, les risques de formation de caillots sanguins. Enfin, divers facteurs de coagulation ou qui favorisent la constriction des vaisseaux sont activés. Presque tous les organes maternels sont susceptibles d'être perturbés, et des troubles rénaux, neurologiques, hépatiques ou métaboliques risquent d'apparaître. Ils culminent avec l'éclampsie, marquée par l'apparition de convulsions à la fin de la gros-

sesse ou après l'accouchement. L'éclampsie est responsable de 10 à 15 décès, chaque année, en France.

La définition de la prééclampsie, auparavant nommée toxémie gravidique, a évolué. Aujourd'hui, elle est définie par l'association d'une hypertension artérielle supérieure ou égale à 140/90 millimètres de mercure et d'une protéinurie supérieure ou égale à 0,30 gramme par 24 heures. Les œdèmes, pourtant fréquents, ne sont plus indispensables au diagnostic de la maladie, car, en fin de grossesse, plus du quart des femmes enceintes ont des œdèmes. L'utilisation d'une définition internationale commune est nécessaire pour que les études menées dans les divers hôpitaux sur cette maladie puissent être utilisées par tous.

Aujourd'hui, tout un ensemble de résultats indique que l'hypertension n'est pas la cause de la maladie : elle n'est que la conséquence d'une anomalie du dialogue qui s'établit très tôt entre la mère et son enfant par l'intermédiaire du placenta.



2. LE SYSTÈME VASCULAIRE UTÉRIN MATERNEL est remanié au cours de la grossesse. Peu après l'implantation complète de l'embryon dans la muqueuse de l'utérus (entre la deuxième et la troisième semaine), certaines cellules trophoblastiques, nommées extravillositaires ou invasives (en bleu), se multiplient et commen-

cent à migrer. Elles atteignent les vaisseaux sanguins maternels (a), s'agglutinent dans les artères, prennent la place des cellules de l'endothélium vasculaire, et détruisent les cellules de la couche musculaire lisse qui assurent la contraction des vaisseaux et autorisent leur dilatation. Dans le cas normal (b), cette stratégie se traduit par

La formation du placenta

Quatre ou cinq jours après une fécondation, le préembryon, constitué d'une centaine de cellules, flotte dans l'utérus. La substance, nommée zone pellucide, qui le recouvre commence à se dégrader et laisse s'échapper le blastocyste, une sphère remplie de liquide et formée de grosses cellules aplaties (les cellules du trophoblaste) et d'un amas de cellules arrondies, nommé embryoblaste. Les cellules trophoblastiques prendront part à la formation du placenta, et l'embryoblaste donnera l'embryon.

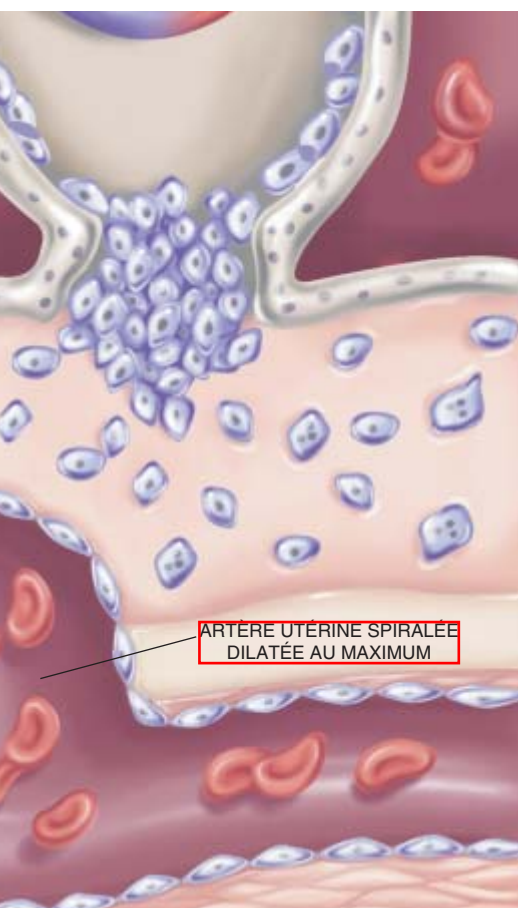
Environ six jours après la fécondation, l'implantation commence, généralement dans le haut de l'utérus, là où sont émis les signaux chimiques appropriés. Les cellules trophoblastiques situées à l'extérieur de l'embryoblaste adhèrent à l'endomètre, la paroi interne de l'utérus, et se mettent à sécréter des enzymes qui agissent sur la surface de l'endomètre. Le trophoblaste commence à proliférer et forme deux couches distinctes. La couche interne

est constituée de cellules mononucléées, les cytotrophoblastes ; la couche externe est formée d'un syncytium (le syncytiotrophoblaste) qui résulte de la fusion de certaines cellules trophoblastiques qui ont perdu leur capacité de se diviser. Le syncytiotrophoblaste envahit l'endomètre, tandis que le blastocyste s'enfonce dans la paroi utérine.

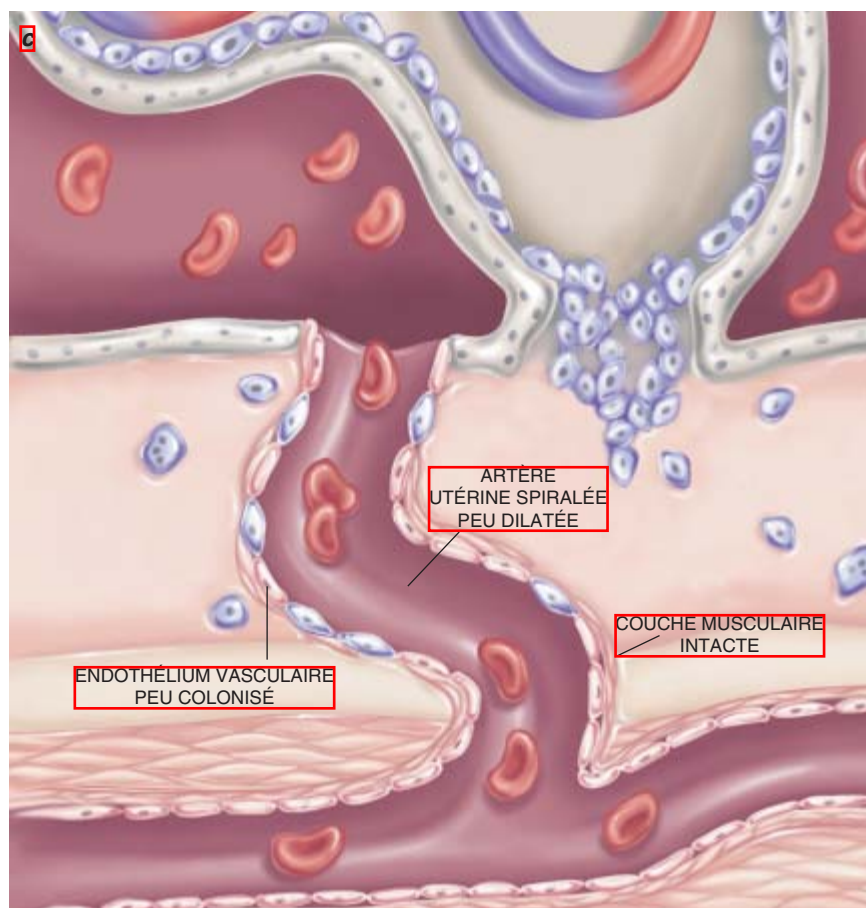
L'implantation est généralement terminée le quatorzième jour après l'ovulation, c'est-à-dire le jour où l'endomètre commencerait normalement à desquamer. Si la menstruation commençait, elle délogerait l'embryon, et ce serait la fin de la grossesse. Durant les premières semaines, l'embryon implanté se nourrit essentiellement de ses propres réserves. Ensuite, le placenta commence à lui fournir activement des nutriments et de l'oxygène, et à éliminer ses déchets métaboliques. En plus de ce rôle essentiel dans les échanges fœto-maternels, le placenta protège le fœtus contre un rejet maternel. Il produit des hormones et une grande variété de substances biologiquement actives.

La structure du placenta se modifie sans cesse au cours de la gestation. À partir du neuvième jour, des fentes, puis des lacunes se créent dans la structure trophoblastique (le syncytiotrophoblaste et le trophoblaste), préluant à la formation des villosités primaires. Par ailleurs, l'endomètre subit une érosion qui crée des cavités, les lacunes maternelles. Vers le vingt-deuxième jour, ces lacunes maternelles fusionnent avec les lacunes trophoblastiques. Dans les travées qui les séparent, les cellules du cytotrophoblaste prolifèrent et finissent par former des villosités chorionales secondaires, dotées de propriétés dites angiogéniques, qui leur permettent d'acquérir leurs propres vaisseaux sanguins. Ces villosités constituent les unités structurales et fonctionnelles du placenta, qui baignent dans les espaces intervillositaires, où se déverse le sang maternel (voir la figure 1).

C'est vers le vingtième jour de la gestation que le réseau vasculaire du placenta se raccorde aux vaisseaux ombilicaux. Ce réseau vasculaire



une dilatation maximale des artères maternelles, de sorte que l'afflux du sang nourricier vers le fœtus est maximal. Chez une femme prééclampsique (c), les cellules trophoblastiques n'assurent pas correctement leur fonction : elles ne détruisent pas la couche musculaire lisse et ne colonisent pas totalement l'endothélium vasculaire



maternel. Les artères maternelles sont peu dilatées, l'apport d'oxygène au fœtus est insuffisant et des réactions moléculaires locales anormales responsables de l'hypertension maternelle se mettent en place. On admet aujourd'hui que la prééclampsie résulte d'anomalies du placenta.

foeto-placentaire conditionne, par son développement, la croissance et la maturation des villosités choriales.

Ainsi, des divisions successives des villosités aboutissent, par un mécanisme de type fractal, à un réseau vasculaire foeto-placentaire extrêmement ramifié, au troisième trimestre de la grossesse. Les circulations maternelle et foetale sont indépendantes. Elles sont séparées par la «barrière placentaire» constituée de trois structures : le trophoblaste villositaire qui borde l'espace sanguin intervilloux, le tissu conjonctif interstitiel, et la paroi des capillaires de la circulation foeto-placentaire. À terme, cette surface d'échanges atteint près de 11 mètres carrés.

Du côté de la mère, on constate, au début de la grossesse, des modifications des vaisseaux sanguins utérins proches du site d'implantation. Les cellules trophoblastiques du placenta prolifèrent et certaines, qui deviennent invasives, franchissent la couche du syncytiotrophoblaste et forment des colonnes cellulaires qui s'enfoncent dans l'endomètre, et jusque dans la couche interne du muscle utérin. Ces cellules migrent également vers les vaisseaux utérins maternels les plus proches.

Au cours de leur progression dans les structures utérines maternelles, les trophoblastes établissent des interactions complexes avec les différents types cellulaires et avec la matrice extracellulaire. Après leur multiplication dans la lumière des artères utérines spiralées, les cellules trophoblastiques se substituent aux cellules endothéliales, aux cellules musculaires lisses et aux fibres élastiques qui les entourent (voir la figure 2a). Ces remaniements conduisent à des artères utérines maternelles dilatées (constituant le système vasculaire utéro-placentaire), insensibles aux agents vasoconstricteurs : le débit du sang maternel vers les espaces intervilloux est alors maximal. Cette infiltration met en œuvre de mécanismes permettant aux trophoblastes d'adhérer aux membranes cellulaires, de les dégrader localement et de migrer au travers des zones digérées.

L'adhésion des trophoblastes aux composants de la matrice extracellulaire nécessite l'expression de molécules d'adhérence dont les intégrines représentent une des principales familles. Cette progression est contrôlée par un ensemble d'enzymes et d'inhibiteurs enzymatiques dont l'équilibre garantit un déroulement harmonieux de l'implantation

et l'établissement réussi d'un premier dialogue de la mère et de l'embryon, ou plutôt des cellules trophoblastiques et des cellules de l'endomètre maternel.

Dans l'espèce humaine, l'implantation de l'œuf dans la paroi utérine maternelle est un mécanisme délicat. Des lésions initiales précoces, lors de la placentation, seraient à l'origine de diverses pathologies, de l'avortement précoce jusqu'à la prééclampsie. De nombreux arguments en faveur du rôle du placenta dans la prééclampsie ont été rassemblés. Ainsi, dans certaines grossesses pathologiques, le placenta se développe, les hormones sont sécrétées... mais il n'y a pas d'embryon. Ce type de «grossesse», nommée môle hydatiforme, s'accompagne parfois de prééclampsies très précoces. Dans les mûles hydatiformes, le fœtus est absent, de sorte qu'il ne peut être incriminé ; en revanche le placenta, présent, peut être mis en cause.

L'utérus ne semble pas responsable, car la prééclampsie apparaît parfois dans les grossesses abdominales. Lorsqu'un ovocyte progresse de l'ovaire vers l'une des trompes pour gagner l'utérus, il peut être fécondé par un spermatozoïde dans le petit espace qui sépare les ovaires des trompes. Il arrive alors que l'œuf fécondé ne retrouve pas le chemin de la trompe utérine, mais qu'il se perde dans l'abdomen. Parfois, cet œuf fécondé s'implante sur le péritoine des anses intestinales. Le placenta se développe, le système vasculaire nécessaire aux échanges foeto-maternels aussi, et la grossesse peut aboutir à la naissance d'un enfant.

Le placenta incriminé

Ces preuves indirectes du rôle du placenta ont été renforcées par la visualisation par échographie, par exemple, des remaniements cellulaires à l'interface foeto-maternelle. Au début de la grossesse, les échanges entre la mère et l'embryon sont quasi inexistantes, et l'embryon utilise ses propres réserves. Il se trouve dans un état de relative hypoxie, c'est-à-dire dans un environnement où la pression d'oxygène est faible. Pendant cette période, qui dure quelques semaines, le débit sanguin maternel dans l'espace intervilloux serait extrêmement réduit. En revanche, à partir de la fin du premier trimestre, la croissance et le bien-être du fœtus dépendent de plus en plus des flux sanguins utéro-

et foeto-placentaires. Le système artériel utéro-placentaire a acquis, comme nous l'avons indiqué, une faible résistance, ce qui assure un débit sanguin élevé dans les espaces intervilloux.

Les échanges doivent être suffisants pour assurer, via la «barrière placentaire», l'apport en nutriments et en oxygène, de la mère vers le fœtus et, inversement, l'élimination du dioxyde de carbone et des déchets du fœtus vers la circulation maternelle. Ces échanges ont lieu par diffusion passive lorsqu'il s'agit, par exemple, des gaz, et par transport actif par des protéines spécialisées pour les nutriments. Les réseaux d'échanges entre le fœtus, le placenta et l'utérus sont de plus en plus denses pour répondre correctement aux besoins toujours croissants de l'unité foeto-placentaire. Le développement de ces réseaux de molécules biologiquement actives est précisément orchestré.

Lors d'une prééclampsie, contrairement à ce qui se passe lors d'une grossesse normale, les trophoblastes n'envahissent pas (ou pas assez) les parois des artères spiralées utérines, de sorte que ces artères conservent une résistance élevée (voir la figure 2c). Il s'ensuit une baisse du débit sanguin dans les espaces intervilloux et l'apparition de lésions ischémiques à l'interface foeto-maternelle (l'oxygène n'est pas apporté en quantité suffisante). La perfusion des villosités placentaires est insuffisante, de sorte que leur structure et leurs fonctions sont perturbées. Ces anomalies vasculaires à l'interface du fœtus et de la mère seraient à l'origine de l'hypertension maternelle.



3. LE PLACENTA est un organe temporaire issu du trophoblaste embryonnaire et de quelques cellules de l'endomètre maternel.

Prolifération cellulaire et vasoconstriction excessives

En effet, ces modifications s'accompagnent d'une surproduction, tant vers la mère que vers le fœtus, d'agents vasoconstricteurs et mitogènes (qui favorisent la prolifération). On observe ainsi des concentrations anormalement élevées en thromboxane A_2 , qui favorise la vasoconstriction et l'aggrégation des plaquettes ; cette molécule stimule la formation de petits caillots qui obstruent les capillaires, ce qui renforce l'hypoxie.

C'est également le cas de l'endothéline, vasoconstrictrice, du facteur de croissance VEGF, ou encore de cytokines (TNF α), des substances du système immunitaire qui renforcent l'inflammation et la prolifération cellulaire. Le dialogue élaboré qui s'instaure rapidement entre le placenta, le fœtus et la mère inclut aussi le système immunitaire maternel. On constate également un excès de lipides peroxydés qui ont des propriétés oxydantes délétères.

Qui plus est, si les facteurs vasoconstricteurs, prolifératifs et oxydants sont produits en excès, on constate que leurs antagonistes vasodilatateurs et antiprolifératifs sont parfois libérés en quantité insuffisante. Ainsi, la prostacycline (PGI_2), le monoxyde d'azote (NO) et les substances antioxydantes sont déficitaires.

D'autres facteurs ont été mis en accusation pour expliquer autrement l'hypertension maternelle : par exemple, le dysfonctionnement du système rénine-angiotensine, qui intervient dans la régulation normale de la pression artérielle, ou la résistance à

l'insuline, cette hormone qui assure la régulation de la concentration sanguine en sucre, mais qui est aussi un facteur stimulant la prolifération cellulaire (ce qui favorise l'obstruction des vaisseaux). Toutefois, les preuves s'accumulent aujourd'hui pour affirmer que les substances cytotoxiques qui modifient le métabolisme des cellules de l'endothélium et du système musculaire lisse des vaisseaux des femmes prééclampsiques sont non pas d'origine maternelle, mais d'origine placentaire. En revanche, les effets d'une libération de ces facteurs dans la circulation fœto-placentaire sont moins bien connus.

L'apport d'oxygène et de nutriments est insuffisant, car non seulement les artères utéro-placentaires sont peu dilatées, voire obstruées, mais les villosités qui assurent les échanges dans les espaces intervillositaires sont, elles-mêmes, détériorées. Les cellules trophoblastiques subissent des phénomènes d'apoptose, ou de nécrose, liés à un stress oxydatif à l'interface foeto-maternelle (les radicaux oxydants, tels les lipides peroxydés, sont produits en excès et les substances antioxydantes font défaut). Cette détérioration est associée à un passage plus important que la normale de cellules fœtales (cellules sanguines et trophoblastes) et de débris placentaires dans les circulations utérine et périphérique de la mère. L'hypothèse d'un rôle de ces structures trophoblastiques dans la genèse des atteintes maternelles de la prééclampsie a été avancée. Les trophoblastes circulants, source importante de facteurs stimulant la vasoconstriction et la prolifération, pourraient participer à la genèse des dysfonctionnements de l'endothélium vasculaire observés.

Si l'on admet aujourd'hui que l'altération de l'endothélium vasculaire maternel est l'un des mécanismes clefs de la prééclampsie, l'activation d'autres types cellulaires, tels que les leucocytes, les neutrophiles et les lymphocytes, amplifierait la vasoconstriction des vaisseaux maternels. Dans la prééclampsie, la présence de cellules du système immunitaire semble indiquer que cette pathologie ne serait qu'une situation extrême de mécanismes inflammatoires maternels inhérents à la grossesse.

Le développement du placenta dépend beaucoup de la pression en oxygène à l'interface foeto-maternelle. On sait que la prééclampsie est plus fré-

quente à haute altitude, chez les femmes qui habitent les Andes, par exemple. On en déduit que l'hypoxie chronique est un facteur favorisant. Ainsi, on s'est interrogé : l'hypoxie inhibe-t-elle les propriétés invasives des cellules trophoblastiques ? Effectivement, plusieurs études ont montré que l'hypoxie stimule la prolifération des cellules trophoblastiques, mais inhibe leurs capacités d'envahir les parois du système vasculaire de l'utérus maternel.

C'est ainsi que les différentes observations ont mis en lumière le rôle de l'hypoxie placentaire dans la physiopathologie de la prééclampsie. Toutefois, on observe différents types d'hypoxie (touchant la mère, le placenta et/ou l'embryon), de sorte que l'adaptation placentaire varie : les complications maternelles de la prééclampsie ne sont pas toujours associées à des complications fœtales.

Quelle étiologie ?

On ignore la cause précise de la maladie, mais on observe une prédisposition familiale. La transmission n'est pas de type mendélien, mais quand, dans une famille, une femme a une prééclampsie, ses proches parentes ont plus de risques d'avoir ce type de pathologie que la moyenne des femmes. Un locus de susceptibilité a été identifié sur le bras long du chromosome 4. Une augmentation de l'expression de divers gènes, tel celui codant le TNF α , qui favorise l'inflammation et la prolifération cellulaire, a été mise en évidence. De nombreuses études sont en cours sur d'autres gènes, notamment sur les gènes qui participent au contrôle de la coagulation du sang.

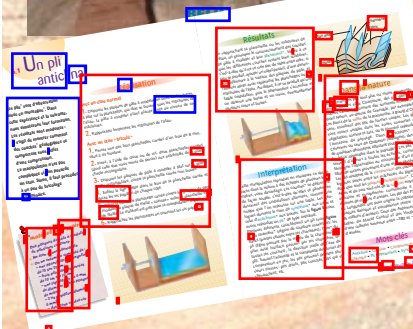
La prééclampsie pourrait également impliquer le génome fœtal. Comme les avortements précoces ou même certains échecs de fécondation, la prééclampsie aurait pour origine un dysfonctionnement des mitochondries, les organites qui fournissent leur énergie aux cellules. Des mutations seraient redistribuées dans certains ovocytes lors de leur maturation, et vers les cellules du trophoblaste, lors de l'embryogenèse. Il en résulterait un déficit dans les mécanismes producteurs d'énergie à des stades cruciaux où la demande est particulièrement forte, par exemple lorsque les cellules du trophoblaste se différencient pour envahir les structures utérines maternelles. Dans certains cas, les systèmes enzymatiques qui protègent contre le stress oxydatif seraient déficients.



C'est un organe très vascularisé, dont l'aspect diffère du côté maternel (ci-contre à gauche) et du côté fœtal (ci dessus).

LA TERRE

50 expériences pour découvrir notre planète



Comment naissent les dunes ?
Comment une rivière creuse-t-elle une vallée ?
Comment se forment les grottes ?
Pourquoi les pierres éclatent-elles sous le froid ?
Ce livre propose une série d'expériences pour comprendre comment le vent, la pluie, la glace, les cours d'eau modelent le visage de la Terre.

ANDRÉ PROST est géologue, ancien enseignant à l'université d'Orléans et à Paris VI, et ingénieur au Bureau des Recherches Géologiques et Minières à Orléans.

Code 002401-100 F-128 pages

Voir bon de commande page 98

BELIN • POUR LA SCIENCE

Selon une autre hypothèse, la prééclampsie serait due à un conflit génétique entre la mère et le fœtus ; ce conflit serait une conséquence d'une implantation défectueuse d'œufs de mauvaise qualité incapables de bien maîtriser la production de cytokines et d'autres facteurs signalétiques à l'interface fœto-maternelle. Au cours de l'évolution, diverses stratégies visant à limiter la naissance de nouveau-nés en mauvaise santé se sont mises en place. La prééclampsie, qui entraîne des retards de croissance des fœtus, représenterait un échec de cette stratégie.

De surcroît, deux constatations semblent indiquer que des conflits génétiques participent à l'installation de la maladie. D'une part, la prééclampsie est plus fréquente avec des fœtus mâles, et les môles hydatiformes où le patrimoine génétique n'est que d'origine paternelle. D'autre part, quand une femme a une prééclampsie lors d'une première grossesse, le risque diminue lors des grossesses ultérieures, à condition que les enfants soient du même père (on constate qu'un mécanisme d'habituation de l'organisme maternel à la présence d'antigènes d'origine paternelle se met en place). La prééclampsie résulterait-elle d'un conflit, au sein des cellules fœtales, entre les gènes d'origine maternelle et ceux d'origine paternelle ? L'« empreinte parentale » favorise l'expression d'un gène hérité du père plutôt que celle du même gène hérité de la mère, ou inversement. Une dérégulation de l'empreinte paternelle ou maternelle dans l'expression de certains gènes participerait à l'étiologie de la prééclampsie.

Enfin, pour terminer ce panorama encore parcellaire des causes possibles de la prééclampsie, signalons que certaines pathologies maternelles qui existent avant la grossesse peuvent être responsables d'une ischémie placentaire par l'intermédiaire de lésions artérielles ; c'est le cas de l'hypertension artérielle

chronique, du diabète ou de l'obésité. D'autres provoquent une hypoperfusion placentaire par des mécanismes de thrombose, c'est-à-dire d'obstruction plus ou moins complète de certains vaisseaux sanguins. D'autres maladies encore, telles les thrombophilies familiales ou acquises (dûes à des mécanismes de coagulation excessifs) et la drépanocytose homozygote (maladie génétique caractérisée par la présence, dans les globules rouges, d'une hémoglobine anormale), provoquent une hypoperfusion placentaire par des mécanismes thrombotiques. Chacune de ces pathologies maternelles peut aboutir à des phénomènes d'hypoxie placentaire et à des symptômes de prééclampsie.

À la recherche d'un test de dépistage précoce

Aujourd'hui, on commence à mieux comprendre les mécanismes physiopathologiques de la prééclampsie, maladie placentaire. La cause de la maladie reste à déterminer, mais l'objectif principal des médecins est de dépister le plus tôt possible les femmes à risques, pour les protéger, elles-mêmes et leur enfant. Plus d'une centaine de tests biologiques ou cliniques ont été proposés pour prévoir ou identifier la prééclampsie. En effet, diverses substances qui indiquent, pour la plupart, un dysfonctionnement endothélial ou un stress oxydatif, sont en concentration anormale dans le sang ou dans les urines des femmes prééclampsiques. Si l'existence d'une anomalie génétique placentaire se confirme, l'analyse de l'ADN des cellules trophoblastiques qui circulent dans le sang maternel pourrait constituer un test non invasif autorisant le dépistage précoce de cette pathologie. Une surveillance précoce de la mère et du développement du fœtus pourrait alors réduire la mortalité des femmes enceintes et celle des nouveau-nés.

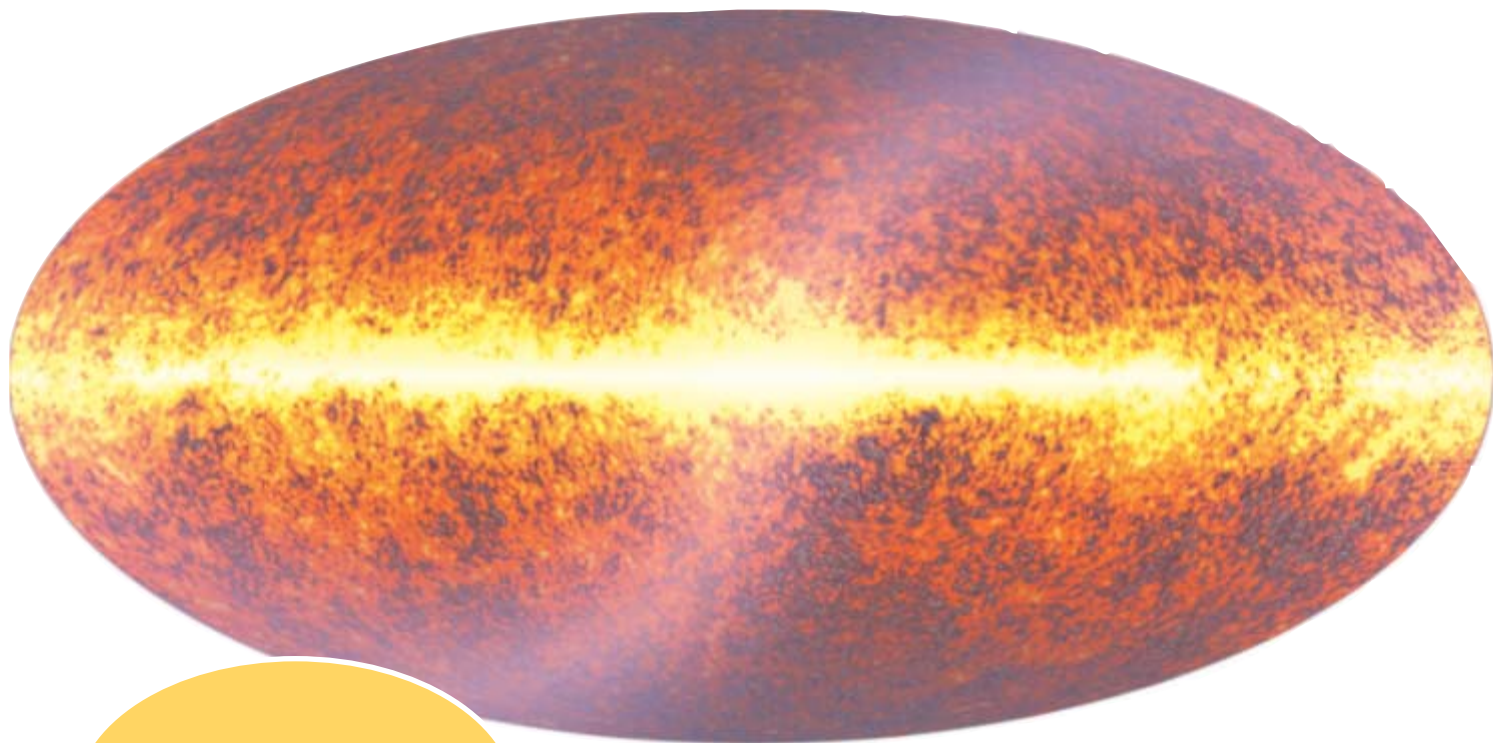
Françoise FERRE dirige l'unité U 361 de l'INSERM, Reproduction et physiopathologie obstétricale, à l'Hôpital Cochin-Port Royal. Bruno CARBONNE praticien hospitalier dans le Service d'obstétrique de l'Hôpital Saint-Antoine mène ses recherches dans l'Unité U 361.

J. KINGDOM et P. KAUFMANN, *Oxygen and Placental Villous Development : Origins of Fetal Hypoxia*, in *Placenta*, n°18, pp. 13-621, 1997.

B. CARBONNE, *Prématurité et anomalies de croissance fœtale*, in *Treizièmes Journées de Technologie avancée en gynécologie obstétrique*, Éditions AGPA, Paris, 1998.

G. DEKKER et al., *Etiology and pathogenesis of preeclampsia : Current concepts*, in *Am. J. Obstet. Gynecol.*, vol. 179, n° 5, pp. 1359-1375, 1998.

A. ALLAIRE et al., *Placental Apoptosis in Preeclampsia*, in *Obstetrics & Gynecology*, vol. 96, n° 2, pp. 271-276, 2000.



Mini-dossier

La cosmologie en effervescence

Depuis quelques années, la cosmologie est en effervescence et connaît un renouveau sans précédent. Des nouvelles découvertes ont mis en défaut les théories généralement admises sur l'évolution de l'Univers. Quels que soient leurs doutes, les cosmologistes ont une certitude : les réponses à quelques-unes de leurs principales questions viendront des données qu'apportera un nouveau satellite, la sonde des anisotropies micro-ondes, nommée MAP (en anglais *Microwave Anisotropy Probe*). Avec une précision qui n'a jamais été atteinte, la sonde photographiera les composants constitutifs de l'Univers à une époque reculée où les étoiles et les galaxies n'étaient qu'une lueur dans l'œil de la nature. Les caractéristiques fondamentales de notre Univers, telles que sa taille, sa forme, son contenu, son origine et sa destinée sont gravées dans cette image.

Ce jour est proche : le lancement du satellite est prévu pour l'été prochain. Jamais depuis le télescope spatial *Hubble*, un satellite n'avait suscité autant d'espoirs. Grâce à de tels instruments, la cosmologie, discipline essentiellement théorique, est devenue une science obser-

vationnelle, quantitative. L'amélioration de la précision des observations est à l'origine de la révolution qui a vu le jour il y a trois ans, quand l'observation des supernovae a révélé que l'expansion cosmique subit actuellement une phase d'accélération, une idée qui, il y a peu de temps encore, aurait fait sourire plus d'un cosmologiste.

La crise de maturité de la cosmologie observationnelle fait l'objet des deux premiers articles de ce mini-dossier.

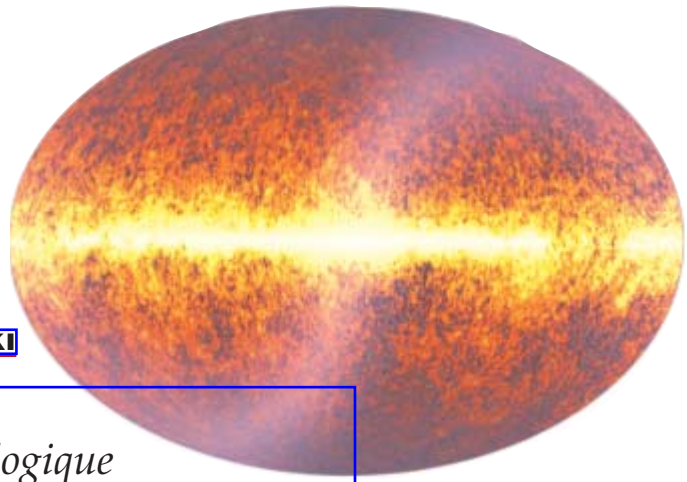
Robert Caldwell et Marc Kamionkowski montrent comment le satellite MAP et ses successeurs apporteront les données qui consolideront les fondements de la théorie de l'inflation, théorie bien acceptée, mais pour laquelle les preuves sont ténues. Trois astrophysiciens appartenant à l'équipe de MAP, Charles Bennett, Gary Hinshaw et Lyman Page exposent brièvement les principes de leur dispositif, qui devra repérer un signal minuscule parmi des myriades de signaux parasites.

Le troisième article décrit comment la révolution cosmologique est entrée dans une nouvelle phase. Il ne suffit pas que les observateurs aient établi que l'expansion de l'Univers accélère, encore

faut-il que les théoriciens expliquent cette accélération. Depuis Einstein qui avait postulé que l'énergie du vide est constante, on admettait son hypothèse de la constante cosmologique. Aujourd'hui cette hypothèse est minée par les paradoxes, et divers astronomes, dont Jeremiah Ostriker et Paul Steinhardt lui cherchent une remplaçante, une nouvelle source d'énergie étrange, nommée «quintessence». Une des vertus de la quintessence est de réconcilier l'accélération de l'expansion de l'Univers et la vie, deux concepts qui semblent inconciliables : l'accélération serait inéluctable et catastrophique, au point qu'aucune créature vivante ne pourrait en réchapper. Heureusement, la quintessence laisse entrevoir la possibilité d'une évolution plus heureuse de l'Univers. Enfin James Peebles, le père fondateur de la cosmologie moderne, disserte sur ces nouvelles théories, tandis que João Magueijo, échafaudé d'autres théories encore. Quelles que soient les découvertes à venir et les futures théories qui seront élaborées, toutes les turbulences cosmologiques récentes nous ont au moins appris qu'il ne faut rejeter aucune hypothèse.

Les échos du Big Bang

ROBERT CALDWELL • MARC KAMIONKOWSKI



Les empreintes laissées par les ondes gravitationnelles dans le fond diffus cosmologique qui baigne l'Univers détiennent peut-être les clés de son origine.

Aujourd'hui encore, les cosmologistes posent les mêmes questions que les tout premiers astronomes. Quelle est l'origine de l'Univers? Comment est-il parvenu à son état actuel? Quel est son avenir? Bien que les théoriciens spéculent depuis fort longtemps sur l'origine du cosmos, ils n'avaient que peu d'informations sur ses premiers instants pour tester leurs hypothèses. Depuis peu, les astrophysiciens disposent d'une méthode d'observation de l'Univers dans sa phase primordiale, celle où il se trouvait une fraction de seconde après le Big Bang. Ils identifient les traces d'ondes gravitationnelles dans le fond diffus cosmologique micro-onde : un rayonnement micro-onde à 2,7 kelvins qui baigne l'Univers depuis 15 milliards d'années et se refroidit au cours de son expansion.

Le fond diffus cosmologique a été émis environ 500 000 ans après le Big Bang, quand les protons et les électrons de la soupe primordiale se sont combinés pour former les atomes d'hydrogène (ce que les astrophysiciens nomment la «recombinaison»). Ce rayonnement est la pierre de Rosette de la cosmologie, car il nous donne une photographie de l'Univers primordial. En 1965, Arno Penzias et Robert Wilson, de la Société Bell, ont découvert le fond diffus cosmologique. Les astrophysiciens qui l'étudient ont mesuré que sa température est proche de 2,7 kelvins, quelle que soit la direction d'observation. Ainsi le fond diffus cosmologique isotrope semblait indiquer que l'Univers primitif était extrêmement uniforme. Dans les années 1990, le satellite d'observation

du fond diffus cosmologique COBE (*Cosmic Background Explorer*) a détecté d'infimes variations (de l'ordre de un cent-millième) dans la température du rayonnement. Ces fluctuations témoignent de l'existence de «grumeaux» dans le plasma primordial. Ces hétérogénéités ont ensuite évolué par effondrement gravitationnel pour former les grandes structures du cosmos : les galaxies et les amas de galaxies qui constituent notre Univers actuel.

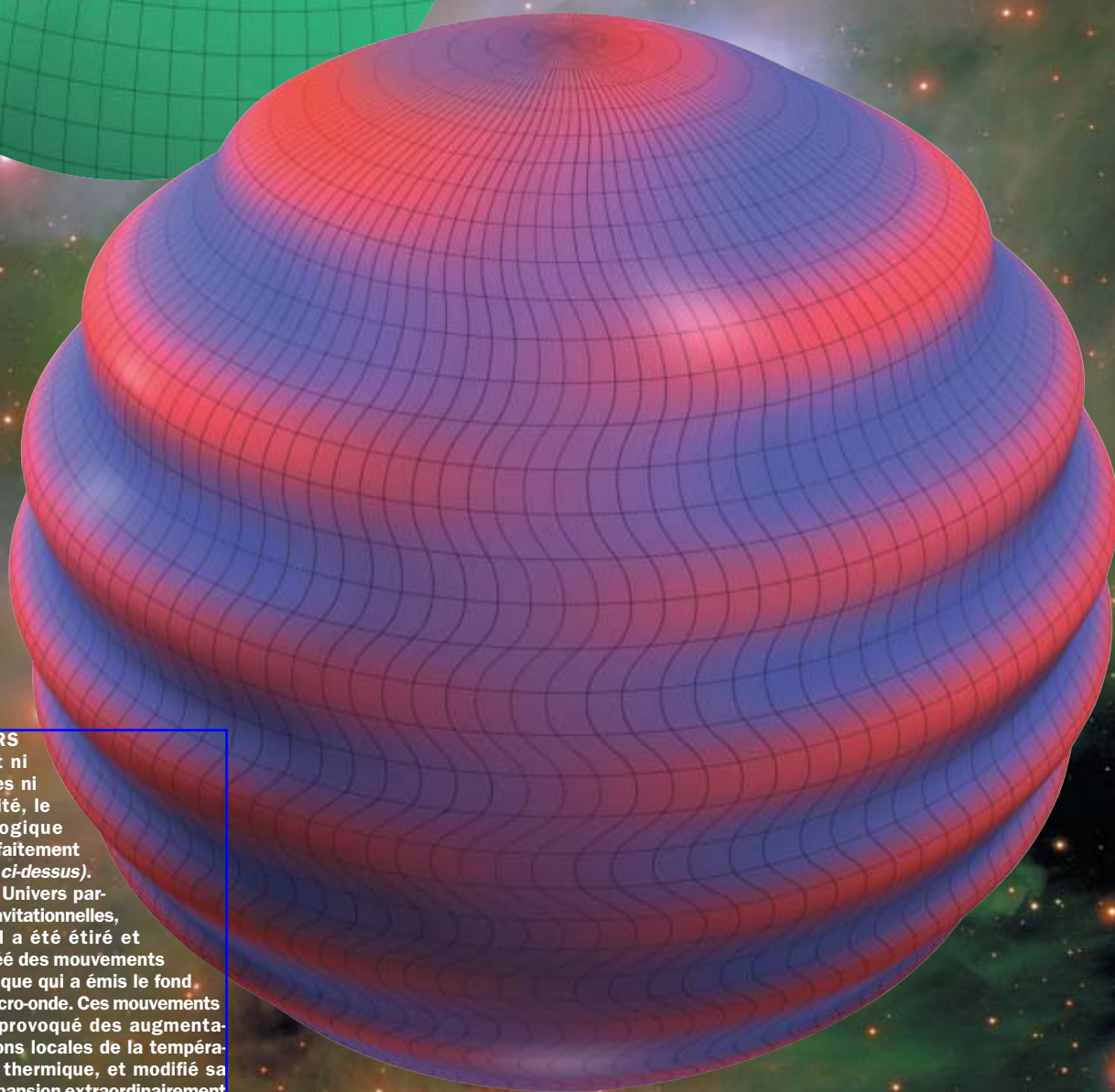
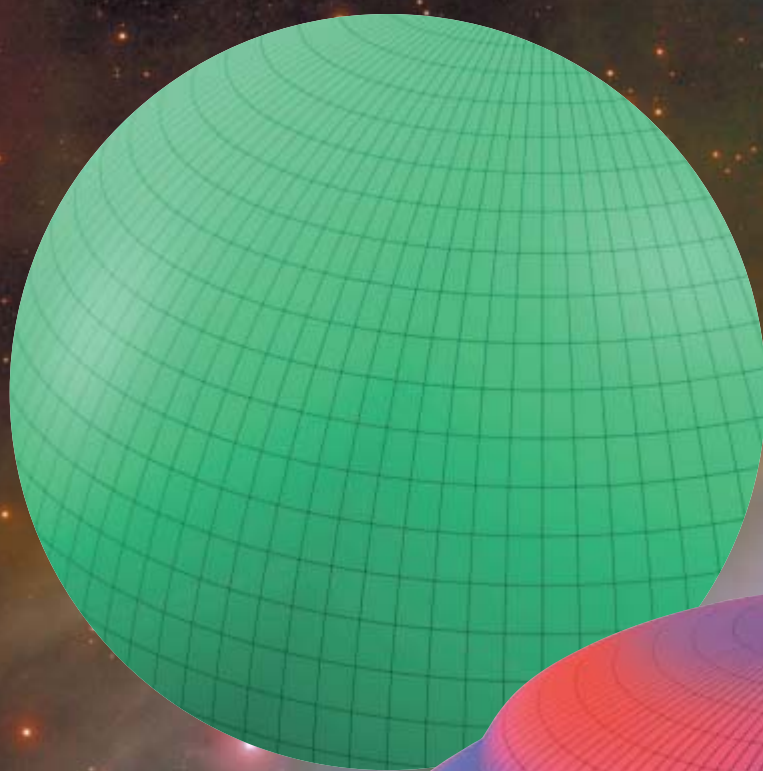
Mine d'observations sur l'Univers

Grâce à des détecteurs au sol ou embarqués à bord de ballons, les astrophysiciens ont mesuré à la fin des années 1990 le fond diffus cosmologique micro-onde avec une résolution angulaire bien supérieure à celle de COBE. Ils ont mis en évidence des structures dans le plasma primordial d'un diamètre apparent inférieur à un degré sur la sphère céleste (le diamètre apparent de la lune est d'un demi degré). On déduit de la taille de ces structures que l'Univers est très plat. Ces observations s'accordent aussi avec la théorie de l'inflation, selon laquelle une phase d'expansion extrêmement rapide s'est produite juste après le Big Bang. Cette année, la NASA a prévu de lancer le satellite MAP qui cartographiera les variations de température du fond diffus cosmologique dans tout l'espace (voir l'article *Un cartographe cosmique*, page 42). Prévu pour 2007, le satellite Planck de l'Agence spatiale européenne produira une carte encore plus fine de la voûte céleste. Les cosmologistes s'attendent à tirer de ces

observations une mine d'informations sur l'Univers primordial.

Les astrophysiciens espèrent trouver des preuves directes d'une période d'inflation. La plus évidente – aussi évidente que celle du pistolet qui fume encore après le coup qui vient d'être tiré – serait l'observation des ondes gravitationnelles, dont Albert Einstein a prédit l'existence dans le cadre de sa théorie de la relativité générale. Ces ondes sont l'équivalent des ondes électromagnétiques qui, tels les rayons X, les ondes radio ou la lumière visible, perturbent le champ électromagnétique : les ondes gravitationnelles perturbent le champ de gravitation. Comme la lumière ou les ondes radio, les ondes gravitationnelles véhiculent l'énergie et l'information que leur a communiquées la source qui les a produites. De plus, elles se propagent sans entrave à travers les matériaux qui absorbent les ondes électromagnétiques. Ainsi, les ondes gravitationnelles permettent aux astrophysiciens d'observer des phénomènes qui seraient «invisibles» sinon, exactement comme les rayons X rendent les tissus transparents aux médecins qui les examinent. Toutefois, personne n'en a encore détecté directement, même si les observations astronomiques ont montré que certains objets doubles, tels que des paires d'étoiles à neutrons ou des trous noirs engendrent des ondes gravitationnelles quand ils spiralent.

Le plasma qui a rempli l'Univers pendant ses 500 000 premières années était opaque au rayonnement électromagnétique, car tout photon émis y était instantanément diffusé dans la



1. DANS UN UNIVERS LISSE, ne contenant ni ondes gravitationnelles ni fluctuations de densité, le fond diffus cosmologique micro-onde serait parfaitement uniforme (*sphère verte ci-dessus*). En revanche, dans un Univers parcouru par des ondes gravitationnelles, le plasma primordial a été étiré et comprimé, ce qui a créé des mouvements dans la surface sphérique qui a émis le fond diffus cosmologique micro-onde. Ces mouvements auraient à leur tour provoqué des augmentations ou des diminutions locales de la température du rayonnement thermique, et modifié sa polarisation. C'est l'expansion extraordinairement rapide de l'Univers, juste après le Big Bang, qui serait à l'origine des ondes gravitationnelles. Ci-dessus, on a simulé les effets d'une onde gravitationnelle qui se propage d'un pôle à l'autre, avec une longueur égale au quart du rayon de cette sphère (*sphère rouge ci-dessus*).

soupe des particules subatomiques. C'est pourquoi les astronomes ne peuvent observer de signal électromagnétique antérieur au fond diffus cosmologique. Or la théorie de l'inflation prévoit que la brusque expansion de l'Univers, qui aurait eu lieu 10^{-38} seconde après le Big Bang, a produit des ondes gravitationnelles qui, elles, pouvaient traverser le plasma. Si c'est exact, ces ondes se sont propagées dans l'Univers primordial et, 500 000 ans plus tard, ont laissé, dans le fond diffus cosmologique, d'infimes perturbations observables aujourd'hui (voir la figure 2).

Ondes et inflation

Pour comprendre comment l'inflation a produit des ondes gravitationnelles, penchons-nous sur l'une des conséquences fascinantes de la mécanique

quantique : le vide n'est pas totalement vide. Des paires virtuelles constituées d'une particule et d'une antiparticule y sont créées et annihilées en permanence. Selon le principe d'incertitude de Heisenberg, une paire peut naître du vide avec une énergie ΔE et persister pendant une durée Δt , pourvu que $\Delta E \cdot \Delta t$ soit inférieur à $\hbar/2$, où $\hbar$ est la constante de Planck réduite.

Le graviton, la particule quantique associée aux ondes gravitationnelles (l'analogie du photon des ondes électromagnétiques), est aussi soumis à ce principe. Des paires de gravitons virtuels jaillissent en permanence du vide avant de disparaître. L'expansion de l'Univers a été si rapide pendant la phase d'inflation que des paires de gravitons ont été séparées avant de s'être annihilées. Des particules virtuelles sont ainsi devenues des particules réelles. L'expansion ultra-rapide de l'Univers

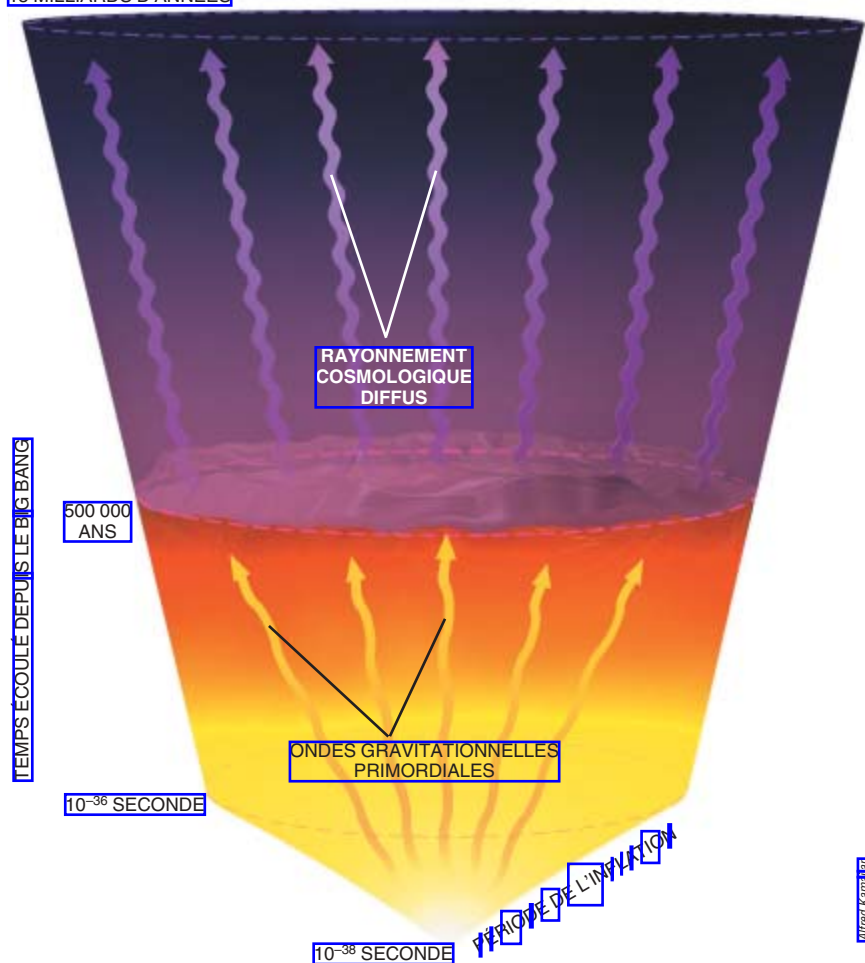
a aussi modifié les longueurs d'onde associées à ces gravitons, les faisant passer de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Ainsi, l'inflation aurait pompé de l'énergie dans le vide pour produire des gravitons et créé de la sorte tout un spectre d'ondes gravitationnelles caractéristiques de l'état de l'Univers, juste après le Big Bang. Si les ondes gravitationnelles dues à l'inflation existent, elles sont la relique la plus ancienne de l'Univers primordial : elles auraient 500 000 ans de plus que le fond diffus cosmologique !

Alors que les longueurs d'onde du rayonnement cosmologique sont confinées dans un petit intervalle – entre un et cinq millimètres, avec un maximum vers deux millimètres – celles des gravitons issus de l'inflation couvrent un vaste domaine, entre un centimètre et 10^{23} kilomètres, la taille de l'Univers observable aujourd'hui ! Selon la théorie de l'inflation, les ondes gravitationnelles les plus intenses ont les plus grandes longueurs d'onde, et leur intensité dépend du taux d'expansion de l'Univers inflationniste. Ce taux est proportionnel à l'énergie mise en jeu pendant l'inflation, elle-même déterminée par la température de l'Univers au début de l'inflation. Ainsi, l'intensité des ondes gravitationnelles dépend du moment où l'inflation a commencé.

10^{-38} seconde après le Big Bang

Malheureusement, les cosmologistes ne connaissent pas avec précision cet instant, car ils ignorent ce qui a déclenché l'inflation. Pour certains théoriciens, elle aurait commencé quand trois des interactions fondamentales – l'interaction forte, l'interaction faible et l'interaction électromagnétique – se sont dissociées, peu après la naissance de l'Univers. Unifiées au tout début de l'Univers, ces trois « forces » se seraient différenciées quelque 10^{-38} seconde après le Big Bang, événement à l'origine de l'expansion. Si cette théorie est correcte, l'échelle d'énergie associée à l'inflation aurait été de l'ordre de 10^{15} à 10^{16} gigaélectronvolts (un gigaélectronvolt est l'énergie qu'un proton acquiert quand il est accéléré sous une différence de potentiel de un milliard de volts). Les plus gros accélérateurs atteignent actuellement des énergies de 10^3 gigaélectronvolts). En revanche, si l'inflation a été déclenchée

15 MILLIARDS D'ANNÉES



2. LES MECANISMES QUANTIQUES qui se sont produits durant la phase d'inflation – une expansion explosive de l'Univers qui a eu lieu juste après le Big Bang – ont engendré tout un spectre d'ondes gravitationnelles. Ces dernières se sont propagées quelque 500 000 ans dans le plasma primordial jusqu'à l'émission du fond diffus cosmologique, qu'elles ont distordu. Les astrophysiciens espèrent détecter ces distorsions dans le fond diffus cosmologique d'aujourd'hui.

ultérieurement par un autre mécanisme, l'intensité des ondes gravitationnelles serait moindre.

Depuis qu'elles ont été produites une fraction de seconde après le Big Bang, les ondes gravitationnelles de l'inflation se propagent dans l'Univers. Comment les astronomes peuvent-ils les observer? Rappelons d'abord comment un récepteur reçoit un signal radio. Les ondes radio, constituées de l'association d'un champ magnétique et d'un champ électrique oscillants, font osciller les électrons de l'antenne du récepteur. Ce mouvement produit un courant électrique que le récepteur enregistre. De même, une onde gravitationnelle déforme l'espace qu'elle traverse, lui faisant subir des compressions et des étirements oscillants. De telles oscillations devraient entraîner de petits déplacements

de masses que l'on arrangerait habilement pour qu'elles «flottent» librement. Dès la fin des années 1950, le physicien Hermann Bondi, à Londres, tenta de convaincre ses collègues sceptiques de la réalité des ondes gravitationnelles en concevant le premier détecteur d'ondes gravitationnelles. Ce dispositif conceptuel était constitué d'une paire d'anneaux à cheval sur une tige rigide. Traversant ce système, une onde gravitationnelle d'amplitude h et de fréquence f contracterait la distance L qui sépare les anneaux d'un facteur $h \times L$, à la fréquence f . La quantité de chaleur libérée par le frottement des anneaux sur la tige prouverait que les ondes gravitationnelles véhiculent de l'énergie.

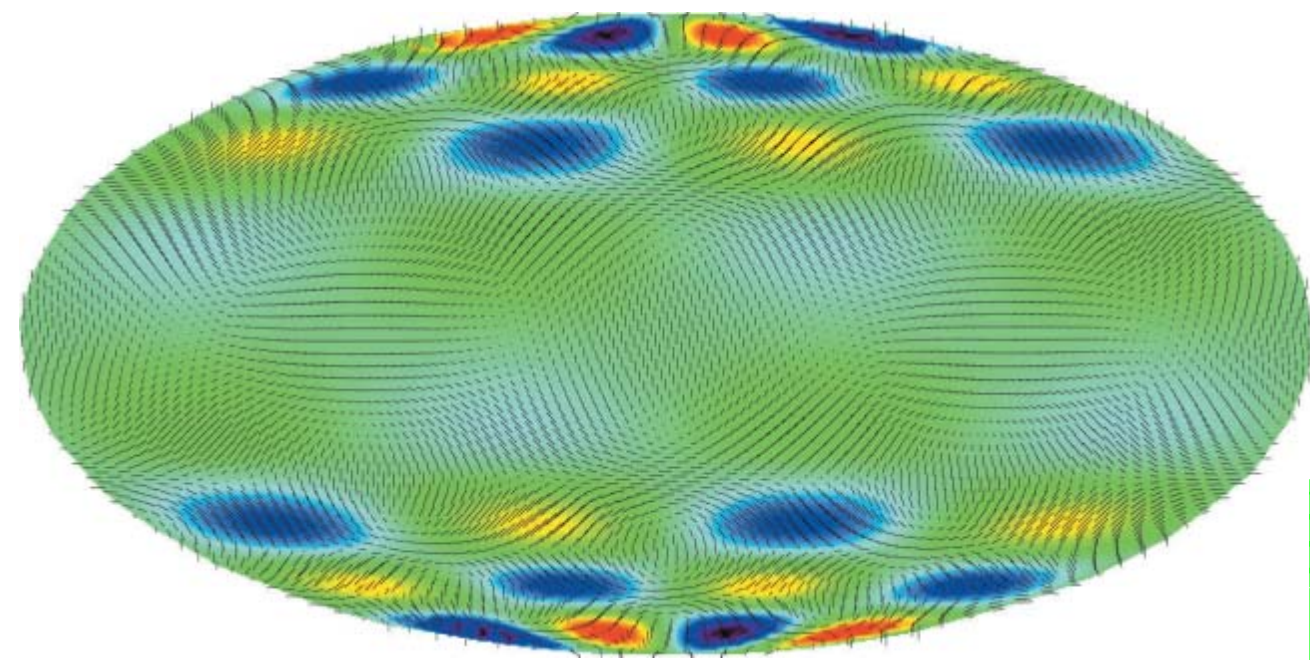
Le système idéal de Bondi n'a jamais conduit à la découverte des ondes gravitationnelles. Aujourd'hui, les astro-

physiciens construisent des détecteurs d'ondes gravitationnelles toujours plus élaborés; ils mesurent les déplacements minuscules de masses suspendues à l'aide de lasers (voir l'encadré de la page 40). Notons que la distance entre ces masses détermine le domaine des longueurs d'onde que le système peut détecter. Ainsi, dans le plus grand des détecteurs au sol, les masses sont séparées de quatre kilomètres, ce qui autoriserait la détection des oscillations dues à des ondes gravitationnelles dont la longueur d'onde serait comprise entre 30 et 30 000 kilomètres. Un dispositif spatial capable de détecter des longueurs d'onde 1 000 fois plus grandes est à l'étude. Les longueurs des ondes gravitationnelles résultant de la coalescence d'étoiles à neutrons ou de la collision de trous noirs sont situées dans cet intervalle et pourraient donc être



3. LES ONDES GRAVITATIONNELLES n'ont jamais été observées, mais la théorie prédit qu'elles étirent et compriment l'espace qu'elles parcourent. Ainsi, une onde gravitationnelle qui traverse une masse sphérique (a), l'étire d'abord dans une certaine direction avant de la comprimer dans la direction perpendiculaire (b). Puis, les deux effets s'inversent (c), de sorte que la

surface de la masse oscille à la fréquence de l'onde (d et e). Les distorsions représentées ci-dessus sont très exagérées; les ondes gravitationnelles sont trop faibles pour produire des effets directs mesurables. Les physiciens tentent donc d'observer les traces qu'elles auraient laissées dans le fond diffus cosmologique (ci-dessous).



4. LES ONDES GRAVITATIONNELLES DE L'INFLATION ont peut-être laissé leurs empreintes dans le fond diffus cosmologique. Cette carte de la sphère céleste simule les variations de la température et de la polarisation du fond diffus cosmologique micro-onde, qui résulteraient

de microperturbations au sein du plasma primordial. Les taches rouges et bleues représentent des régions plus chaudes et plus froides du fond diffus cosmologique micro-onde; les petits segments représentent l'orientation de la polarisation du fond diffus cosmologique sur le plan du ciel.

détectées par ces nouveaux instruments. En revanche, les ondes gravitationnelles issues de l'inflation dont les longueurs d'onde sont dans cet intervalle ont une amplitude bien trop faible pour être détectées de cette façon.

Les ondes gravitationnelles les plus intenses issues de l'inflation ont des longueurs d'onde comparables au diamètre de l'Univers observable. Pour les détecter, les astronomes doivent utiliser des masses flottant librement à des distances du même ordre ! *A priori*, cela semble impossible, mais, par hasard, la nature nous offre une configuration de ce type : le plasma primordial d'où est né le fond diffus cosmologique. Durant les 500 000 premières années qui ont séparé l'inflation

de l'émission du fond diffus cosmologique, les ondes gravitationnelles à très grandes longueurs d'onde se sont propagées l'Univers, étirant ou comprimant le plasma primordial (voir la figure 4). Le phénomène se traduit aujourd'hui par de faibles décalages Doppler dans le fond diffus cosmologique, que les astrophysiciens peuvent observer. Ainsi, si, au moment où le fond diffus cosmologique a été émis, une onde gravitationnelle était en train d'étirer une région du plasma dans notre direction – c'est-à-dire dans la direction de l'Univers qui allait devenir notre Galaxie –, le rayonnement provenant de cette région est décalé vers les longueurs d'onde plus courtes, c'est-à-dire vers le bleu (voir la figure 5) : la

température y est supérieure. Inversement, si, au moment de l'émission du fond diffus cosmologique, une onde gravitationnelle était en train de comprimer une région de plasma en l'éloignant de nous, le rayonnement issu de cette région est décalé vers les plus grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire vers le rouge (voir la figure 5) : la température y est inférieure. En relevant les points chauds et froids du fond diffus cosmologique, les astronomes découvriront peut-être la signature laissée par les ondes gravitationnelles issues de l'inflation. L'Univers entier deviendrait une sorte de détecteur géant d'ondes gravitationnelles.

Malheureusement, l'Univers n'est pas un endroit simple. Comme nous

Chasseurs d'ondes

Selon la théorie, les ondes gravitationnelles issues de l'inflation ne seraient pas les seules à parcourir l'Univers. Plusieurs phénomènes astrophysiques, tels les étoiles binaires, les étoiles à neutrons qui coalescent ou encore des trous noirs qui entrent en collision, émettent aussi des ondes gravitationnelles de forte amplitude. La relativité générale prévoit que ce type d'ondes est produit par tous les systèmes physiques dont les mouvements internes n'ont pas une symétrie sphérique. Contrairement à une étoile isolée, deux étoiles en rotation l'une autour de l'autre produisent de telles ondes.

L'atténuation de ces ondes lors de leur propagation rend leur détection difficile. Bien que la coalescence de deux étoiles à neutrons ou la collision de deux trous noirs figurent parmi les cataclysmes les plus violents de l'Univers, les ondes gravitationnelles émises lors de ces événements sont à peine perceptibles quand elles nous parviennent après avoir parcouru des centaines de millions d'années-lumière. Prenons un exemple : celui de la collision de deux trous noirs situés à un milliard d'années-lumière. Les calculs montrent que l'onde gravitationnelle issue de cette collision modifierait la distance entre deux masses libres de se mouvoir de un millimètre si elles étaient séparées de un million de milliards de kilomètres (10^{-21}).

Pour mesurer d'aussi infimes oscillations, les physiciens ont construit l'Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*). Construit sur deux sites, l'un à Livingston, en Louisiane, l'autre à Hanford, dans l'État de Washington (voir les photographies ci-contre).

Sur chaque site, deux tuyaux longs de quatre kilomètres se joignent à angle droit pour former un L gigantesque. Dans chacun d'eux, des faisceaux laser se réfléchissent entre des miroirs de haute qualité. En réglant les différents paramètres pour que les lasers interfèrent, les physiciens devraient mettre en évidence des variations de la distance qui sépare les miroirs de l'ordre de 10^{-17} centimètre, environ le milliardième du diamètre de l'atome d'hydrogène ! Les résultats obtenus simultanément à Livingston et à Hanford seront comparés de façon à ce que les signaux qui pourraient être confondus avec des ondes gravitationnelles soient éliminées (par exemple, une activité sismique, des ondes acoustiques, les instabilités du laser).

D'autres physiciens construisent des détecteurs plus petits, prévus pour fonctionner de concert avec LIGO : TAMA près de Tokyo, Virgo près de Pise et GEO près de Hanovre. Ils permettront de repérer la source d'éventuels émetteurs d'ondes gravitationnelles par la méthode de triangulation. La NASA et l'Agence spatiale européenne mènent aussi un projet commun pour détecter les ondes gravitationnelles de grande longueur d'onde. Elles prévoient d'envoyer dans l'espace l'interféromètre spatial LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) vers 2010. Ce détecteur sera constitué de trois satellites identiques placés aux sommets d'un triangle 0, entre lesquels un faisceau laser parcourra cinq millions de kilomètres. Malheureusement, aucun de ces instruments ne sera assez sensible pour détecter les ondes gravitationnelles produites par l'inflation. Seul le fond diffus cosmologique pourrait nous les révéler.



l'avons souligné, les hétérogénéités de la distribution des masses dans l'Univers primordial ont aussi causé des variations de température dans le fond diffus cosmologique. Ainsi, le champ gravitationnel des régions les plus denses du plasma a pu décaler vers le rouge les photons émis par ces régions, perturbant localement la température. Si les cosmologistes se contentaient de mesurer la température du fond diffus cosmologique, ils ne sauraient établir la part des ondes gravitationnelles dans les variations observées par COBE ou par les autres détecteurs. Or, on sait que les variations dues aux ondes gravitationnelles ne sont responsables, au maximum, que d'un cent millième des variations observées. Ce fait impose une limite physique sur l'énergie qui a engendré l'inflation : elle n'a pu excéder 10^{16} gigaélectronvolts, et, par conséquent, n'a pu commencer que 10^{-38} seconde après le Big Bang.

Comment les cosmologistes peuvent-ils améliorer leurs estimations ? Comment confirmer l'origine des fluctuations de température ? C'est la polarisation du fond diffus cosmologique qui fournit la réponse à ces questions. Toute onde lumineuse qui se réfléchit sur une surface selon une direction qui fait un angle droit avec la direction du faisceau incident est polarisée, c'est-à-dire que les ondes s'orientent selon une direction privilégiée. Les verres de lunettes polarisés sont fondés sur ce principe : ils réduisent l'intensité lumineuse en bloquant la lumière polarisée horizontalement à celle qui est réfléchie par le sol. Le fond diffus cosmologique est polarisé lui aussi. Juste avant que l'Univers ne devienne transparent au rayonnement, les photons du fond diffus cosmologique ont été diffusés une dernière fois par les électrons du plasma. Quand ces diffusions se sont produites sous de grands angles, certains de ces photons ont été polarisés.

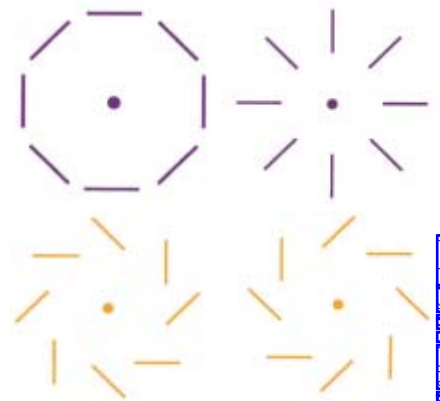
On devrait pouvoir détecter les ondes gravitationnelles dues à l'inflation, car les mouvements du plasma dus aux ondes gravitationnelles ont donné des motifs de polarisation différents de ceux que créent des fluctuations de la densité massique. La raison en est simple. Représentons par de petits segments l'angle de polarisation du fond diffus cosmologique dans chaque région du ciel (voir la figure 5). Ces segments s'agencent sous forme d'anneaux, d'étoiles, ou de tourbillons, lesquels tournent soit vers la droite, soit vers la gauche.

Cette orientation des tourbillons indique leur origine. Des fluctuations de densité dans la masse du plasma primordial n'auraient pu produire de tels motifs de polarisation, car les régions denses ou peu denses du plasma étaient dépourvues d'orientation vers la droite ou vers la gauche. Les ondes gravitationnelles, en revanche, sont polarisées. C'est pourquoi les motifs de polarisation créés par les ondes gravitationnelles sont la superposition de nombreux tourbillons de tailles et de sens variés.

Même un observateur entraîné ne pourrait deviner à l'œil nu si un diagramme de polarisation de l'espace contient des motifs en tourbillons. Toutefois, grâce à une forme particulière d'analyse de Fourier, les astrophysiciens décomposent un motif de polarisation en ses composantes. Ainsi, si les cosmologistes parviennent à mesurer la polarisation du fond diffus cosmologique micro-onde et déterminent la proportion des motifs en tourbillons, ils pourront en déduire l'amplitude des ondes gravitationnelles de très grandes longueurs d'ondes issues de l'inflation. Ils en déduiront également l'énergie liée à l'inflation (ou du moins son ordre de grandeur), puisque l'amplitude des ondes gravitationnelles qui en sont issues en découle directement. Ils sauront alors si c'est bien la différenciation des forces fondamentales qui a déclenché l'inflation.

Analyser la polarisation

Quand sera-t-on en mesure d'analyser les motifs de polarisation ? Le satellite MAP de la NASA et nombre d'autres détecteurs au sol ou embarqués dans des ballons devraient bientôt mesurer, pour la première fois, la polarisation du fond diffus cosmologique micro-onde. Toutefois, ces instruments ne seront probablement pas assez sensibles pour détecter la composante due aux ondes gravitationnelles de l'inflation. Les expériences suivantes fourniront sans doute plus d'informations. Si l'inflation a bien été déclenchée par l'unification des forces fondamentales, le signal des ondes gravitationnelles sera peut-être assez intense pour être détecté par le satellite européen Planck. À moins qu'une nouvelle génération d'instruments encore plus sensibles ne soit nécessaire... En revanche, si l'inflation résulte d'autres phénomènes physiques plus tardifs et moins énergétiques, le signal laissé par les ondes gravitationnelles émises dans



5. LA POLARISATION du rayonnement cosmologique diffus devrait nous renseigner sur les premiers instants de l'Univers. Des fluctuations de densité du plasma primordial auraient créé des motifs de polarisation en anneau ou en étoile (*en haut*) ; les ondes gravitationnelles, au contraire, auraient produit des tourbillons gauches ou droits (*en bas*).

ces conditions serait trop faible pour être détecté dans un avenir proche.

Réduits à des spéculations quant à l'origine de l'inflation, les cosmologistes ne peuvent prédire avec certitude l'amplitude du signal de polarisation laissé par les ondes gravitationnelles de l'inflation. Toutefois, même s'il n'y a qu'une toute petite chance qu'un tel signal soit mesurable, alors on doit tenter de le détecter. Sa mesure serait une validation incontestable de la théorie de l'inflation et nous permettrait de remonter à la naissance de l'Univers, ou presque : 10^{-38} seconde après le Big Bang. Aurons-nous alors la réponse à la question qui taraude l'homme depuis toujours : d'où vient l'Univers ?

Robert CALDWELL est maître de conférences en physique et en astronomie à l'Université de Dartmouth. Marc KAMIONKOWSKI est professeur de physique théorique et d'astronomie à l'Institut de technologie de Californie.

Robert R. CALDWELL, Marc KAMIONKOWSKI et Leven WADLEY, *First Space-Based Gravitational-Wave Detectors*, in *Physical Review D*, vol. 59, Issue 2, pp. 27101-27300, 15 janvier 1999.

La révolution cosmologique, Mini-dossier, in *Pour la Science*, mars 1999.

Les missions MAP et Planck sont détaillées sur le site map.gsfc.nasa.gov/ ; astro.estec.esa.nl/astrogen/planck/mission_top.html

Pour plus d'informations sur les détecteurs d'ondes gravitationnelles, consulter le site :

www.ligo.caltech.edu/lisa.jpl.nasa.gov

Cartographe cosmique

CHARLES BENNETT • GARY HINSHAW • LYMAN PAGE

Le satellite MAP de la NASA mesurera les fluctuations de température du fond diffus cosmologique, afin de fournir aux cosmologistes une vision plus précise de l'Univers primordial.

Durant l'été prochain, la NASA prévoit d'envoyer dans l'espace un satellite de 830 kilogrammes et de 4 mètres de hauteur : MAP (de l'anglais *Microwave Anisotropy Probe*, c'est-à-dire sonde de l'anisotropie micro-onde). La sonde mesurera les fluctuations de température du fond diffus cosmologique ; elle devrait atteindre l'orbite qui lui est assignée autour du Soleil – à 1,5 million de kilomètres au dessus de l'orbite terrestre – en trois mois. Elle commencera alors une mission d'observation de deux ans de tous les détails du fond diffus cosmologique micro-onde. Ce dernier a été émis il y a environ 15 milliards d'années et n'a pas été modifié depuis. Si l'on parvient à le cartographier, on disposera d'une photographie de l'Univers primordial. En étudiant cette carte, les cosmologistes détermineront la composition de l'Univers, sa géométrie et son histoire.

Comme son nom l'indique, la sonde MAP mesurera les fluctuations de température du fond diffus cosmologique micro-onde, c'est-à-dire les infimes variations de sa température en fonction de la direction d'observation. MAP sera assez sensible pour enregistrer des différences de température d'un vingt millionième de kelvin de part et d'autre de la température moyenne de 2,73 kelvins. Encore plus intéressant, la sonde déterminera la position des points chauds et froids sur le plan du ciel avec une résolution angulaire de 0,23 degré, y réalisant un million de mesures en tout. Ainsi, MAP fournira une carte du fond diffus cosmologique beaucoup plus détaillée que les mesures réalisées au début des années 1990 sur l'ensemble de la voûte céleste par le satellite COBE (ce dernier avait une résolution angulaire de sept degrés seulement).

Les performances de MAP résultent de l'utilisation de deux télescopes micro-ondes adossés l'un à l'autre, afin

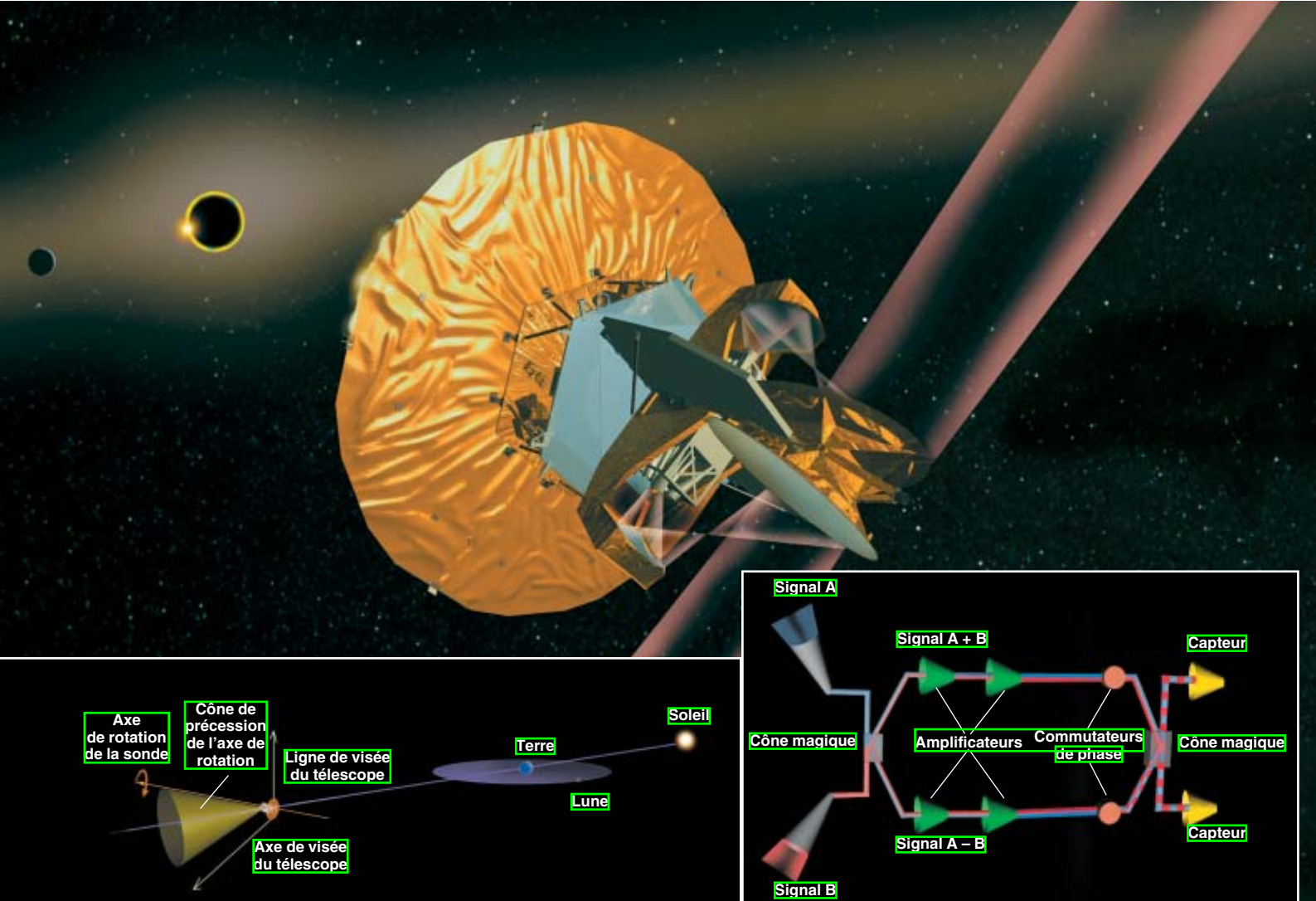
de focaliser le rayonnement incident. Le signal recueilli par chacun des télescopes sera exploité par des systèmes d'acquisition différentiels, conçus pour analyser cinq bandes de fréquences du fond diffus cosmologique. Plutôt que de mesurer la température absolue du rayonnement, chaque système enregistrera la différence entre les signaux des deux télescopes. Le satellite tourne sur lui-même toutes les deux minutes, et son axe subit un mouvement de précession, c'est-à-dire qu'il décrit un cône autour d'une certaine direction. Les systèmes d'acquisition des données pourront comparer la température de chaque point du ciel à 1 000 autres points, et fourniront des jeux de données imbriqués. Cette stratégie de mesure est analogue à celle d'un cartographe qui préférerait mesurer les différences de hauteur entre les sommets des collines d'un haut plateau plutôt que leurs élévations par rapport au niveau de la mer.

La méthode s'affranchit des perturbations engendrées par les petites variations de la température de la sonde elle-même. Pour étalonner les données, la sonde mesurera en permanence le moment dipolaire du fond diffus cosmologique, c'est-à-dire les modifications de la température du rayonnement dues au mouvement de la Terre à travers l'espace. MAP a été conçu de façon à réduire au minimum la contamination des données par des signaux parasites. Si tout se passe comme prévu, cette sonde devrait fournir une carte du fond diffus cosmologique micro-onde d'une qualité encore inégalée.

Charles BENNETT, Gary HINSHAW et Lyman PAGE font partie de l'équipe qui mène le projet MAP.

LES DEUX TÉLESCOPES DE MAP sont adossés. Ils focalisent le rayonnement micro-onde du fond diffus cosmologique (*les bandes rouges de la figure*) grâce à leurs miroirs primaires et secondaires. Leurs miroirs primaires mesurent 1,6 mètre sur 1,4, et leurs miroirs secondaires ont un mètre de diamètre. À l'arrière des capteurs solaires, un blindage (*en orange*) protège la sonde du rayonnement solaire et de ceux de la Terre et de la Lune, ce qui minimise les signaux parasites qui parviennent aux télescopes. Le rayonnement micro-onde focalisé par chaque télescope pénètre dans dix cônes (*en gris beige sur la figure*), conçus pour recueillir le rayonnement cosmologique dans cinq bandes de fréquences. Les quatre cônes étroits placés au centre enregistrent des longueurs d'onde de l'ordre de trois millimètres. Les cônes plus évasés placés à l'extérieur recueillent le rayonnement micro-onde à 22, 30, 40 et 60 gigahertz. À la base de chaque cône, un dispositif partage le rayonnement en ses deux

composantes de polarisations orthogonales, lesquelles sont ensuite envoyées vers deux systèmes d'acquisition différentiels indépendants. Ces derniers combinent les signaux des deux télescopes A et B à l'aide d'un instrument optique nommé "cône magique", qui fournit les signaux de sortie $A + B$ et $A - B$. Ceux-ci sont ensuite amplifiés, puis leur phase est permutée. Un autre cône magique les recombine ensuite pour fournir les signaux des télescopes A et B avant qu'un capteur enregistre leur différence de température. Grâce à cette architecture croisée, chacun des deux amplificateurs agit sur les deux signaux simultanément, ce qui évite l'amplification des erreurs avec celle des signaux. Notons finalement que le poste d'observation de MAP sera proche du point de Lagrange L2, à environ 1,5 million de kilomètres de notre planète, sur l'axe Terre-Soleil. La sonde tournera autour du Soleil à la même vitesse que la Terre, de sorte que l'espace lointain sera sans cesse observable.



Planck, le successeur de MAP

L'Agence spatiale européenne prévoit de lancer en 2007 une mission pour compléter les résultats de MAP. Construit avec la participation des États-Unis et du Canada, le satellite *Planck* cartographiera le fond diffus cosmologique micro-onde dans dix bandes de fréquences (au lieu de cinq avec MAP). À cet effet, il emportera deux instruments : le premier observera le rayonnement de fond entre 30 et 100 gigahertz ; il est en voie de réalisation sous la direction de Nazzareno Mandolesi, de l'Institut Tesre de Bologne. Le second, dont Jean-Loup Puget, de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay, supervise la construction, observera entre 100 et 900 gigahertz. Ces instruments mesureront les fluctuations de température (ou anisotropies) du fond diffus cosmologique micro-onde sur toute la voûte céleste avec une sensibilité de l'ordre de 6 millièmes de degré et une résolution angulaire de 0,1 degré. Cette sensibilité et cette résolution sont respectivement trois et deux fois meilleures que celles de MAP.

Les astrophysiciens ont sélectionné les fréquences d'observations de *Planck*, afin de détecter et de mesurer les émissions d'une autre origine que le fond diffus. Elles sont dues, par exemple, à la poussière galactique ou à certaines sources extra-galactiques lointaines, et parasitent le signal cosmologique diffus. Grâce au signal recueilli par *Planck*,

les astrophysiciens détermineront ces émissions parasites avec la plus grande précision possible. Ils obtiendront ainsi une carte d'une qualité inédite du fond diffus cosmologique micro-onde et de sa polarisation.

Planck permettra aux cosmologistes de tester les modèles qui décrivent l'Univers primordial (inflation, défauts topologiques...). De plus, les chercheurs détermineront, grâce aux données du satellite, la valeur des paramètres en fonction desquels sont formulés les différents modèles d'Univers. Ces «paramètres cosmologiques clés» comprennent notamment la constante de Hubble, le paramètre de décélération, la constante cosmologique...

Planck devrait aussi fournir un catalogue complet des amas de galaxies et des galaxies (de l'ordre de plusieurs milliers d'objets). Autant de données grâce auxquelles les astrophysiciens expliqueront mieux les processus de formation et d'évolution de ces grands objets cosmiques. Les observations faites par *Planck* leur permettront aussi de dresser une carte spectrale et spatiale de notre Galaxie, qui ira du domaine radio à l'infrarouge lointain. Les astrophysiciens s'en serviront pour étudier, notamment, les propriétés des poussières de notre Galaxie.

Nabila AGHANIM appartient à l'équipe *Planck* de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay.

Le cinquième élément cosmique

JEREMIAH OSTRIKER • PAUL STEINHARDT

Un champ d'énergie invisible, la quintessence, domine depuis peu l'évolution de l'Univers, et en accélère l'expansion.

Avons-nous enfin découvert tous les secrets du Cosmos... à quelques détails près? Il y a encore quelques années, nous le pensions. Après un siècle de débat animé, les cosmologistes s'entendaient enfin sur les grandes lignes de l'histoire de l'Univers. Tout avait commencé avec du gaz et un rayonnement à une température et une densité inimaginables. Ensuite, pendant une quinzaine de milliards d'années, l'Univers s'est dilaté et refroidi. Les galaxies et les autres structures de l'espace sont nées de microscopiques fluctuations quantiques qui, à la faveur d'une brève période d'«inflation», ont atteint leur taille cosmique. Seule une faible fraction de la matière est constituée des éléments chimiques qui nous sont familiers. Le reste, la matière noire, est composé de particules élémentaires exotiques, invisibles parce qu'elles n'interagissent pas avec la lumière. Même si nombre de mystères subsistaient, au moins avons-nous déterminé les grandes lignes de l'histoire cosmique...

C'est ce que nous avons cru. Aujourd'hui, nous savons que nous n'avons découvert qu'une toute petite partie de l'histoire. Les astrophysiciens ont acquis la conviction qu'ensemble les éléments chimiques et la matière noire constituent moins de la moitié du contenu de l'Univers! L'essentiel semble consister en une nouvelle forme d'énergie qui semble attachée au vide, aux propriétés étonnantes. Omniprésente, cette «énergie du vide» n'est pas attractive, mais répulsive! Tandis que la gravitation attire les uns vers les autres les éléments chimiques et la matière noire,

formant ainsi des étoiles et des galaxies, cette nouvelle forme d'énergie se disperse dans l'Univers sous la forme d'une «brume» quasi uniforme. L'Univers est un champ de bataille où s'affrontent deux «forces», et c'est la force répulsive qui l'emporte. Graduellement, l'énergie qui est la cause de la force répulsive surpasse l'attraction due à la matière ordinaire, de sorte que l'expansion de l'Univers s'accélère. Peut-être même est-ce le signe d'une nouvelle phase d'inflation. Si c'est le cas, le futur de l'Univers sera radicalement différent de ce que les cosmologistes envisageaient, il y a seulement dix ans.

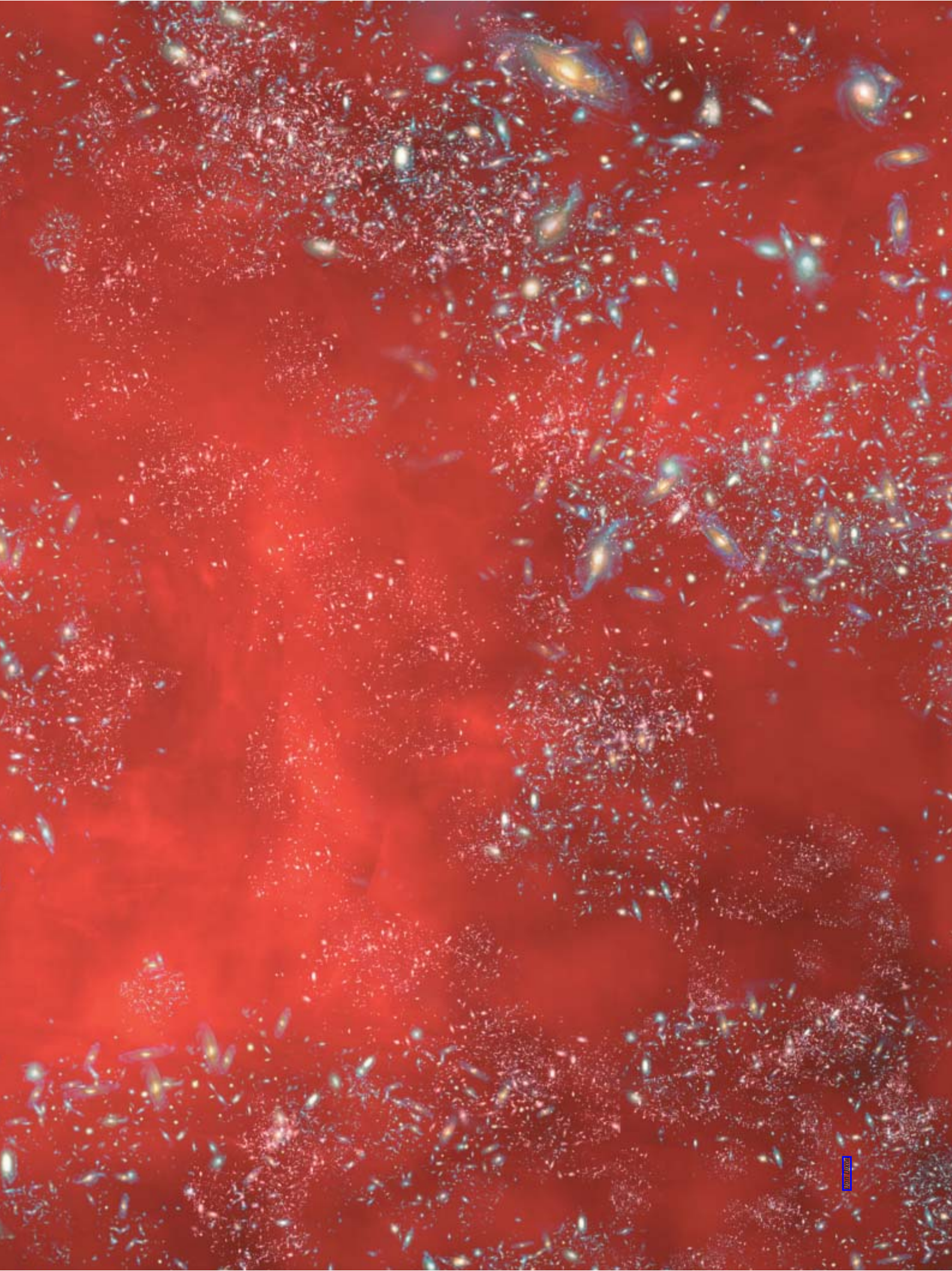
Les cosmologistes ont d'abord recherché des preuves de l'existence de cette énergie du vide inconnue. Après avoir accumulé des preuves convaincantes de son existence, ils en ont recherché l'origine. Selon l'explication la plus souvent évoquée, elle serait inhérente à la structure de l'espace. Même si une portion de l'espace était entièrement vide, dépourvue de matière et de rayonnement, elle contiendrait encore cette énergie. Cette conception de l'énergie du vide est déjà ancienne : Albert Einstein l'introduisit dès 1917, lors de sa tentative de construction d'un modèle statique de l'Univers. Comme la plupart des grands physiciens du passé, Einstein était persuadé que l'Univers est «stationnaire», c'est-à-dire qu'il n'est ni en expansion ni en contraction. Pour que cet état stationnaire soit compatible avec sa théorie de la relativité générale, il dut introduire une densité d'énergie constante associée au vide ou, selon ses propres termes, une «constante cosmologique». Il ajusta

cette constante de sorte que les forces de gravitation répulsives équilibrent parfaitement les forces de gravitation attractives dues à la matière.

Puis les astronomes découvrirent que l'Univers est en expansion. Einstein regretta alors son artifice, le considérant comme son erreur la plus grossière. Ce jugement était sans doute hâtif. Si la constante cosmologique était légèrement supérieure à la valeur proposée par Einstein, les forces gravitationnelles répulsives l'emporteraient sur les forces gravitationnelles attractives, et, par conséquent, l'expansion de l'Univers s'accélérait.

Aujourd'hui, de nombreux cosmologistes envisagent une autre explication de l'expansion accélérée de l'Univers : la quintessence. Le terme désigne un hypothétique champ quantique en évolution dynamique proposé par Robert Caldwell, Rahul Dave et l'un d'entre nous (Paul Steinhardt), afin d'expliquer la présence partout dans l'Univers d'une nouvelle forme d'énergie créant des forces répulsives. Le terme quintessence désigne la «quinte essence», littéralement le «cinquième élément» qui, avec la terre, l'air, l'eau et le feu, composaient l'Univers selon les Grecs. Substance éphémère, le cinquième élément servait à empêcher la Lune et les planètes de s'effondrer au centre de la sphère céleste. Les trois physiciens ont repris cette notion pour désigner le champ répulsif ou «antigravitationnel» qui évite l'effondrement de l'Univers.

1. A L'ECHELLE OU LES GALAXIES ne sont que des gouttelettes, une étrange énergie du vide, la quintessence, dicte sa loi.



L'idée d'un comportement dynamique de l'Univers (avec des accélérations ou des décélérations) associé à la quintessence séduit les cosmologistes. La principale difficulté inhérente à toute théorie de la quintessence tient à la quantité d'énergie du vide présente dans l'Univers : excessive, elle aurait entravé la formation des étoiles et des galaxies dans l'Univers primitif ; insuffisante, ses effets seraient imperceptibles aujourd'hui. Au sens d'Einstein, l'énergie du vide est complètement inerte, et sa densité n'évolue pas dans le temps. Si nous supposons que la densité d'énergie du vide n'a jamais varié, comment expliquer les effets répulsifs découverts récemment ? La seule solution est d'admettre que la valeur de la constante cosmologique (de l'énergie inhérente au vide) a été ajustée une fois pour toutes au moment de la création de l'Univers. Une autre solution existe si tout ou partie de l'énergie du vide est due à la quintessence. Cette dernière interagit avec la matière et évolue dans le temps ; elle se serait naturellement ajustée pour atteindre la valeur observée aujourd'hui.

L'énergie manquante

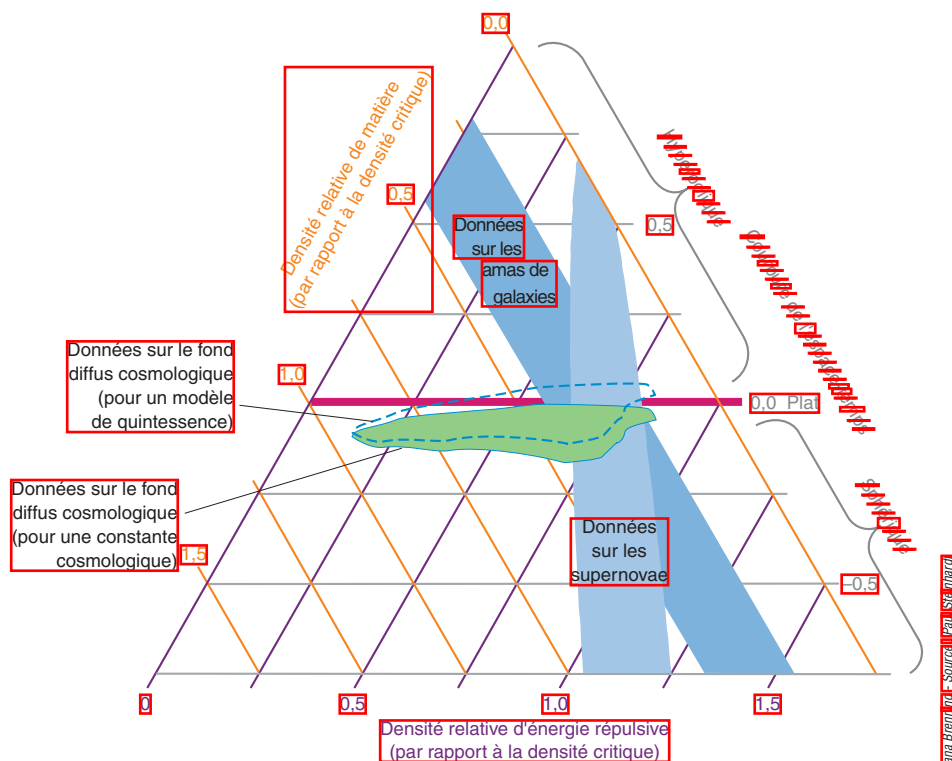
Quelle est la bonne option ? Jusqu'à présent, les physiciens des particules se sont servi de puissants accélérateurs pour découvrir de nouvelles formes d'interaction et de matière, et voilà que les observations faites dans le Cosmos mettent en évidence un nouveau type d'énergie. Cette énergie semble impossible à étudier par les méthodes classiques de la physique des particules, car elle interagit très peu avec la matière. Selon qu'elle sera inerte ou dynamique, son rôle dans la théorie unifiée de la nature dont rêvent les physiciens des particules sera différent. Eux qui ne scrutent d'ordinaire que l'infiniment petit dans leurs accélérateurs découvrent un nouveau et gigantesque laboratoire : l'Univers observé par les astrophysiciens.

L'hypothèse qu'il existe (dans le vide) une énergie aux effets répulsifs s'est petit à petit étayée au cours des dix dernières années. Un premier pas fut franchi lors de la réalisation d'un recensement le plus complet possible des galaxies et des amas de galaxies.

Diverses méthodes furent employées : observations dans le visible, dans le domaine des ondes radio et dans celui des rayons X. Cette étude confirma que la masse totale des éléments chimiques et de la matière noire ne peut expliquer que le tiers environ de la valeur de la densité d'énergie de l'Univers prévue par les théoriciens. Nommée densité critique, cette valeur est celle pour laquelle l'Univers est plat (rappelons que la courbure de l'Univers dépend de la quantité d'énergie qu'il contient).

Constatant un écart entre la valeur observée et la densité critique, de nombreux cosmologistes ont conclu que les théoriciens s'étaient trompés. La densité d'énergie observée par recensement de la matière impliquait un Univers hyperbolique et en incassante expansion. Toutefois, de nouvelles observations ont balayé cette possibilité. La répartition des zones chaudes et froides dans le fond diffus cosmologique – un rayonnement micro-onde uniformément réparti dans tout l'espace, censé être un vestige de l'explosion primordiale – a confirmé que l'espace est bien plat, et donc que la densité d'énergie moyenne de l'Univers est égale à la densité critique prévue par les théoriciens. Un simple calcul arithmétique montre alors que l'origine de deux tiers de l'énergie de l'Univers n'est pas identifiée.

Quelle que soit sa nature, cette composante n'absorbe aucune lumière et n'en émet pas, sinon elle aurait été détectée depuis longtemps. Elle ressemble donc à la matière noire, sauf en un point : les forces gravitationnelles qu'elle produit sont répulsives. Si ce n'était pas le cas, elle serait attirée par les galaxies et par les amas, où elle perturberait le mouvement de la matière visible. Or, rien de semblable ne se produit. Un autre aspect milite en faveur de l'existence d'une énergie du vide aux effets répulsifs. Son existence pourrait expliquer le « paradoxe des âges », qui gêne les cosmologistes depuis le début des années 1990. Quand on calcule l'âge de l'Univers à partir de la vitesse d'expansion cosmique actuelle, en supposant qu'elle diminue, on trouve que l'Univers aurait 12 milliards d'années. Or, on déduit de diverses mesures que certains objets célestes ont 15 milliards d'années. Toutefois, s'il existe des forces répulsives, l'expansion cosmique



2. LES VALEURS POSSIBLES des trois caractéristiques clés de l'Univers sont représentées sur ce graphe. Si l'Univers est plat, comme le suggère la théorie de l'inflation (l'expansion explosive de l'Univers à ses débuts), les différentes observations (les surfaces en couleur) et la ligne (en rouge) représentant un univers à courbure nulle doivent se recouvrir. C'est le cas ! Notons que les données sur les anisotropies du fond diffus cosmologique donne un meilleur recouvrement dans l'hypothèse où l'énergie du vide suit un modèle de quintessence (contour en pointillés) plutôt que celui de la constante cosmologique (zone verte).

a pu s'accélérer, et l'Univers pourrait avoir plus de 12 milliards d'années. Les physiciens auraient ainsi une explication de l'âge apparent de l'Univers, dicté par celui des objets célestes les plus anciens.

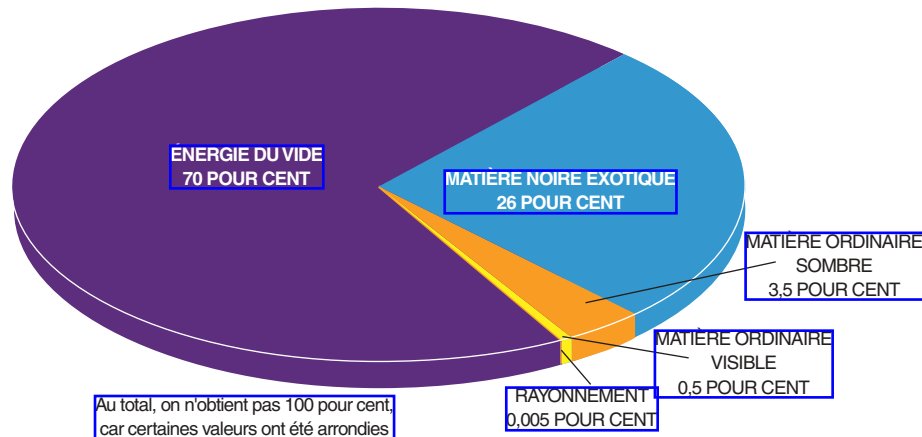
Ce raisonnement supposait que la répulsion gravitationnelle devait accélérer l'expansion de l'Univers... ce que l'on n'avait pas encore observé. Puis, en 1998, grâce à des mesures faites sur des supernovae éloignées, deux groupes d'astrophysiciens ont détecté un changement du taux d'expansion. Ils ont établi une accélération de l'Univers, et ce, exactement au rythme prédit par les partisans de l'hypothèse d'une importante énergie dans le vide.

En résumé, les arguments en faveur de l'existence d'une importante énergie du vide se résument à trois données : la densité moyenne de matière (visible et noire), la densité moyenne d'énergie du vide et la courbure de l'espace. Selon les équations de la relativité générale, la valeur de chacune de ces grandeurs doit être compatible avec un Univers à la densité critique. Les différentes combinaisons possibles sont représentées sur un graphe triangulaire (voir la figure 2). Les trois ensembles d'observations (la matière visible, le fond diffus cosmologique micro-ondes et les supernovae) correspondent à trois zones qui se recouvrent justement sur la ligne de courbure nulle. Un scénario comportant une forte énergie du vide semble donc incontournable!

De l'implosion à l'explosion

Étant donné que notre vécu quotidien nous confronte à une matière «ordinaire» qui attire, il nous est difficile de nous représenter comment le vide peut être répulsif et avoir une pression négative. Dans la loi de gravitation de Newton, la pression ne joue aucun rôle ; la gravitation dépend uniquement de la masse. Dans la loi de gravitation d'Einstein, l'intensité des forces gravitationnelles dépend de la masse, mais également de toutes les formes d'énergie, de la pression.

Le signe de la force gravitationnelle est déterminé par une combinaison de la densité d'énergie totale et de la pression. Si la pression est positive, comme dans le cas d'un rayonnement, celui de la matière visible et celui de la matière noire, alors le résul-



3. L'UNIVERS est essentiellement constitué d'énergie «répulsive», qui représente 70 pour cent de sa masse. Elle trouve son origine dans la densité d'énergie constante du vide (représentée par la constante cosmologique), ou dans celle d'un champ quantique, nommé quintessence. Les autres constituants sont la matière noire, dont on pense qu'elle est composée de particules élémentaires exotiques, et finalement la matière ordinaire (visible ou invisible) et un peu de rayonnement.

tat est positif et la gravitation est attractive. Si, au contraire, la pression est suffisamment négative pour que la résultante soit négative, la gravitation est répulsive. Les cosmologistes utilisent d'ordinaire le rapport de la pression sur la densité d'énergie, qu'ils appellent équation d'état, et qu'ils notent w . Pour un gaz ordinaire, w est positif et proportionnel à la température. Toutefois, il existe des systèmes où w est négatif. Quand sa valeur est inférieure à $-1/3$, la gravitation devient répulsive.

Dès qu'il possède une densité d'énergie non nulle, le vide est un système de ce type. Dans le vide, la loi de la conservation de l'énergie impose que la vitesse de variation de la densité d'énergie (sa dérivée par rapport au temps) soit proportionnelle à $w + 1$. Or, par définition, la densité d'énergie du vide ne varie pas, ce qui implique que la quantité $w + 1$ s'annule ; cela n'est possible que si $w = -1$. Puisque cette valeur est inférieure à $-1/3$, la pression du vide est négative.

Que signifie une pression négative? La pression des gaz chauds est positive, c'est-à-dire que les atomes et le rayonnement exercent une poussée sur les parois du récipient, dirigée vers l'extérieur (l'effet d'une pression positive s'oppose à celui des forces gravitationnelles). Une pression négative ferait le contraire : elle attirerait les parois du récipient. Imaginons qu'une interaction entre atomes s'oppose à l'énergie cinétique et provoque l'implosion du gaz. Un tel «gaz implosif» aurait une pression négative, et le récipient qui le contien-

draît s'effondrerait sur lui-même : la pression qui s'exercerait sur la face externe des parois serait supérieure à celle qui s'exercerait sur la face interne de ces parois. Curieusement, en relativité générale, une pression négative s'oppose aux forces gravitationnelles répulsives qui lui donnent naissance.

Dans un ballon, l'effet gravitationnel d'un gaz implosif serait infime. Imaginez maintenant que l'on remplisse l'espace entier d'un tel gaz. Il n'y aurait alors plus de surface frontière ni de pression externe. Le gaz n'aurait rien à repousser, de sorte que sa pression négative n'aurait aucun effet direct. Son seul effet serait gravitationnel : il serait répulsif. Il étirerait l'espace, accroîtrait son volume et, de ce fait, la quantité d'énergie du vide. La tendance à l'expansion de l'espace-temps se renforcerait, ce qui expliquerait l'accélération de l'expansion de l'Univers constatée. L'augmentation de l'énergie du vide se ferait aux dépens du champ gravitationnel.

Ces concepts peuvent sembler étranges, et Einstein lui-même les trouvait difficiles à admettre. Il considérerait l'idée d'un Univers statique, qui impose l'existence d'une énergie statique du vide (ou constante cosmologique), comme une erreur regrettable à réparer au plus vite. Las! Les choses ne se passèrent pas ainsi. Une fois introduite, la constante cosmologique n'allait plus disparaître. Les théoriciens réalisèrent vite que les champs quantiques impliquent l'existence d'une densité d'énergie finie dans le vide, la manifestation de l'existence de

fluctuations quantiques à la faveur desquelles se créent des paires de particules «virtuelles» dans le vide. Quand on estime l'énergie du vide produite par tous les champs connus, on obtient une valeur énorme : elle serait de 120 ordres de grandeur supérieure à la densité d'énergie due à la matière. Bien qu'il soit difficile de se représenter une telle valeur, cela signifie que les particules virtuelles évanescentes produisent une densité d'énergie constante et positive, associée à une pression négative. Toutefois, si cette estimation est correcte, l'expansion serait telle que les galaxies, voire les atomes, seraient désagrégés. À l'évidence, cette estimation de l'énergie du vide était erronée.

Une improbable précision

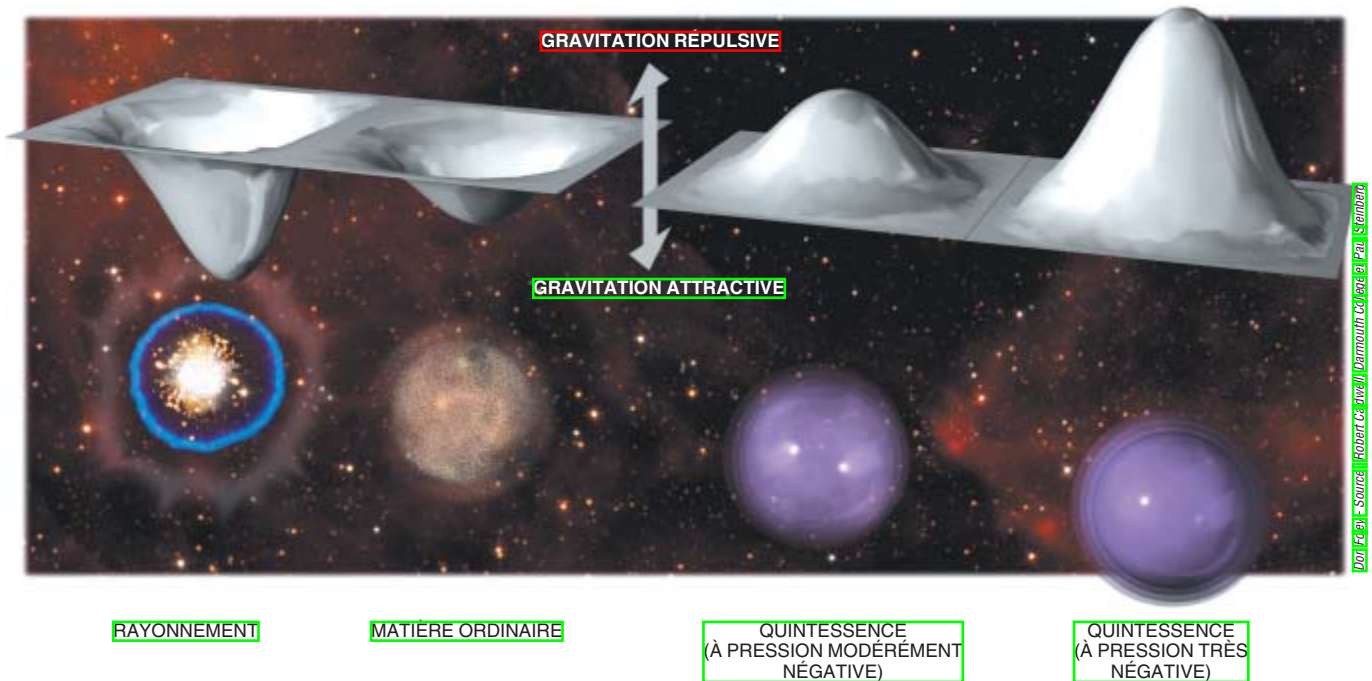
Encore fallait-il expliquer pourquoi. Selon l'une des hypothèses envisagées, une symétrie de la physique fondamentale, encore inconnue, annule des effets de grande ampleur, réduisant ainsi à l'extrême l'énergie du vide. Ainsi, les fluctuations quantiques associées à la création de paires de particules virtuelles dont le spin est un demi-entier (les quarks et les électrons, par exemple) auraient une contribution positive à l'énergie et celles associées à la création de paires de

particules à spin entier (les photons, par exemple) auraient une contribution négative à l'énergie. Les deux contributions se compenseraient. Dans la théorie dominante en physique des particules, le modèle standard, une telle compensation n'a pas lieu. Toutefois, les physiciens des particules explorent des extensions de leur modèle standard où cette compensation se produit : ces extensions sont dites supersymétriques. Seule difficulté : la supersymétrie est respectée aux très hautes énergies, mais pas aux basses énergies. C'est pourquoi les théoriciens recherchent des mécanismes susceptibles d'expliquer que la compensation subsiste à basse énergie.

Une autre approche consiste à accepter l'idée que l'énergie du vide n'est pas nulle, c'est-à-dire que le mécanisme de compensation ne serait pas parfait. Les fluctuations quantiques à l'origine de l'énergie du vide ne s'annuleraient pas parfaitement, mais laisseraient un résidu de 120 ordres de grandeur plus petit que la valeur prévue par les physiciens des particules à partir de tous les champs connus. Dans ce cas, l'énergie du vide pourrait effectivement représenter les deux tiers manquants de l'énergie de l'Univers. Quel mécanisme pourrait réduire à ce point l'énergie du vide avec une telle précision ? Bien que l'énergie du vide

soit l'équivalent d'une énorme masse, elle est répartie dans un si vaste espace que, localement, elle représente une densité d'énergie inférieure à quatre électronvolts par millimètre cube. Pour un physicien des particules, cette valeur infime est difficilement concevable : la plus faible des forces connues dans la nature met en jeu une densité d'énergie 10^{50} fois supérieure !

Si l'on extrapole dans le passé, l'existence d'une énergie du vide conduit à une situation encore plus paradoxale. Aujourd'hui, la matière et l'énergie du vide ont des densités moyennes comparables, mais, il y a des milliards d'années, quand elles sont apparues, l'Univers avait la taille d'un pamplemousse : la matière était plus dense d'une centaine d'ordres de grandeur. En revanche, l'énergie statique du vide, c'est-à-dire la constante cosmologique, avait la même valeur qu'aujourd'hui. En d'autres termes, les phénomènes physiques qui sont à l'origine du déploiement de l'Univers auraient créé une partie d'énergie du vide pour 10^{100} parties de matière. Si ce genre de proportion est envisageable dans le cadre d'une idéalisation mathématique, il est invraisemblable en physique. Les physiciens n'admettent pas la possibilité d'un ajustage aussi fin et cherchent pour cette raison à s'affranchir de la constante cosmologique.



4. SELON LA PRESSION qui règne, une quantité donnée d'énergie dans l'espace exerce une force gravitationnelle attractive ou répulsive. Quand cette pression est positive ou nulle, comme dans le cas d'un rayonnement et de la matière ordinaire, la gravitation est attractive (les creux, à gauche, représentent les puits

d'énergie potentielle associés à cette situation). La pression qui règne au sein de la quintessence est négative, de sorte que les forces gravitationnelles qu'elle engendre sont répulsives (les bosses, à droite, représentent les énergies potentielles associées à cette situation).

Travaux des champs

Heureusement, l'existence d'une énergie statique dans le vide n'est pas la seule cause qui expliquerait une pression négative. Une autre serait une forme d'énergie qui, contrairement à l'énergie statique du vide, varierait dans le temps et dans l'espace. Toutes les possibilités envisageables dans ce cadre sont regroupées sous le terme général de «quintessence». Quelle que soit la nature de la quintessence envisagée, le premier terme de l'équation d'état w n'a pas une valeur définie, mais il doit être inférieur à $-1/3$ pour que la gravité soit répulsive.

La quintessence peut prendre des formes variées. Dans le modèle le plus simple, l'énergie du champ quantique varie si lentement qu'elle ressemble, au premier abord, à une énergie statique du vide (constante cosmologique). Cette idée provient de la cosmologie inflationniste, où un champ cosmique – nommé inflaton – aurait été le moteur de l'expansion dans l'Univers primordial. Toutefois, la quintessence est bien moins forte que l'inflaton. Cette hypothèse fut étudiée pour la première fois, il y a une dizaine d'années, par trois chercheurs : Christof Wetterich, de l'Université de Heidelberg, Bharat Ratra, à l'Université du Kansas, et James Peebles, à l'Université de Princeton.

Dans la théorie quantique, les mécanismes physiques sont décrits soit en termes de champs, soit en termes de particules. Quelles seraient les caractéristiques d'une particule, dans la théorie de la quintessence? La quintessence a une densité d'énergie si faible et évolue si lentement qu'une particule ayant la taille d'un superamas de galaxies aurait une masse quasi nulle! C'est pourquoi la description de la quintessence en termes de champs est plus appropriée. Un champ est une distribution continue d'énergie qui associe à chaque point de l'espace une valeur numérique : l'intensité du champ en ce point. L'énergie correspondant à ce champ a une composante cinétique, qui dépend de la variation dans le temps de l'intensité du champ, et une composante potentielle, qui dépend seulement de cette intensité. Quand le champ évolue, l'équilibre entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle est modifié.

Rappelons que, dans l'hypothèse d'une énergie du vide constante, les pressions négatives résultaient de la

conservation de l'énergie, selon laquelle toute variation de la densité d'énergie est proportionnelle à la somme de la densité d'énergie (positive) et de la pression. Dans le cas de la densité statique du vide, cette somme est nulle, de sorte que la pression doit être négative. Dans le cas de la quintessence, l'énergie du vide évolue dans le temps, mais suffisamment lentement pour que la pression qui règne dans le vide reste négative. Dans ces conditions, le champ associé à la quintessence a une énergie potentielle supérieure à son énergie cinétique.

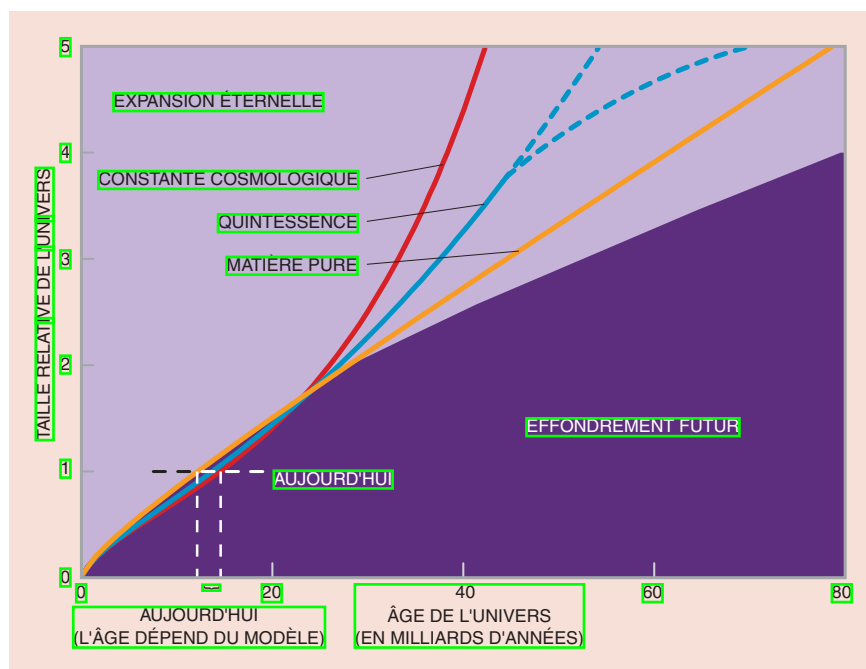
Puisque la pression associée à la quintessence est moins négative que celle associée à une densité statique du vide, l'expansion qui en découle est moins rapide. C'est grâce aux observations que l'on tranchera entre quintessence et densité statique du vide. Aujourd'hui on constate que la quintessence s'accorde mieux avec les données disponibles, mais la différence n'est pas significative. Les deux théories diffèrent aussi par le fait que, contrairement à un vide statique, le champ de quintessence subit diverses évolutions complexes. Ainsi, la valeur du rapport w peut être tour à tour positive, puis négative, puis à nouveau

positive... Elle peut aussi varier d'un endroit de l'Univers à l'autre. Ces variations sont certainement infimes, mais l'étude du fond diffus cosmologique devrait les révéler.

De surcroît, le champ de quintessence peut aussi être perturbé. Des ondes s'y propagent exactement comme les ondes sonores dans l'air. Les cosmologistes traduisent cette idée dans leur jargon en parlant de la «mollesse» de la quintessence, par opposition à la rigidité de la constante cosmologique d'Einstein. Notons que toutes les formes d'énergies connues sont plus ou moins «molles», et tolèrent la propagation d'ondes. Sans doute la densité d'énergie constante (rigide) du vide n'est-elle qu'un cas idéal, qui n'existe pas dans la nature. Un Univers où la quintessence aurait un rapport w proche de -1 représente peut-être l'approximation la plus raisonnable.

La quintessence et les «branes»

Présenter la quintessence comme un champ est une première étape, mais quelle serait l'origine de ce champ? Les physiciens des particules expliquent divers phénomènes, de la



5. L'EXPANSION DE L'UNIVERS suit un rythme différent selon la forme d'énergie qui prédomine. Si la matière domine, l'expansion de l'Univers se ralentit (*courbe en orange*). Si c'est une forme d'énergie constante dans le vide (la constante cosmologique) qui domine, l'expansion de l'Univers accélère (*courbe en rouge*). La quintessence est un cas intermédiaire : quand elle domine, l'expansion de l'Univers s'accroît, mais moins que dans le cas de la constante cosmologique (*courbe en bleu*). Selon les conditions, l'accélération se poursuit ou non (*courbes en pointillés*).

structure des atomes à l'origine de la masse, mais restent perplexes quand il s'agit de la quintessence. Les théories des particules élémentaires font intervenir de nombreuses sortes de champs, dont les comportements semblent adéquats, mais dont on connaît si mal l'énergie cinétique et l'énergie potentielle que l'on ignore lequel de ces champs, s'il y en a un, pourrait produire une pression négative.

L'une des théories exotiques les plus récentes stipule que la quintessence naît de la physique d'un Univers qui aurait des dimensions supplémentaires. L'idée semble d'autant plus intéressante que la théorie des cordes en prévoit. Depuis plusieurs années, les physiciens étudient cette théorie qui combine la relativité générale et la mécanique quantique, au sein d'un édifice théorique unifié des interactions fondamentales. La théorie des cordes prévoit l'existence de dix dimensions, dont quatre nous sont familières : les trois dimensions spatiales et le temps. Les six autres dimensions sont cachées, enroulées sur elles-mêmes, formant de minuscules sphères dont le « rayon » est trop petit pour être détecté (du moins avec les instruments à notre disposition aujourd'hui). Dans la théorie dite *M*, une version récente de la théorie des cordes, une 11^e dimension vient s'ajouter. La matière ordinaire serait confinée sur

deux « surfaces » à trois dimensions : des « branes » (pour membranes), séparées par une distance infime dans la onzième dimension.

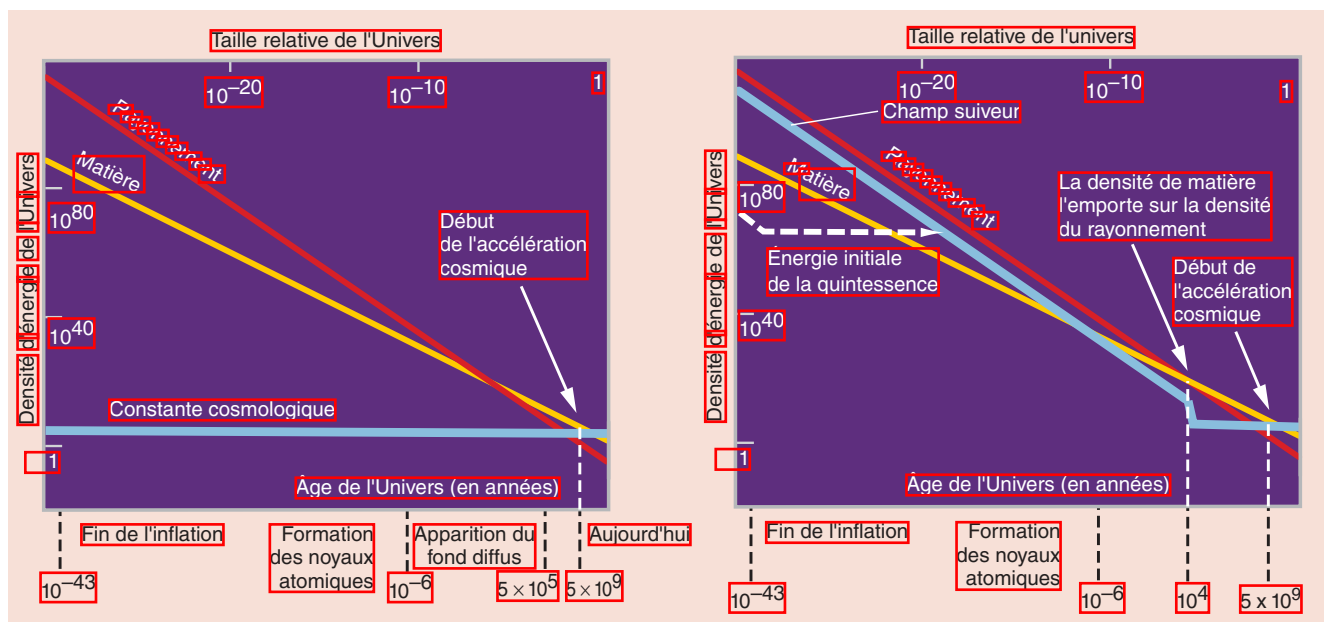
Nous ne voyons pas ces dimensions supplémentaires, mais, si elles existent, nous devrions les percevoir indirectement. En fait, la présence de dimensions enroulées ou de branes proches aurait le même effet qu'un champ. La valeur que prend le champ en chaque point de l'espace correspondrait au rayon des branes ou à leur distance. Or, sous l'effet d'un champ de quintessence, des branes devraient précisément évoluer avec l'expansion de l'Univers.

Quelle coïncidence !

Quelle que soit l'origine de la quintessence, elle a une propriété qui peut résoudre l'épineux problème de l'ajustement fin évoqué plus haut : elle est dynamique. Une façon d'envisager le problème est de se demander pourquoi l'accélération cosmique a commencé à un moment particulier de l'histoire de l'Univers. Créée quand l'Univers n'avait que 10^{-35} seconde, l'énergie du vide, qui engendre les effets gravitationnels répulsifs, a dû rester dans l'ombre pendant près de dix milliards d'années, soit pendant une durée 10^{50} fois supérieure à celle qui a précédé sa naissance ! C'est seu-

lement à ce moment-là que son effet gravitationnel aurait dépassé celui de la matière et que l'accélération de l'expansion de l'Univers se serait enclenchée. Est-ce une coïncidence que l'expansion de l'Univers accélère au moment même où des créatures pensantes apparaissent, c'est-à-dire nous ? Pourquoi l'évolution de la matière (vivante) et celle de l'énergie du vide semblent-elles liées ?

Si c'est la nouvelle forme d'énergie observée par les cosmologistes qui détermine la constante cosmologique, la coïncidence est presque inexplicable. Certains proposent une explication centrée sur l'homme : peut-être notre Univers n'est-il qu'un univers parmi une multitude d'autres, et la densité d'énergie du vide aurait des valeurs différentes, mais fixes dans chacun d'eux. Les Univers dont la densité d'énergie est très supérieure à quatre électronvolts par millimètre cube sont peut-être fréquents, mais ils subissent une expansion trop rapide pour former des étoiles et des planètes, ou favoriser la vie. Les Univers dont la densité d'énergie du vide est beaucoup plus faible semblent rares et improbables. Par hasard ou parce que c'est le nôtre, notre Univers aurait la densité d'énergie optimale. Ce n'est que dans ce « meilleur des mondes possibles » que des créatures intelligentes, capables de méditer sur la



6. SI L'ÉNERGIE DU VIDE EST STATIQUE (c'est l'hypothèse de la constante cosmologique), la densité d'énergie du vide doit être ajustée de façon ultrafine pour reproduire le fait qu'elle a récemment dépassé la densité d'énergie de la matière (à gauche). En revanche, si la quintessence est constituée d'un « champ suiveur » (à droite), sa

densité converge vers une même ligne (en bleu), quelle que soit sa valeur au début de l'Univers. La courbe de la densité du champ suiveur suit celle de la densité de rayonnement jusqu'à ce que la densité de matière prenne le dessus. Cela a pour effet de geler l'évolution du champ suiveur et de déclencher l'accélération cosmique.

nature de l'Univers, existeraient. Un argument conçu pour expliquer la présence de l'homme dans l'Univers est-il toutefois acceptable?

Les champs dits «suiveurs», une autre forme de quintessence, fournissent une solution plus plausible. Les équations qui les décrivent correspondent à un comportement classique d'attracteur, tels ceux que l'on rencontre dans certains systèmes chaotiques. Un champ suiveur évolue d'une façon dynamique et converge toujours vers la même solu-

tion quelles que soient les conditions initiales. Par analogie, une bille lancée dans une baignoire vide finit toujours par tomber dans le trou d'évacuation de l'eau, quel que soit son point de départ. Son comportement est à la fois chaotique et fixé dans certaines limites.

De même, la densité d'énergie d'un champ suiveur n'a pas besoin d'être fixée dès l'origine, car le champ suiveur s'ajuste vite de lui-même à cette valeur. Il se retrouve sur une trajectoire, où sa densité d'énergie reste

un rapport quasi constant de la densité de rayonnement et de matière. En ce sens, la quintessence imite la matière et le rayonnement, bien que sa composition soit totalement différente. Ce phénomène de mimétisme se produit parce que la densité de rayonnement et de matière détermine le taux d'expansion cosmique qui, à son tour, impose les variations de la densité de quintessence. En y regardant de plus près, on s'aperçoit que ce rapport croît lentement. Ce n'est qu'au bout de plusieurs millions, voire

La quintessence en physique des particules

Pour les physiciens des hautes énergies, l'existence d'une constante cosmologique non nulle est un problème déconcertant. De leur point de vue, en effet, la constante cosmologique est la densité d'énergie du vide. Cependant le vide quantique, même en l'absence de matière, contient les fluctuations quantiques de tous les champs de matière virtuellement présents dans l'Univers. Une simple estimation de la densité d'énergie qui en résulte, fondée sur les échelles de masse des particules connues, montre que la constante cosmologique (l'énergie du vide) devrait être plus de 100 ordres de grandeur supérieure à celle qui est observée!

Jusqu'à présent, les physiciens des hautes énergies s'accommodaient de cette situation en supposant l'existence d'un mécanisme de compensation, non élucidé, qui annulerait exactement les contributions quantiques des divers champs connus. Les observations décrites dans l'article de Jeremiah Ostriker et de Paul Steinhardt remettent tout en question. Que la constante cosmologique soit strictement nulle est une idée, qu'elle soit non nulle et incomparablement plus petite que toutes les formes d'énergie qui se rencontrent dans la nature en est une autre! C'est la structure du vide, au sens de la théorie quantique des champs, qui doit être revue.

La «quintessence» représente une tentative de réconcilier les observations cosmologiques et la physique des hautes énergies. En effet, si une forme de quintessence existe, la den-

sité d'énergie du vide est bien strictement nulle, mais l'état d'énergie minimale de l'Univers n'aurait pas encore été atteint. Le champ de quintessence serait encore en train d'évoluer vers un minimum d'énergie. Autrement dit, en plus de la matière ordinaire, des photons, des neutrinos et de la très énigmatique matière noire, l'Univers serait rempli d'un «condensat» de particules en train de s'évaporer; il jouerait le rôle d'une constante cosmologique, c'est-à-dire d'une énergie du vide constante. Malheureusement, un tel mécanisme n'est pas possible dans le cadre du modèle standard de la physique des particules.

En revanche, dans le cadre plus élaboré des théories de super-gravité ou plus généralement des super-cordes, ce mécanisme est plausible. Dans ces théories, tentatives de description de la physique des hautes énergies au-delà du modèle standard, on rencontre de nombreux champs sans manifestations concrètes (en laboratoire), mais dont la valeur dans le vide n'est pas fixée. Pierre Binétruy, de l'Université d'Orsay, a étudié cette situation et montré que les «condensats de fermions» (les fermions sont l'un des deux grands types de particules) produisent, dans certaines conditions, un potentiel semblable à un champ de quintessence.

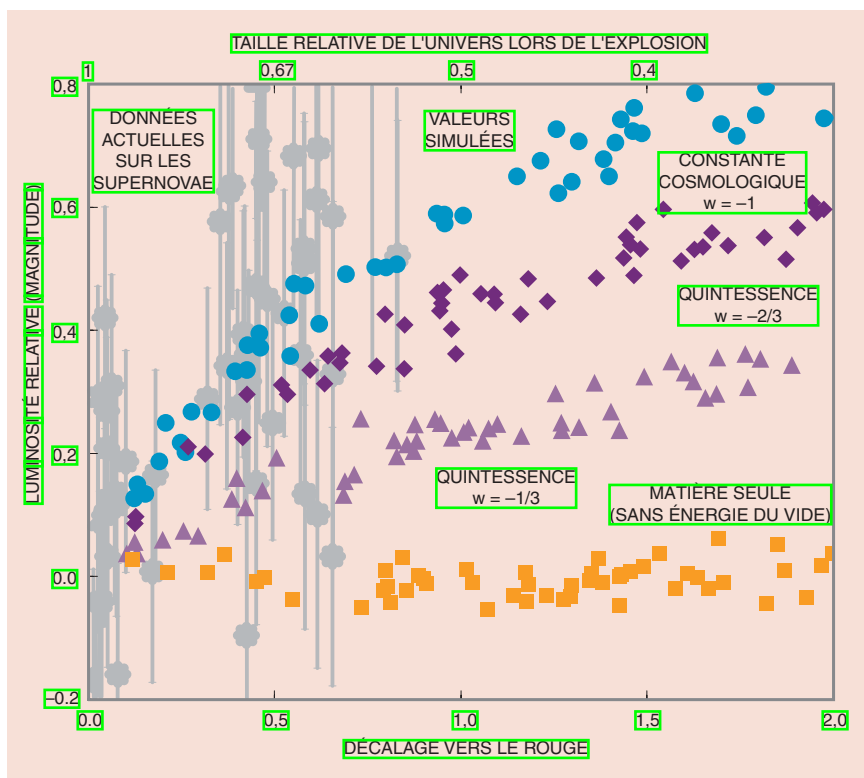
Parions que toute l'activité que suscite la quintessence ne sera pas sans «retombées» en physique des particules. Ceci n'a pas échappé aux physiciens théoriciens et aux astrophysiciens qui se sont lancés dans

une étude exhaustive de l'Univers avec quintessence. S'il existe, le champ de quintessence ne se manifeste pas seulement par son effet sur l'accélération de l'Univers mais comme l'ont souligné Philippe Brax, Jérôme Martin et Alain Riazuelo, du Centre d'Étude de Saclay et de l'Observatoire de Meudon, il aurait aussi un effet notable sur la vitesse de croissance des grandes structures du Cosmos.

Il est vraisemblable que l'étude indirecte du vide cosmologique nous renseignera sur sa nature. Nul doute que les grands projets d'observation du fond de rayonnement cosmologique, tels que *MAP* ou *Planck* y contribueront. Toutefois, c'est peut-être *DESCart* qui aura le fin mot de l'histoire.

Ce projet vise à cartographier les grandes structures de l'Univers afin d'y traquer les distorsions gravitationnelles. Lorsqu'une grande masse s'interpose entre nous et une source cosmique, le rayonnement qu'elle nous envoie en est modifié quel que soit le domaine de longueurs d'onde. Les astrophysiciens parlent d'effets de «lentille gravitationnelle». Or, l'intensité de tels effets dus à des objets très massifs, tels que des amas de galaxies ou des galaxies lointaines, reflète les propriétés géométriques globales de l'Univers. S'il existe une forme de quintessence, son existence ne devrait pas échapper aux observateurs du projet *DESCart*.

Francis BERNARDEAU,
Service de physique théorique,
CEA de Saclay



7. L'OBSERVATION DES SUPERNOVAE devrait permettre aux cosmologistes de trancher entre l'hypothèse de la quintessence et celle d'une énergie statique du vide. En effet, l'expansion cosmique accélère plus, dans cette dernière hypothèse, que si la quintessence existe. Plus l'expansion cosmique est rapide, plus les supernovae s'éloignent vite et plus leur luminosité est faible. Leur luminosité apparente est inférieure si la quintessence existe (les points violets) et supérieure si la densité d'énergie est constante dans l'espace (les points bleus). Aujourd'hui, les télescopes classiques ne suffisent pas à distinguer les différences de magnitude observées (en gris), mais une nouvelle sonde, *Super Nova Acceleration Probe*, devrait le permettre.

de milliards d'années, que la quintessence finit par s'imposer.

Pourquoi s'impose-t-elle précisément aujourd'hui? Le début de l'accélération cosmique, qui aurait pu commencer dans un passé ancien ou, au contraire, dans l'avenir lointain, dépend du choix de certains paramètres dans la théorie des champs suiveurs. Cette constatation soulève à nouveau le problème de la coïncidence évoquée plus haut : pourquoi la présence d'une forte énergie dans le vide s'est-elle brusquement manifestée il y a peu de temps? Un événement cosmique récent a-t-il déclenché l'accélération de l'expansion de l'Univers? Certains astrophysiciens postulent qu'une transition se serait produite : le rayonnement diffus aurait cessé de représenter l'essentiel de l'énergie dans l'Univers, la matière prenant le dessus.

Selon la théorie du Big Bang, l'énergie de l'Univers se trouvait essentiellement sous forme de rayonnement. Puis, à mesure que

l'Univers s'est refroidi, le rayonnement a perdu son énergie plus vite que la matière. Lorsque l'Univers a atteint un âge de quelques dizaines de milliers d'années (il était encore très jeune), son équilibre énergétique s'est inversé en faveur de la matière. Ce changement a marqué le début de la domination de la matière, qui nous est favorable aujourd'hui. C'est alors que la gravitation a commencé à rassembler la matière pour former des galaxies et des structures à grande échelle. Au même moment, le taux d'expansion de l'Univers a changé.

Dans une variante du modèle des champs suiveurs, ce sont les événements déclenchés par cette inversion qui ont conduit à l'accélération cosmique actuelle. Pendant la majeure partie de l'histoire de l'Univers, la quintessence (le champ suiveur) est restée une composante insignifiante du Cosmos. Puis, quand la matière est devenue dominante, le taux d'expansion de l'Univers a augmenté, et la quintessence aurait cessé de se com-

porter ainsi. La pression de quintessence serait alors devenue négative. Sa densité n'aurait guère changé, mais aurait fini par dépasser celle de la matière qui diminue à mesure que l'Univers s'étend. Dans ce modèle, l'accélération de l'expansion de l'Univers coïnciderait avec l'apparition d'êtres intelligents, et ce ne serait pas un simple hasard. La formation des étoiles et des planètes nécessaires à la vie et la domination de la matière sur le rayonnement qui en aurait résulté aurait déclenché la transformation de la quintessence en une composante de l'Univers à pression négative.

Quel avenir pour l'Univers?

À court terme, les cosmologistes vont tout mettre en œuvre pour détecter la quintessence, qui, si elle existe, doit avoir des effets observables. Parce que la valeur du rapport w (pression/densité d'énergie) diffère de celle qu'implique l'hypothèse de la constante cosmologique, elle produit un taux d'accélération cosmique légèrement différent. De nouvelles mesures des supernovae lointaines devraient nous permettre de distinguer les deux cas. Pour ce faire, les astronomes ont proposé deux campagnes d'observation : l'une, la sonde de mesure de l'accélération des supernovae (SNAP), sera embarquée à bord d'un satellite, tandis que l'autre, le télescope LASST (*Large-Aperture Synoptic Survey Telescope*) restera au sol. La quintessence aurait aussi un effet sur le rayonnement cosmologique diffus, que les satellites MAP (*Microwave Anisotropy Probe*) et Planck devraient détecter.

D'autres expériences devront mesurer la variation du nombre de galaxies en fonction de leur éloignement, c'est-à-dire, en termes d'astrophysiciens, de leur décalage vers le rouge. On déterminera ainsi comment le taux d'expansion de l'Univers a varié avec le temps. Une campagne de mesure au sol (DEEP pour *Deep Extragalactic Evolutionary Probe*) est prévue.

À long terme, il nous reste à faire le point sur les conséquences de ces étonnantes découvertes. Elles conduisent à une nouvelle interprétation de notre place dans le Cosmos, et celle-ci est pour le moins dégrisante!

Au commencement de tout (du moins celui qui a laissé les plus anciennes traces que nous observons), une brève période d'expansion accélérée – l'inflation – s'est produite dans les tout premiers instants qui ont suivi le Big Bang. L'Univers était alors quasiment dépourvu de matière, et un champ quantique ressemblant à un champ de quintessence (et, par conséquent, de pression négative) dominait. Pendant cette période, l'Univers a subi une inflation incomparablement plus rapide qu'au cours des 15 milliards d'années qui ont suivi cette expansion explosive. L'inflation terminée, le champ a cédé la place à un gaz chaud de quarks, de gluons, d'électrons (tous les constituants de la matière), de lumière et d'énergie du vide.

Ensuite, pendant plusieurs milliers d'années, l'Univers a été empli d'un rayonnement si dense que les atomes, et *a fortiori* les étoiles, ne pouvaient se former. Puis la matière a pris le dessus. Le rayonnement n'a alors cessé de se refroidir, la matière de se condenser en structures de plus en plus complexes. Cette époque, la nôtre, est également révolue : l'accélération cosmique est de retour. L'Univers tel que nous le connaissons, avec ses étoiles brillantes, ses galaxies et ses amas de galaxies, n'a apparemment été qu'un bref interlude. Au cours des quelques dizaines de milliards d'années à venir, la matière et l'énergie vont se diluer de plus en plus dans l'Univers. L'espace enflera alors trop vite pour que de nouvelles structures se forment. Le Cosmos deviendra de plus en plus inhospitalier pour les créatures vivantes. En bref, si l'accélération cosmique est due à la présence dans le vide d'une densité d'énergie constante, alors l'histoire de l'Univers est achevée : les planètes, les étoiles et les galaxies que nous voyons aujourd'hui sont l'apogée de l'évolution cosmique.

En revanche, si la quintessence est à l'origine de l'accélération cosmique, l'expansion de l'Univers se poursuivra éternellement, ou bien la quintessence disparaîtra, laissant la place à de nouvelles formes d'énergie et de rayonnement, capables d'occuper l'Univers. Étant donné la très faible densité de l'énergie du vide aux effets répulsifs, la matière issue de sa désintégration aura peut-être une énergie bien trop faible pour avoir des effets

notables. Selon l'un des scénarios envisagés, la disparition de la quintessence aboutira peut-être à la formation de bulles de vide. Les parois de ces bulles seraient le siège d'une activité intense. À mesure que la paroi reculerait, elle absorberait toute l'énergie libérée par la décroissance de la quintessence. Parfois, deux bulles entreraient en collision, provoquant un fantastique feu d'artifice au cours duquel des particules massives telles que des protons et des neutrons, voire des étoiles et des planètes, apparaîtraient.

Les habitants de ce Cosmos futur seraient perdus dans un monde très hétérogène, où la vie serait confinée dans quelques îlots très éloignés les uns des autres. Sauront-ils jamais que l'origine de leur Univers est le Cosmos homogène et isotrope que nous connaissons ? Devineront-ils que l'Univers a eu une vie antérieure, avant de mourir et de renaître ?

Les expériences à venir nous apporteront des éléments de réponse sur l'avenir de l'Univers. Nous saurons alors ce qui l'emporte d'une énergie statique du vide ou de la quintessence. La réponse dépendra de la place de la quintessence dans la nature. Existe-t-elle ? Joue-t-elle un rôle dans les rouages intimes de la nature, au sens de la théorie des cordes par exemple ? C'est à la frontière de l'infiniment petit et de l'infiniment grand que se trouve la réponse.

Jeremiah OSTRIKER et Paul STEINHARDT sont tous deux professeurs à l'Université de Princeton.

Jeremiah P. OSTRIKER et Paul STEINHARDT, *The Observational Case for a Low-density Universe with a Non-Zero Cosmological Constant*, in *Nature*, vol. 377, pp. 600-602, 19 octobre 1995.

Robert R. CALDWELL, Rahul DAVE et Paul J. STEINHARDT, *Cosmological Imprint of an Energy Component with General Equation of State*, in *Physical Review Letters*, vol. 80, n° 8, pp. 1582-1585, 23 février 1998.

Limin WANG, R. CALDWELL, J. Ostriker et Paul STEINHARDT, *Cosmic Concordance and Quintessence*, in *Astrophysical Journal*, vol. 530, n° 1, 1^{ère} partie, pp. 17-35, 10 février 2000.

Michael S. TURNER, *Why Cosmologists believe the Universe is accelerating*, in *Type Ia Supernovae : Theory and Cosmology*, Cambridge University Press, 2000.

Le sens caché de la cosmologie moderne

JAMES PEEBLES

Les nombreuses théories cosmologiques vous laissent perplexes? Tant mieux!

Nous vivons une époque fascinante pour les cosmologistes. Les découvertes pleuvent, les idées foisonnent et les recherches pour les valider battent leur plein. Toutes les hypothèses évoquées aujourd'hui ne peuvent être vraies ; elles se contredisent même en partie. Dès lors, comment repérer les véritables progrès? Voici comment je m'y prends.

Après d'interminables discussions, les cosmologistes ont enfin réussi à doter leur science de fondations solides. Toute une série d'indices accumulés au cours des 70 dernières années indique que l'Univers est en expansion et se refroidit. Tout d'abord, la lumière qui nous parvient des galaxies éloignées est décalée vers le rouge ; c'est bien ce que prédit la théorie si l'espace est en expansion, ce qui éloigne les galaxies les unes des autres. Deuxième indice, un rayonnement thermique emplit l'espace, comme cela doit être le cas si l'Univers a été plus dense et plus chaud dans le passé. Troisième indice : l'Univers contient des quantités importantes de deutérium et d'hélium, ce qui confirme que sa température a été bien supérieure dans le passé. Quatrième indice : les galaxies situées à des milliards d'années-lumière de nous ont les caractéristiques d'objets jeunes ; c'est normal, puisque leur lumière fut émise à une époque proche de celle où il n'y avait encore aucune galaxie! Dernier indice : la courbure de l'espace-temps semble liée au contenu matériel de l'Univers, ce qui, selon la théorie de la gravitation d'Einstein, la relativité générale, doit être vrai pour un Univers en expansion.

Par essence, la théorie du Big Bang décrit la façon dont notre Univers croît tout en se refroidissant. Vous l'avez remarqué : je n'ai pas parlé d'explosion : la théorie du Big Bang décrit seulement l'évolution de l'Univers, mais reste muette sur son origine.

Que ce soit en cosmologie ou dans une autre science, je compare généralement la mise au point de résultats scientifiques importants, tel celui d'un



Univers en expansion qui se refroidit, à la construction d'une charpente. Une fois un résultat expérimental obtenu, nous l'étayons à l'aide de diverses mesures croisées. Aujourd'hui, l'hypothèse d'un Univers en expansion est suffisamment étayée. De même, la théorie du Big Bang n'est plus remise en question sérieusement ; ses divers éléments s'adaptent trop bien entre eux. Même

la théorie «adverse» prônée par certains – le dernier modèle d'Univers stationnaire – ne contredit nullement la théorie d'un Univers en expansion qui se refroidit. En fait, s'il reste des controverses en cosmologie, elles concernent les «dépendances», la maison principale étant solidement bâtie.

Ainsi, on s'interroge sur l'état de l'Univers avant sa phase d'expansion. La théorie de l'inflation est la plus séduisante, mais elle manque d'«états» pour être bien établie. Ce sont précisément ces états manquants que les cosmologistes recherchent. Si les mesures en cours confirment l'existence de signatures spécifiques de l'inflation, nous les rangerons au nombre des arguments forts en faveur de cette théorie. Toutefois, d'ici là, je ne parierai pas que l'inflation a bien eu lieu. Je ne critique pas cette théorie ; je dis simplement que la théorie de l'inflation est un courageux travail de pionnier, qui a encore besoin d'être validé.

Je suis davantage convaincu, avec d'autres cosmologistes, que la majeure partie de la masse de l'Univers consiste en une «matière noire», amassée à la lisière des galaxies. Nous avons aussi des arguments pour dire que l'infâme constante cosmologique d'Einstein ou quelque chose d'approchant serait un accélérateur de l'expansion de l'Univers. Il y a dix ans, les cosmologistes voyaient la matière noire comme une façon élégante d'expliquer le mouvement des étoiles et des gaz dans les galaxies. En revanche, la constante cosmologique déplaisait énormément à la plupart des astrophysiciens. Aujourd'hui, la majorité s'est ralliée au concept

Les principales théories cosmologiques

Concept

Appréciation

Commentaire

L'Univers est issu d'un état chaud et condensé.

Excellent

Multiples preuves convaincantes fournies par l'astronomie et de la physique.

L'Univers se comporte comme la théorie de la relativité générale le prévoit.

Très bon

A passé tous les tests jusqu'à présent, mais ils étaient peu contraignants.

La matière noire, constituée de particules exotiques, domine la dynamique des galaxies.

Bon

De nombreuses preuves indirectes, mais ces particules exotiques restent à identifier, et on doit trouver les failles des autres théories

L'essentiel de la masse de notre Univers est distribuée uniformément. Son effet est similaire à celui de la constante cosmologique d'Einstein : elle accélère l'expansion de l'Univers.

Assez bon

Les observations récentes sont encourageantes, mais de nouvelles mesures devront les confirmer, et les difficultés théoriques associées devront être résolues.

L'Univers est passé par une phase d'inflation.

Insuffisant

Théorie élégante, mais qui ne repose sur aucune preuve directe, et qui impose une extrapolation énorme des lois physiques.

de constante cosmologique ou au concept voisin de quintessence. Pour leur part, les physiciens des particules s'intéressent au défi que pose la constante cosmologique à la théorie quantique. Cette évolution rapide de la majorité des cosmologistes n'est pas le signe d'une versatilité particulière. Au contraire, elle témoigne d'une saine effervescence autour d'une structure solide, qui croît lentement. Nous sommes les élèves de la nature, et nos conceptions changent à mesure que les leçons du professeur portent leurs fruits.

Dans son cours sur l'évolution du cosmos, la nature nous donne des signes de l'accélération de l'expansion de l'Univers : la luminosité apparente des supernovae proches ou lointaines ; l'âge des étoiles les plus vieilles ; la courbure de la lumière au voisinage des masses distantes ; les fluctuations de température du fond cosmologique diffus. Ce faisceau d'indices est impressionnant, mais je reste mal à l'aise à propos de la constante cosmologique, notamment à cause de certaines contradictions possibles entre l'évolution des galaxies et leur distribution spatiale. La théorie d'un Univers en expansion

accélérée est un chantier. Si j'admire l'architecture de l'édifice qui se dessine, je ne suis pas pour autant prêt à emménager immédiatement.

Que penser des nombreux articles publiés sur l'évolution de la cosmologie contemporaine ? La recherche est un champ d'activités complexe et foisonnant, et même les spécialistes ont parfois des difficultés à avoir une vue d'ensemble. Dans ces conditions, comment peut-on trier le bon grain de l'ivraie ? On doit surtout se donner la peine de prendre connaissance des différents courants de pensée, ne pas se limiter à une seule opinion. Quand un résultat semble intéressant et qu'il est reproduit par plusieurs équipes, il commence à être

crédible surtout si les voies de sa démonstration diffèrent.

Avec le temps, l'inflation, la quintessence et les autres concepts débattus aujourd'hui seront soit intégrés dans l'édifice central de la cosmologie, soit abandonnés et remplacés par d'autres, mieux adaptés. En un sens, nous autres cosmologistes travaillons à supprimer notre propre emploi : nous serons au chômage quand la théorie de l'Univers aura été validée. Heureusement, l'Univers est... complexe, et nous ne sommes pas prêts de manquer de sujets de réflexion. Le désordre qui envahit la cosmologie n'est rien d'autre que l'agitation fertile qui règne sur tous les chantiers de construction.

James PEEBLES, professeur émérite à l'Université de Princeton, fut l'un des pionniers de l'étude du fond diffus cosmologique.

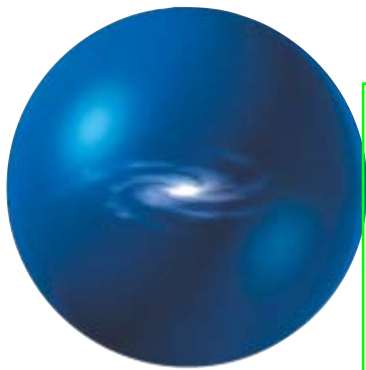
Alain BLANCHARD, *Histoire et géographie de l'Univers*, Belin-CNRS éditions, 2000.

James PEEBLES, David SCHRAMM, Edwin TURNER et Richard KRON, *L'évo-*

lution de l'Univers, in *Pour la Science*, décembre 1994.

Alan GUTH, *The Inflationary Universe : Infinite Expansion, The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, Perseus Press, 1997.

Mario LIVIO et Alan SANDAGE, *The Accelerating Universe : Infinite Expansion, The Cosmological Constant, and the Beauty of the Cosmos*, John Wiley & Sons, 2000.



Les cosmologies de repli

JOAO MAGUEIJO

Au cas où les théories cosmologiques modernes échoueraient, il faut en rechercher d'autres.

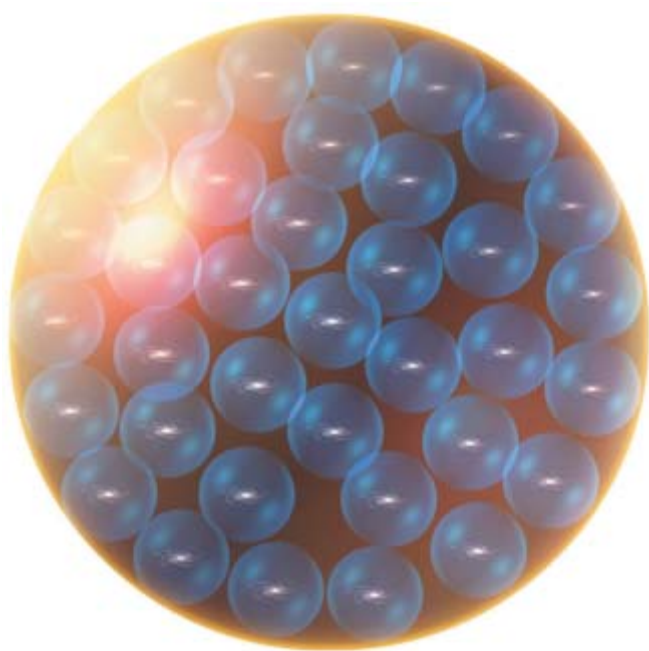
Bien sûr, la théorie de l'inflation a acquis une aura d'invincibilité, mais les théories concurrentes n'ont pas déposé les armes. Ainsi, la théorie de l'état stationnaire qui, jusqu'en 1960, était considérée par la majorité comme l'alternative la plus crédible de la théorie du Big Bang, garde une poignée de partisans. La théorie du pré-Big Bang, une variante de la théorie de l'inflation motivée par la théorie des cordes, a, elle aussi, plus d'un adepte. Toutefois, la théorie la plus provocatrice et la plus prometteuse est celle de la vitesse variable de la lumière (en anglais, *Varying Speed of Light*, VSL), sur laquelle, avec quelques collègues, nous travaillons depuis quelques années. Toutes ces théories peu orthodoxes ont au moins le mérite d'accroître encore la diversité haute en couleurs de la cosmologie. Elles sont aussi l'expression d'un doute lancinant : l'enthousiasme pour l'inflation et ses variantes ne cache-t-il pas une monstrueuse erreur d'interprétation ?

Les théories cosmologiques dominantes, telle l'inflation, reposent sur une hypothèse cruciale : la vitesse de la lumière et les autres constantes fondamentales ne varient pas avec le temps (ce sont des « constantes »). C'est sur ce postulat que repose l'inflation et ses phénoménales conséquences. Effectivement, ces constantes ne semblent pas évoluer, mais elles n'ont été testées au mieux que sur le dernier milliard d'années. En déduire que les constantes fondamentales n'ont pas changé depuis la naissance de l'Univers relève d'une extrapolation audacieuse. Que se passerait-il si, comme la température et la densité de l'Univers, les « constantes » fondamentales variaient au cours du temps ?

Notons que les physiciens ont moins de scrupules à faire varier certaines constantes que d'autres. Ainsi, la constante fondamentale de la gravitation, G , ou encore la charge élémentaire, e , ont déjà subi de semblables manipulations théoriques sans déclencher de protestations. En fait, depuis Paul Dirac et ses travaux sur la variation des constantes, dans les années 1930, jusqu'aux plus récentes des théories des cordes, la variation de G a toujours été à la mode. La vitesse de la lumière, c , au contraire, semble inviolable. C'est sans doute parce que la constance de la vitesse limite universelle est l'un des fondements de la théorie de la relativité. Cette théorie ensorcelle tellement les physiciens qu'ils ont introduit c dans tous leurs outils mathématiques. Ce n'est pas que les physiciens trouvent choquante l'idée de faire varier la vitesse de la lumière, c'est qu'ils ne peuvent même pas la concevoir.

Il serait temps que les cosmologistes perdent leurs œillères. Rappelons que la raison d'être de la théorie de l'inflation est de résoudre une difficulté de la théorie du Big Bang : le « paradoxe de l'horizon ». La lumière, ou toute autre forme d'interaction ne peut avoir parcouru qu'une distance finie depuis la naissance de l'Univers. Ainsi, lorsque l'Univers était âgé de un an, elle n'avait parcouru qu'une année-lumière. Des lignes d'horizon divisent donc l'Univers, et le séparent en régions qui ne peuvent « se voir ».

Cette vision à courte distance dans l'Univers est contraignante. Elle empêche les cosmologistes d'expliquer divers phénomènes cosmiques à partir des interactions connues en physique, au premier rang desquels l'uniformité de



L'IMAGE : G. H. HARRIS / ALAMY

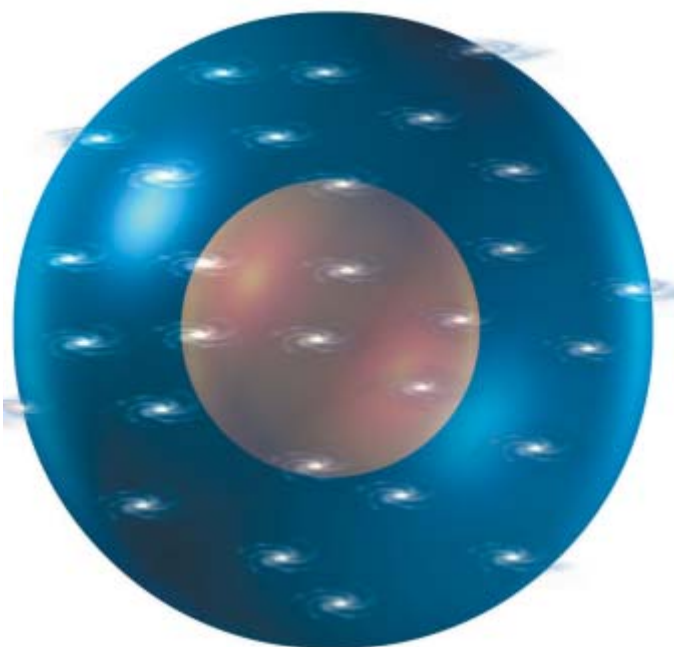
1. L'UNIVERS JEUNE – il avait tout juste un an – était subdivisé en sphères isolées, séparées par des « horizons » d'une année-lumière de rayon (les sphères bleues). Aujourd'hui, l'horizon est une sphère d'environ 15 milliards d'années-lumière de rayon (la sphère rouge), qui contient un nombre incommensurable de telles poches. Ce qui intrigue les astrophysiciens, c'est que, malgré leur isolement initial, toutes ces poches sont quasi identiques aujourd'hui. La théorie de l'inflation explique cette mystérieuse uniformité, et c'est là sa plus grande réussite.

l'Univers primordial. Quand on se limite à la théorie standard du Big Bang, on ne peut expliquer l'uniformité de l'Univers primordial qu'au prix d'un ajustement ultra-fin (quasi métaphysique) des conditions initiales.

La théorie de l'inflation résout habilement cette difficulté. Elle admet que, dans un Univers en expansion, la distance qui sépare une onde lumineuse de son point de départ est supérieure à la distance qu'elle a parcourue, parce que l'expansion ne cesse d'étirer l'espace déjà parcouru. Faisons une analogie : un conducteur roule à 60 kilomètres par heure. Au bout d'une heure, il a parcouru 60 kilomètres, mais si, pendant ce temps, la chaussée s'est étirée, la distance qui le sépare de son point de départ dépasse la distance parcourue. La théorie inflationniste postule que l'Univers primordial s'est enflé si vite que la distance parcourue par la lumière a été phénoménale. Des régions qui, sinon, seraient restées séparées, ont pu communiquer, et ont adopté la même température et la même densité. Puis, quand l'inflation a été terminée, ces régions ont commencé à se séparer.

Un tel scénario aurait pu se produire aussi si la lumière se propageait dans l'Univers primordial plus rapidement qu'aujourd'hui. La « lumière rapide » a pu relier des régions de l'Univers, qui, sinon, seraient restées séparées. De cette façon, ces régions se seraient homogénéisées. Puis, avec le ralentissement de la lumière, elles auraient perdu le contact.

C'est autour de cette idée fondatrice qu'Andreas Albrecht, de l'Université de Californie, John Barrow, de l'Université de Cambridge, et moi-même, avons élaboré la théorie de la vitesse variable de la lumière. Contrairement à une idée reçue, notre objectif n'était pas d'ennuyer les partisans de l'inflation, dont A. Albrecht est l'un des



2. L'INFLATION n'est pas la seule solution possible au paradoxe de l'horizon. Peut-être que, dans les conditions qui régnaient dans l'Univers primordial, la lumière se propageait un milliard de fois plus vite qu'aujourd'hui, voire davantage. Cette lumière rapide illuminait des régions de l'espace plus vastes qu'aujourd'hui (la sphère bleue). À mesure que la vitesse de la lumière diminuait, l'horizon apparent (la sphère orange) s'est rétréci. D'après cette conception, nous ne voyons aujourd'hui qu'une partie de la poche originelle ; le mystère de l'uniformité apparente de l'Univers serait résolu.

pères fondateurs. Nous voulions plutôt mettre en évidence les forces et les faiblesses de la théorie de l'inflation en explorant d'autres chemins.

La mise au point de notre théorie nous a naturellement obligé à repenser les fondements de la physique et leurs conséquences. Nous avons d'abord mené une attaque téméraire et d'une violence extrême contre la relativité générale, sans pour autant lui contester le mérite de résoudre plusieurs questions épineuses, notamment celle de la géométrie plane de l'Univers. Notre théorie explique, par exemple, pourquoi la constante cosmologique a aujourd'hui une valeur infime, mais non nulle. La raison en est que la densité d'énergie du vide, que représente la constante cosmologique, dépend beaucoup de la vitesse de la lumière. Une baisse de la valeur de c réduit la densité d'énergie du vide à une valeur négligeable, tandis que, normalement, elle prédomine. En revanche, dans les autres théories, on ne peut « diluer » l'énergie du vide.

Toutefois, notre théorie n'est qu'une possibilité parmi d'autres. Aujourd'hui, des astrophysiciens tentent de réconcilier la théorie de la vitesse variable de la lumière avec la relativité. John Moffat, de l'Université de Toronto, et Ian Drummond, à Cambridge, ont proposé des formulations plus prudentes de la théorie de la vitesse variable de la lumière, que les spécialistes de la relativité acceptent mieux. En fin de compte, il apparaît que le dogme d'une vitesse de la lumière constante n'est pas un postulat indispensable de la relativité. Si notre Univers est bien, comme le prévoit la théorie des cordes, une membrane tridimensionnelle dans un espace de dimension plus élevée, la vitesse apparente de la lumière pourrait varier dans notre espace à trois dimensions sans que la valeur de la « vraie » constante fondamentale ne change.

La vérification expérimentale seule dira si la nature a choisi de jouer avec la valeur de c ou si elle préfère l'inflation. Pour le moment, la théorie de la vitesse variable de la lumière est moins élaborée que celle de l'inflation, et elle devra faire des prévisions claires, sur la température du fond cosmologique diffus micro-onde, par exemple. Notons que certaines expériences laissent penser que la constante de structure fine pourrait ne pas être... constante. Or, cette constante qui caractérise les interactions électromagnétiques dépend directement de c . Ses variations seraient donc liées à celles de la vitesse de la lumière. Il reste à vérifier que les résultats de ces expériences résistent à un examen plus poussé. Il n'en demeure pas moins que l'idée d'une vitesse variable de la lumière reste un défi théorique. Elle se distingue de la théorie de l'inflation, notamment parce qu'elle remet en question les fondements de la physique. Marginale pour l'instant, elle représente une première exploration de la jungle des possibles.

João MAGUEIJO est maître de conférences en physique théorique à Londres (*Imperial College*).

Andreas ALBRECHT et João MAGUEIJO, *Time Varying Speed of Light as a Solution to Cosmological Puzzles*, in *Physical Review D*, vol. 59, n° 4, 15 février 1999.

João MAGUEIJO et KIM BASKERVILLE, *Big Bang Riddles and Their Revelations*, in *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 357, n° 1763, pp. 3221-3236, 15 décembre 1999.

João MAGUEIJO, *Covariant and Locally Lorentz-Invariant Varying Speed of Light Theories*, in *Physical Review D*, vol. 62, n° 10, 15 novembre 2000.

Le recyclage des protéines

ALFRED GOLDBERG • STEPHEN ELLEDGE • WADE HARPER

Des structures cellulaires, les protéasomes, détruisent en permanence des protéines. Diverses maladies apparaissent quand ces «usines d'incinération» fonctionnent trop ou, au contraire, pas assez.

Sans cesse, notre organisme est le lieu de combats dignes d'un film d'Indiana Jones. Il est fréquent qu'une protéine, s'efforçant d'accomplir sa mission, soit vouée à la destruction et aspirée dans un trou noir, où elle est rapidement mise en pièces. Contrairement à Indiana Jones, elle n'a aucune chance d'en réchapper. Dans la chambre de la mort, la protéine passe, tel un prisonnier médiéval, sur la table d'exécution ; elle y est soumise à mille et une lames enzymatiques qui l'achèvent. Quelques secondes plus tard, les morceaux sont éjectés pour être attaqués et digérés plus avant par d'autres enzymes.

Ce drame intracellulaire est sans doute insignifiant (sauf peut-être pour l'infortunée protéine), mais de nombreuses équipes, dont la nôtre, estiment aujourd'hui que ces abattoirs moléculaires, nommés protéasomes, jouent un rôle fondamental dans les mécanismes cellulaires. Une cellule contient près de 30 000 protéasomes. Quand ils fonctionnent mal, soit qu'ils engloutissent trop de protéines vitales, soit qu'ils ne détruisent pas les protéines endommagées ou anormales, des maladies risquent d'apparaître. Certains virus, tel le virus de l'immunodéficience humaine, le VIH, ont même acquis la capacité de détourner à leur profit la chambre de dégradation des protéines. Les prochains médicaments contre le cancer et d'autres maladies graves agiront peut-être sur les protéasomes et sur les voies d'acheminement des protéines vers ces organites.

Un renouvellement bénéfique

Les cellules sont essentiellement constituées de protéines, dont certaines agissent comme des enzymes, les moteurs moléculaires des réactions chimiques de la vie. Les protéines produites par une cellule dépendent des gènes activés à un moment donné. Les gènes imposent la façon dont les 20 sous-unités élémentaires des protéines, les acides aminés, sont assemblées. Les chaînes se replient en boucles plus ou moins compactes ; chaque protéine a une fonction spécifique qui est déterminée par sa composition chimique, mais aussi par sa forme géométrique.

Que se passe-t-il lorsque les protéines ne servent plus à rien ou s'enroulent mal ? On a longtemps supposé que les lysosomes, de petits sacs d'enzymes digestives présents dans la plupart des cellules de l'organisme, étaient les lieux privilégiés de la dégradation des protéines. Toutefois, au début des années 1970, l'un de nous (Alfred Goldberg) a montré que les cellules dépourvues de lysosomes, tels les bactéries ou les globules rouges immatures, sont néanmoins capables de détruire leurs protéines anormales, ce mécanisme de dégradation nécessitant de l'énergie, contrairement aux autres.

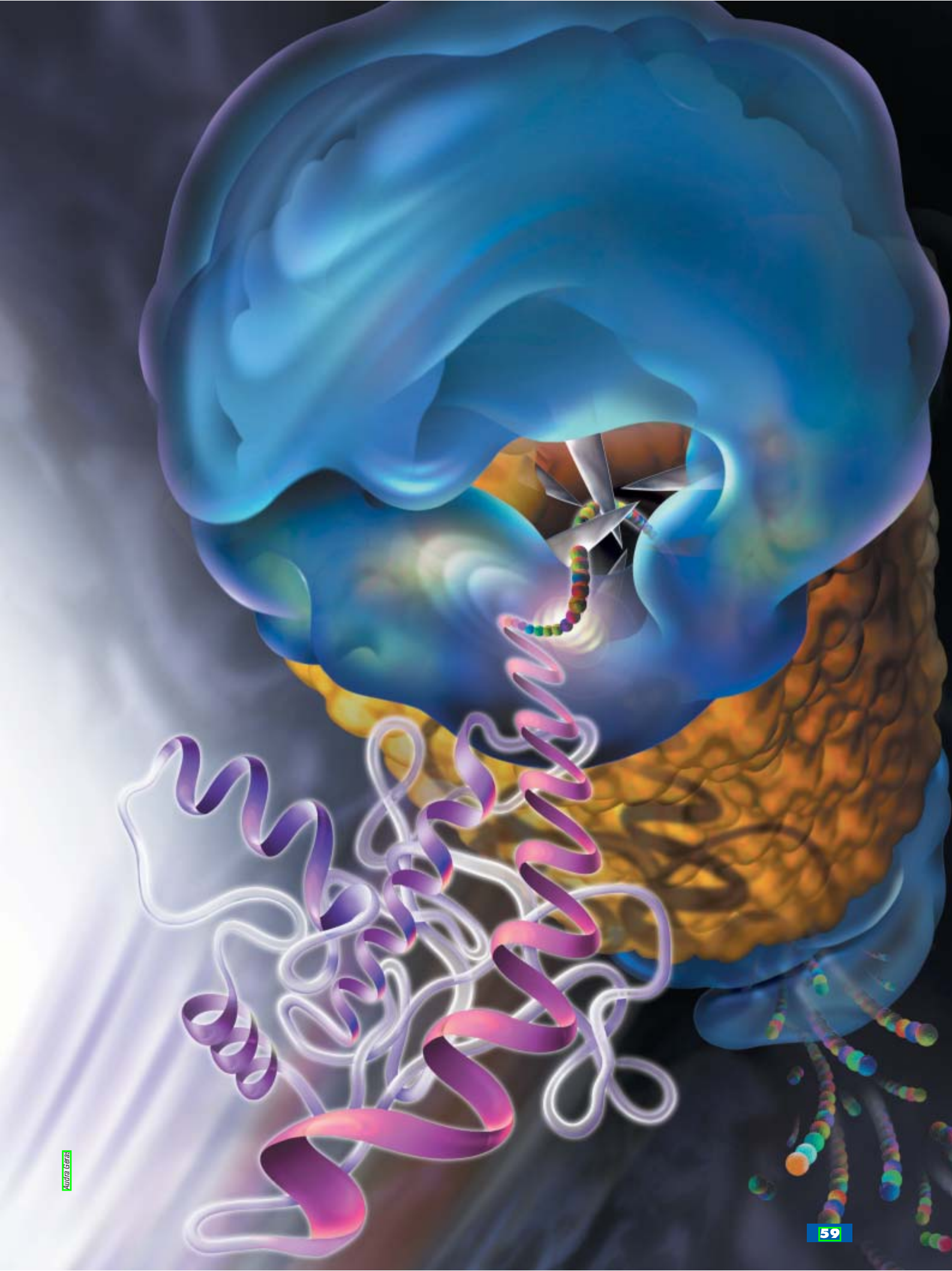
Nous avons réussi à étudier ce nouveau type de dégradation en laboratoire, et, à la fin des années 1970 et durant les années 1980, plusieurs enzymes ont été découvertes. En 1988, le groupe de A. Goldberg et celui de Martin Rechsteiner, de l'Université de l'Utah, montrèrent que les protéines

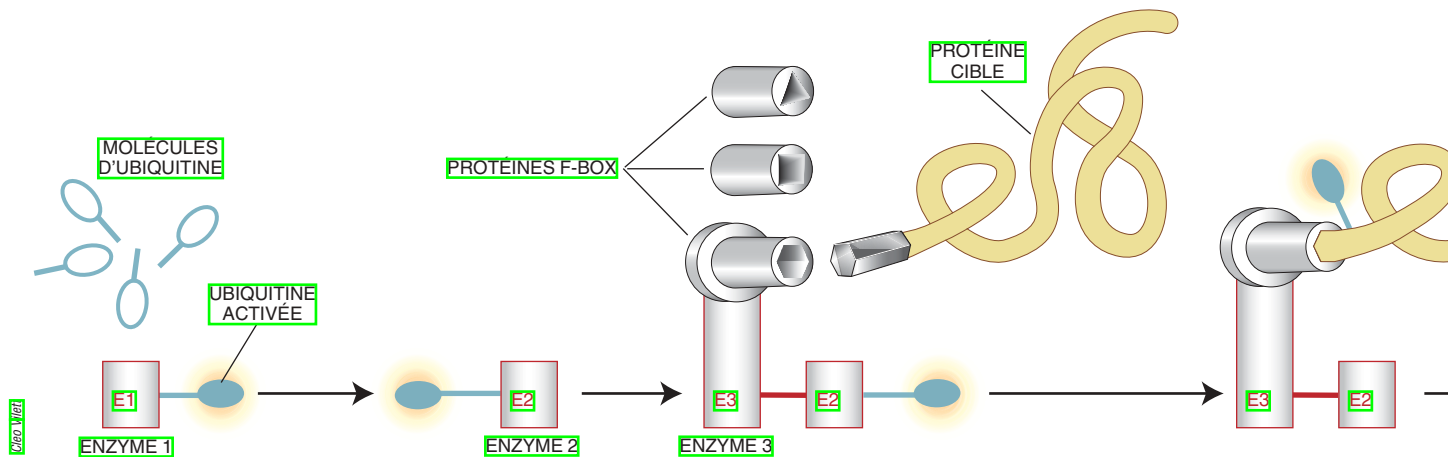
sont dégradées par de grands complexes constitués de plusieurs enzymes, qui ont été nommés protéasomes.

Les protéasomes contiennent de nombreuses protéases, des enzymes qui découpent les protéines en morceaux. Toutefois, les protéasomes sont 100 fois plus grands et plus complexes que les autres protéases. Quand une protéine s'approche du seuil d'un protéasome, elle est aspirée et déchiquetée en acides aminés, lesquels seront réassemblés pour former de nouvelles protéines. La durée de vie de la plupart des protéines n'excède pas quelques jours, même dans des cellules qui se divisent peu, telles les cellules du foie ou du système nerveux. Les vitesses de dégradation varient : certaines ont une demi-vie d'une vingtaine de minutes, d'autres dans la même cellule subsistent pendant des jours, voire des semaines (la demi-vie représente le temps qu'il faut pour que la moitié de la quantité initiale de protéines soit dégradée). Qui plus est, les vitesses de dégradation peuvent varier notablement selon l'état de l'organisme.

A priori, la destruction continue des constituants cellulaires semble être un énorme gaspillage, mais elle a, pourtant, diverses fonctions. La dégradation

1. UN PROTEASOME attire une protéine (structure en ruban, en bas à gauche) dans sa gueule pour la détruire à l'aide de six enzymes spécifiques, représentées ici par six lames de couteau. Chaque cellule contient des milliers de protéasomes, qui découpent les protéines à éliminer en fragments de différentes tailles ; ces derniers sont ensuite dégradés par d'autres enzymes en constituants élémentaires des protéines, les acides aminés, lesquels sont recyclés pour former de nouvelles protéines.





d'une protéine indispensable, une protéine de régulation, par exemple, sert souvent à ralentir ou à bloquer une réaction biochimique. Par ailleurs, de nombreux mécanismes cellulaires sont activés par la dégradation de protéines inhibitrices. Une élimination rapide des protéines régulatrices est indispensable au bon enchaînement des différentes phases du cycle de la division cellulaire (voir l'encadré page 62).

La dégradation des protéines intervient aussi dans la régulation du métabolisme de l'organisme. En cas de malnutrition ou de maladie, par exemple, l'activité des protéasomes s'intensifie dans les muscles, fournissant ainsi des acides aminés qui peuvent être convertis en glucose et produire de l'énergie. Cette accélération de la dégradation des protéines explique la fonte musculaire et la faiblesse des personnes qui souffrent de la faim ou qui sont atteintes de cancer, du SIDA ou de diabète non traité.

Le système immunitaire cherche en permanence à éliminer des cellules infectées par un virus ou les cellules cancéreuses ; il est sans cesse à l'affût des « balises » que les protéasomes plantent sur ces cellules dangereuses pour les repérer. Le système immunitaire se comporte à cette occasion comme une logeuse qui, dévorée par les soupçons, vérifierait tous les jours le contenu de la boîte à ordures de ses locataires, pour s'assurer qu'ils ne font rien de répréhensible. En général, les protéines cellulaires sont totalement dégradées en acides aminés, mais, parfois, quelques fragments de huit à dix acides aminés sont libérés par les protéasomes, exposés à la surface des cellules, où ils sont examinés par le système immunitaire qui vérifie qu'ils sont normaux. Durant certains états pathologiques, des pro-

téasomes particuliers, nommés immunoprotéasomes, sont produits dans certains tissus, tels la rate et les ganglions lymphatiques, et améliorent l'efficacité de ce mécanisme de surveillance.

La dégradation des protéines par les protéasomes est également un système cellulaire de contrôle de la qualité, qui empêche l'accumulation de protéines anormales et potentiellement toxiques. Les bactéries et les cellules de mammifères détruisent sélectivement les protéines dont les anomalies notables ont été engendrées par des mutations, par des erreurs lors de la synthèse ou par des lésions.

La dégradation des protéines anormales joue un rôle important lors de diverses maladies génétiques. Dans certaines anémies héréditaires, les molécules d'hémoglobine sont anormales, car le gène qui les code est muté : les protéines se replient mal et sont rapidement détruites par les protéasomes, peu après leur synthèse. De même, la mucoviscidose est due à une mutation sur le gène codant une protéine canal qui assure le passage des ions chlorure à travers la membrane externe des cellules. Ces protéines-canal sont légèrement déformées, de sorte que les protéasomes les dégradent avant qu'elles n'atteignent la membrane cellulaire. Le mucus épais qui s'accumule dans les poumons et dans d'autres organes des personnes atteintes de mucoviscidose résulte du manque de transporteurs normaux d'ions chlorure.

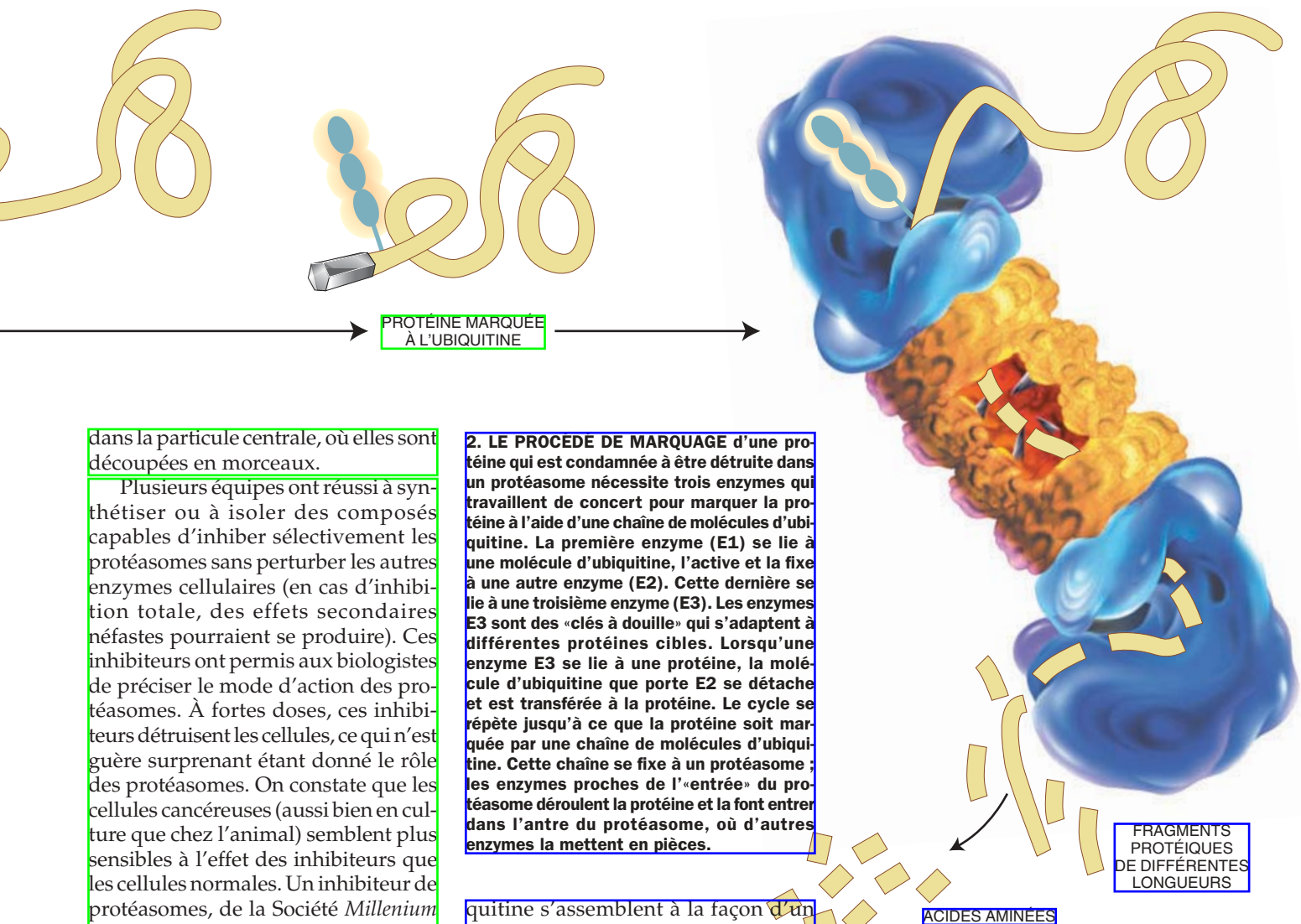
Au contraire, d'autres maladies seraient partiellement dues à une dégradation insuffisante de protéines anormales par les protéasomes. Ainsi, des agrégats de protéines mal repliées, associés à des protéasomes, s'accumulent dans certains neurones, dans le cerveau des personnes atteintes de

maladies neurodégénératives, telles les maladies de Parkinson, de Huntington ou d'Alzheimer. Plusieurs équipes recherchent activement pourquoi les neurones de ces personnes ne parviennent pas à dégrader les protéines anormales.

Dans le ventre du monstre

Vue d'une protéine, les protéasomes sont des structures énormes. La masse d'une protéine moyenne est comprise entre 40 000 et 80 000 fois celle d'un atome d'hydrogène, tandis que la plupart des protéasomes des organismes supérieurs sont 50 fois plus lourds. Au milieu des années 1990, Wolfgang Baumeister, Robert Huber et leurs collègues de l'Institut de biochimie Max Plank, à Martinsried, ont utilisé la diffraction des rayons X et la microscopie électronique pour déterminer l'architecture moléculaire des protéasomes. Chacune de ces structures comprend une particule centrale formant un tunnel, et une ou deux particules régulatrices plus petites, placées à l'une ou à l'autre des extrémités (ou aux deux), comme des capuchons. La partie centrale est constituée de quatre anneaux empilés, chacun comprenant sept sous-unités, entourant un canal central qui constitue le « tube digestif » du protéasome. Les deux anneaux externes serviraient de portails, empêchant les protéines passant à proximité de pénétrer par erreur dans la chambre de dégradation.

De même, les « capuchons » régulateurs seraient des gardiens surveillant attentivement l'entrée dans la partie centrale. Ces particules régulatrices reconnaissent les protéines vouées à la destruction et s'y fixent, puis consomment de l'énergie pour dérouler les protéines et les injecter



dans la particule centrale, où elles sont découpées en morceaux.

Plusieurs équipes ont réussi à synthétiser ou à isoler des composés capables d'inhiber sélectivement les protéasomes sans perturber les autres enzymes cellulaires (en cas d'inhibition totale, des effets secondaires néfastes pourraient se produire). Ces inhibiteurs ont permis aux biologistes de préciser le mode d'action des protéasomes. À fortes doses, ces inhibiteurs détruisent les cellules, ce qui n'est guère surprenant étant donné le rôle des protéasomes. On constate que les cellules cancéreuses (aussi bien en culture que chez l'animal) semblent plus sensibles à l'effet des inhibiteurs que les cellules normales. Un inhibiteur de protéasomes, de la Société Millenium Pharmaceuticals, à Cambridge, testé chez l'homme, a prouvé son innocuité, et sera évalué dans le traitement de divers cancers, notamment le myélome multiple, dans le cadre d'un essai clinique qui devrait commencer bientôt. Un autre inhibiteur de protéasomes est en cours d'essai préliminaire, et pourrait agir contre les accidents vasculaires cérébraux et contre l'infarctus du myocarde.

Le baiser de la mort

Les protéasomes n'agissent pas au hasard. Ce sont les cellules elles-mêmes qui indiquent lesquelles de leurs protéines sont condamnées. Ces protéines sont d'abord marquées par une autre protéine, nommée ubiquitine, qui, comme son nom l'indique, est ubiquitaire, c'est-à-dire présente dans de nombreux organismes vivants. L'ubiquitine est une petite protéine (76 acides aminés), qui peut se fixer sur les grosses protéines. Plusieurs sous-unités d'ubi-

2. LE PROCÉDE DE MARQUAGE d'une protéine qui est condamnée à être détruite dans un protéasome nécessite trois enzymes qui travaillent de concert pour marquer la protéine à l'aide d'une chaîne de molécules d'ubiquitine. La première enzyme (E1) se lie à une molécule d'ubiquitine, l'active et la fixe à une autre enzyme (E2). Cette dernière se lie à une troisième enzyme (E3). Les enzymes E3 sont des «clés à douille» qui s'adaptent à différentes protéines cibles. Lorsqu'une enzyme E3 se lie à une protéine, la molécule d'ubiquitine que porte E2 se détache et est transférée à la protéine. Le cycle se répète jusqu'à ce que la protéine soit marquée par une chaîne de molécules d'ubiquitine. Cette chaîne se fixe à un protéasome ; les enzymes proches de l'«entrée» du protéasome déroulent la protéine et la font entrer dans l'antre du protéasome, où d'autres enzymes la mettent en pièces.

quitine s'assemblent à la façon d'un code postal qui accélère l'acheminement des protéines condamnées vers les protéasomes.

Le signal de la destruction est donné par la fixation des chaînes d'ubiquitine, l'ubiquitination, qui consomme de l'énergie, comme l'ont montré Avram Hershko et Aaron Ciechanover, de l'Institut de technologie Technion, à Haïfa, et Irwin Rose, du centre anticancéreux Fox Chase, à Philadelphie.

L'ubiquitination se déroule en plusieurs étapes et fait intervenir trois enzymes, nommées E1, E2 et E3 (voir la figure 2). L'enzyme E1 active l'ubiquitine, qui se lie à E2. La troisième enzyme, E3, facilite ensuite le transfert de l'ubiquitine activée de E2 vers la protéine. L'opération se répète jusqu'à ce qu'une longue chaîne de molécules d'ubiquitine pende de la protéine. Dès qu'un protéasome détecte une telle chaîne, il aspire la protéine.

Comment une protéine est-elle «choisie» pour subir une ubiquitination ? Avec d'autres biologistes, nous

avons récemment découvert qu'il y a des centaines de protéines E3 différentes qui reconnaissent les informations contenues dans les séquences d'acides aminés des protéines, et qui choisissent les cibles de l'ubiquitination. Quand les conditions physiologiques changent, par exemple lors d'une infection ou d'un manque de nutriments, les cellules modifient leurs protéines en leur ajoutant des groupes phosphate. Cette phosphorylation influe sur l'activité des protéines et sur leur capacité à fixer les protéines E3. Ces dernières détectent les protéines qui ne sont pas correctement repliées ou qui sont endommagées, elles vont à leur rencontre et leur apposent une marque, afin qu'elles soient happées par les protéasomes.

En contrôlant la stabilité de diverses protéines critiques, les molécules E3 régulent de nombreux mécanismes, tels le développement des membres, les réactions immunitaires, la

division cellulaire et la communication entre cellules. Les rythmes circadiens et la floraison des plantes sont également dictés par des enzymes E3. Qui plus est, certaines protéines E3 ont des propriétés antitumorales ; d'autres, au contraire, favoriseraient l'apparition des cancers : ubiquitination et apparition de cancers semblent liées

Ainsi, le facteur antitumoral VHL est une protéine E3 souvent mutée dans les tumeurs du rein. Normalement, VHL retarde la croissance cellulaire en entravant le développement des vaisseaux sanguins dans les tissus ; lorsqu'il est muté, les tumeurs nouvellement formées sont capables de déclencher une

vascularisation importante qui favorise leur croissance. Par ailleurs, on a découvert qu'une forme héréditaire de la maladie de Parkinson est due à une mutation dans le gène codant une des enzymes E3 : l'enzyme E3 étant anormale, des protéines s'accumulent dans certaines cellules cérébrales, entraînant leur mort.

Les virus, qui détournent la machinerie cellulaire à leur profit, ont acquis la capacité d'éviter l'ubiquitination et, par conséquent, la dégradation de leurs protéines. Les papillomavirus responsables de verrues, du cancer du col de l'utérus ou du cancer de l'anus ont acquis ces mécanismes d'évitement. La transformation vers la croissance can-

céreuse est généralement inhibée par la protéine de défense p53, l'une des protéines antitumorales de l'organisme. Pour déjouer ce dispositif de défense, les papillomavirus produisent une protéine qui se lie à la fois à la protéine p53 et à une enzyme E3. Ainsi, c'est la protéine p53 qui subit l'ubiquitination et qui est vouée à la destruction dans les protéasomes (et non les protéines virales). Les cellules infectées par les papillomavirus perdent un moyen de lutte efficace contre le cancer et risquent davantage de devenir tumorales.

Le virus de l'immunodéficience humaine, le VIH, utilise un stratagème similaire pour détruire la protéine de

Division cellulaire et mort des protéines

L'un des meilleurs exemples de l'importance que revêt la capacité des cellules à détruire les protéines est celui de la division cellulaire chez *Saccharomyces cerevisiae*, la levure de boulanger. Avant de se diviser, une cellule de levure (tout comme une cellule humaine) doit d'abord recopier son ADN. Pour que la synthèse de l'ADN commence, une classe particulière de protéines cellulaires, nommées Cdk de phase S, doit d'abord s'activer ; ces protéines sont constituées de deux protéines, une cycline et une sous-unité Cdk.

Normalement, les protéines Cdk de phase S sont inactives, car elles sont liées à des protéines inhibitrices, nommées CKI, produites durant la division cellulaire précédente. Pour activer les Cdk de phase S, une cellule doit se débarrasser de ces protéines inhibitrices en les envoyant vers un protéasome pour qu'elles y soient détruites.

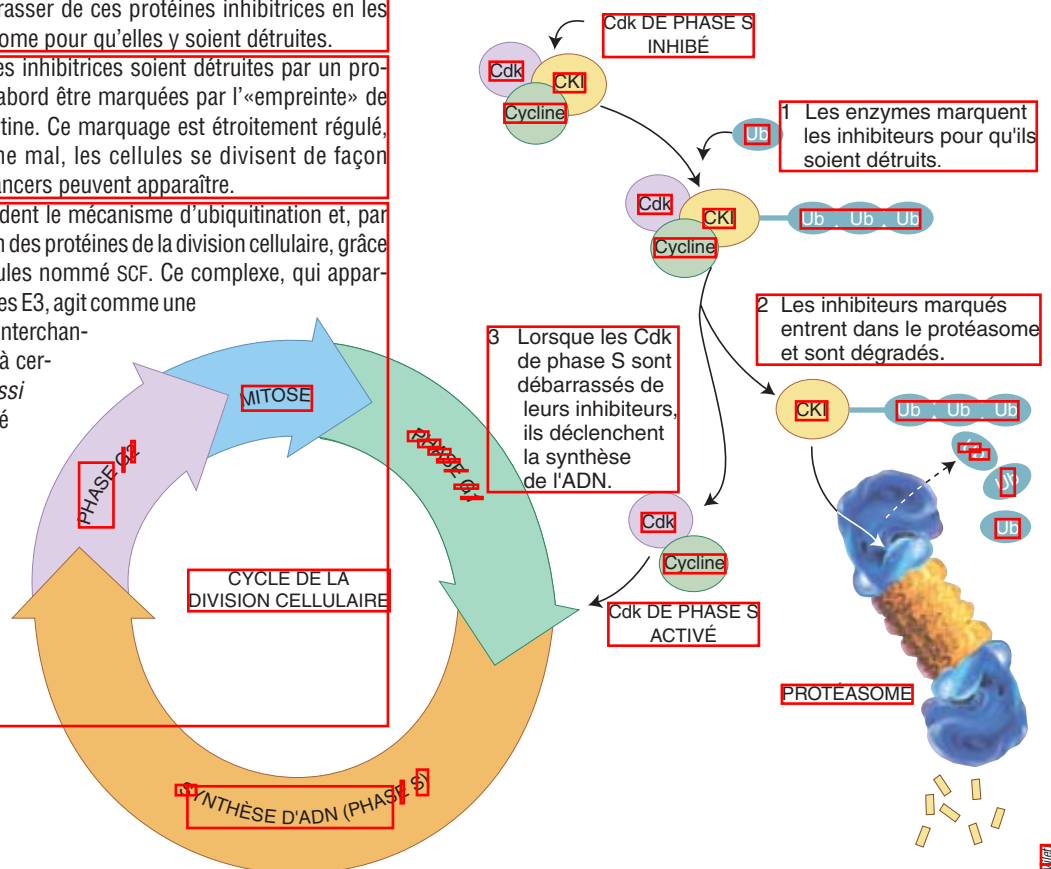
Pour que les protéines inhibitrices soient détruites par un protéasome, elles doivent d'abord être marquées par l'« empreinte » de la condamnation, l'ubiquitine. Ce marquage est étroitement régulé, mais, quand il fonctionne mal, les cellules se divisent de façon incontrôlée, et certains cancers peuvent apparaître.

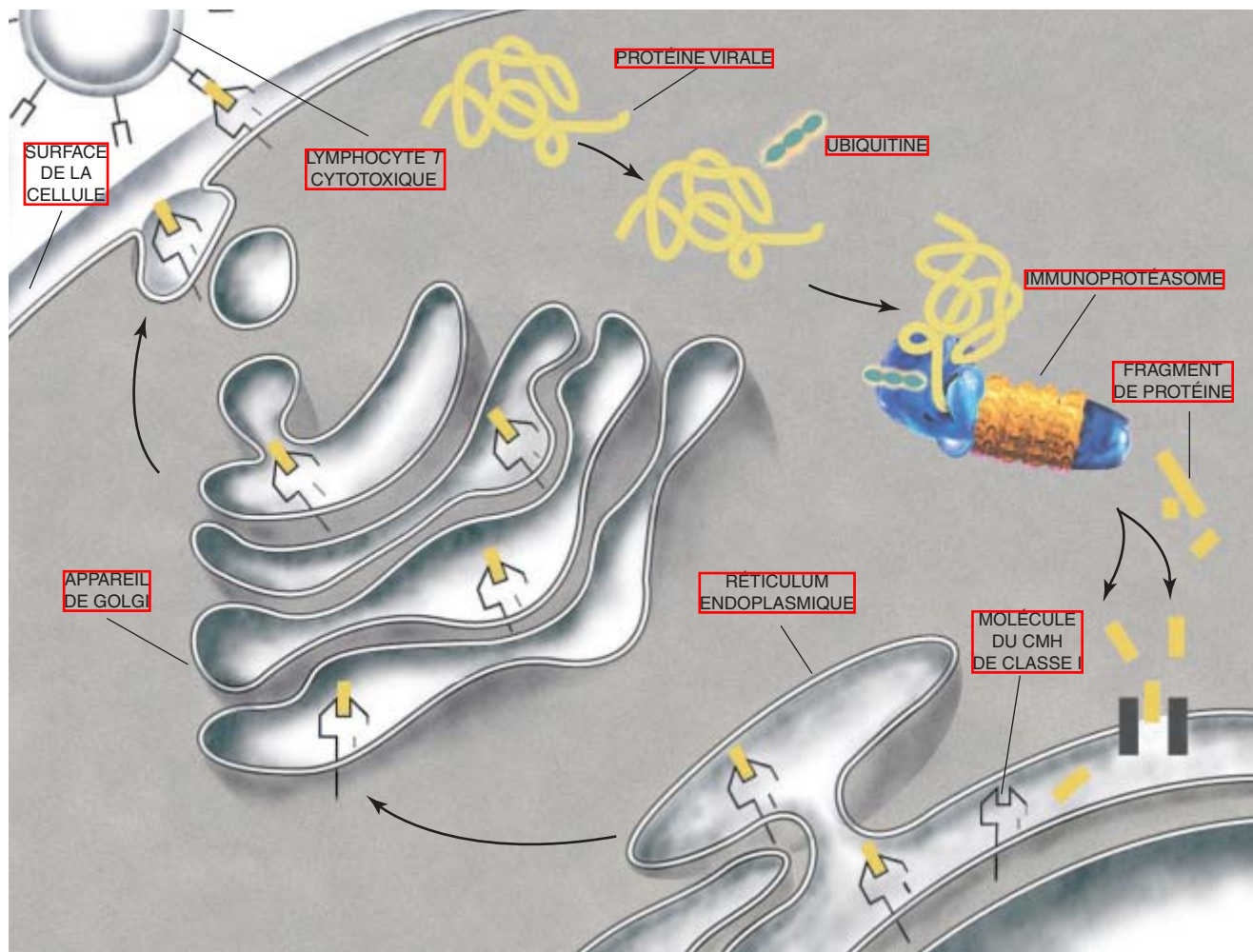
Les cellules commandent le mécanisme d'ubiquitination et, par conséquent, la dégradation des protéines de la division cellulaire, grâce à un complexe de molécules nommé SCF. Ce complexe, qui appartient au groupe des enzymes E3, agit comme une clé à douille dont la tête interchangeable se lie uniquement à certaines protéines (voir aussi la figure 2). On a identifié plus de 217 de ces « têtes interchangeables », les protéines F-box, chez le ver nématode *Caenorhabditis elegans* ; on en compte déjà plusieurs dizaines découvertes dans les cellules humaines, et leur nombre ne cesse d'augmenter.

Le complexe SCF utilise son jeu spécifique de têtes interchangeables pour reconnaître les protéines que le protéasome

doit dégrader. En fait, les cellules choisissent les protéines à dégrader en leur ajoutant un groupe phosphate ; elles peuvent alors se lier aux protéines du complexe SCF, lequel sert également d'intermédiaire pour rapprocher les protéines condamnées des enzymes qui leur collent l'étiquette de mort, l'ubiquitine.

La variété de ses complexes SCF permet à une cellule de contrôler à tout moment le type et la quantité des protéines disponibles. Les protéines régulées par les complexes SCF sont notamment celles qui déclenchent ou arrêtent le cycle de la division cellulaire, et celles qui activent les gènes.





3. LE SYSTEME IMMUNITAIRE est aidé par des protéasomes spécialisés, les immunoprotéasomes, pour distinguer les cellules saines d'avec les cellules cancéreuses ou infectées par un virus. Ici, une protéine virale est marquée à l'ubiquitine pour être détruite par un immunoprotéasome. Les fragments de la protéine virale d'une dizaine d'acides aminés qui sont expulsés de l'immunoprotéasome pénètrent ensuite dans le réticulum endoplasmique, où ils

sont pris en charge par des molécules du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH) de classe 1. Ces molécules traversent l'appareil de Golgi et parviennent à la surface de la cellule, où elles ont entraîné des fragments de protéine virale. Des cellules immunitaires, les lymphocytes T cytotoxiques, reconnaissent comme étrangers les fragments de virus présentés par les molécules du complexe majeur d'histocompatibilité de classe I, et tuent la cellule infectée.

surface CD4, porte d'entrée du virus dans les cellules qu'il infecte, mais qui limite la production de nouvelles particules virales. La protéine CD4 est le site d'amarrage du VIH sur ses cibles, les lymphocytes T du système immunitaire. Le contact s'établit entre la protéine CD4 du lymphocyte et la protéine gp120 présente à la surface du virus. Toutefois, l'affinité entre ces protéines est telle que, lorsque le VIH produit des protéines pour former de nouvelles particules virales, les protéines CD4 adhèrent aux protéines gp120 nouvellement synthétisées et les empêchent de s'assembler aux autres protéines virales. Pour éviter cela, le VIH a sélectionné une protéine nommée Vpu, qui accélère l'élimination des protéines CD4 : elle se fixe à la fois à CD4 et à un complexe contenant une enzyme E3, de sorte que les protéines CD4 subissent

une ubiquitination et sont englouties par les protéasomes.

L'importance des protéines E3 dans l'apparition de certaines maladies se confirme tous les jours, et ces enzymes seront sans doute la cible de futurs médicaments. Chaque protéine E3 étant responsable de la destruction de quelques protéines seulement, des inhibiteurs de ces enzymes E3 devraient être très

spécifiques et, par conséquent, quasi dépourvus d'effets secondaires. Comme on a identifié plusieurs grandes familles d'enzymes E3, on devrait bientôt découvrir plusieurs familles de médicaments. À mesure que nous découvrons les secrets des protéasomes et des mécanismes de sélection par l'ubiquitine, nous mesurons combien la vie dépend de la mort des protéines.

Alfred GOLDBERG est professeur de biologie cellulaire à la Faculté de médecine de Harvard. Stephen ELLEDGE est professeur de biochimie à la Faculté de médecine Baylor, où Wade HARPER est professeur de physiologie et de biophysique.

Deanna KOEPP, Wade HARPER et Stephen ELLEDGE, *How the Cyclin Became*

a Cyclin : Regulated Proteolysis in the Cell Cycle, in *Cell*, vol. 97, n° 4, pp. 431-434, 14 mai 1999.

Stu BORMAN, *Intricacies of the Proteasome*, in *Chemical and Engineering News*, vol. 78, n° 2, pp. 43-47, 20 mars 2000.

Alfred GOLDBERG, *Probing the Proteasome Pathway*, in *Nature Biotechnology*, vol. 18, n° 5, pp. 494-496, 18 mai 2000.

L'effet tunnel et les protéines

MARK JOHNSON • GORDON KEARLEY

Une sonde à effet tunnel explore les interactions au sein des molécules biologiques. Elle devrait révéler les mécanismes de repliement des protéines, qui commandent l'activité de ces molécules.

Un organisme humain est une énorme « machine » : des réactions biochimiques s'y déroulent en continu. Les protéines sont des acteurs essentiels de ces réactions et des mécanismes cellulaires. Ces longues chaînes constituées de milliers d'atomes présentent une étonnante propriété : pour être actives, elles doivent être repliées correctement sinon, leur fonction est perturbée. La forme d'une protéine est imposée par les interactions entre les atomes.

Dans une protéine, les liaisons interatomiques fortes assurent l'« ossature » de la molécule, mais les interactions faibles régissent leur conformation, leur dynamique et, par conséquent, leur activité biologique. Grâce à la croissance incessante de la puissance informatique, on obtient des simulations de telles molécules, mais, à cause de la taille des protéines, les interactions faibles sont difficiles à évaluer.

En outre, à température ambiante, l'agitation thermique est si élevée que la mesure des interactions faibles équivaut à la détermination des forces déployées par une fourmi qui se fraye un chemin parmi une horde d'éléphants. En raison de cette agitation thermique, les atomes oscillent autour de leur position d'équilibre, et cette énergie masque les interactions faibles que nous étudions. Pourtant, nous l'avons souligné, ces forces faibles imposent la forme et la dynamique des protéines. Dans ces conditions, quelle fiabilité pouvons-nous accorder aux simulations des protéines ? Pour le savoir, nous avons mis au point une méthode d'évaluation des interactions

faibles. Nous étudions des molécules simples (moins de 30 atomes) à basse température, plus précisément à 4,2 kelvins, la température de l'hélium liquide. À ces températures proches du zéro absolu, l'agitation thermique est presque inexistante. En figeant les éléphants dans leur position, ne paralyse-t-on pas également la fourmi ? Non, car, même au zéro absolu, les effets quantiques subsistent et nous nous servons de l'un d'eux, l'effet tunnel des protons – nos fourmis – pour déterminer les interactions faibles.

Des milliards de formes pour une protéine

Les protéines sont composées d'une succession de plusieurs centaines d'acides aminés. Lors d'un repliement, certains de ces acides se rapprochent et créent des « sites actifs », constitués de groupes éloignés sur la molécule dépliée, mais proches dans la conformation biologiquement active. Ces sites actifs sont des lieux d'interaction avec d'autres molécules : ainsi, un antigène agit avec le site actif de son anticorps spécifique, à condition que ce dernier soit dans sa conformation active. Dans le cas contraire, l'interaction n'a pas lieu, l'anticorps ne neutralise pas son antigène, viral par exemple, et une maladie peut survenir. Chaque protéine, selon les séquences d'acides aminés qui la composent, prend une conformation unique et bien définie dans l'espace : les chaînes s'enroulent et forment des boucles, des hélices ou des feuillettes (voir la figure 1). Il existe 20 acides aminés différents, ce qui

confère aux protéines une extraordinaire variété de structures et de formes : le nombre de conformations possibles est gigantesque. Les protéines adoptent les conformations les plus stables, c'est-à-dire celles qui ont les énergies les plus faibles. Or, on ne sait pas calculer avec précision ces énergies, ni prévoir les conformations des protéines : on ignore le plus souvent pourquoi une protéine prend une forme plutôt qu'une autre, tant les interactions sont difficiles à évaluer (voir la figure 2).

Les liaisons intramoléculaires qui soudent les atomes les uns aux autres et assurent la cohésion de l'ossature de la protéine sont de trois types : la liaison covalente, la plus forte de toutes, provient de l'appariement d'électrons périphériques célibataires des atomes ; la liaison ionique, de nature électrostatique, s'établit entre deux atomes portant des charges opposées ; et la liaison hydrogène, de nature électrostatique, établit un pont entre un atome d'hydrogène et un atome électronégatif, d'oxygène ou d'azote par exemple (doté d'un doublet libre).

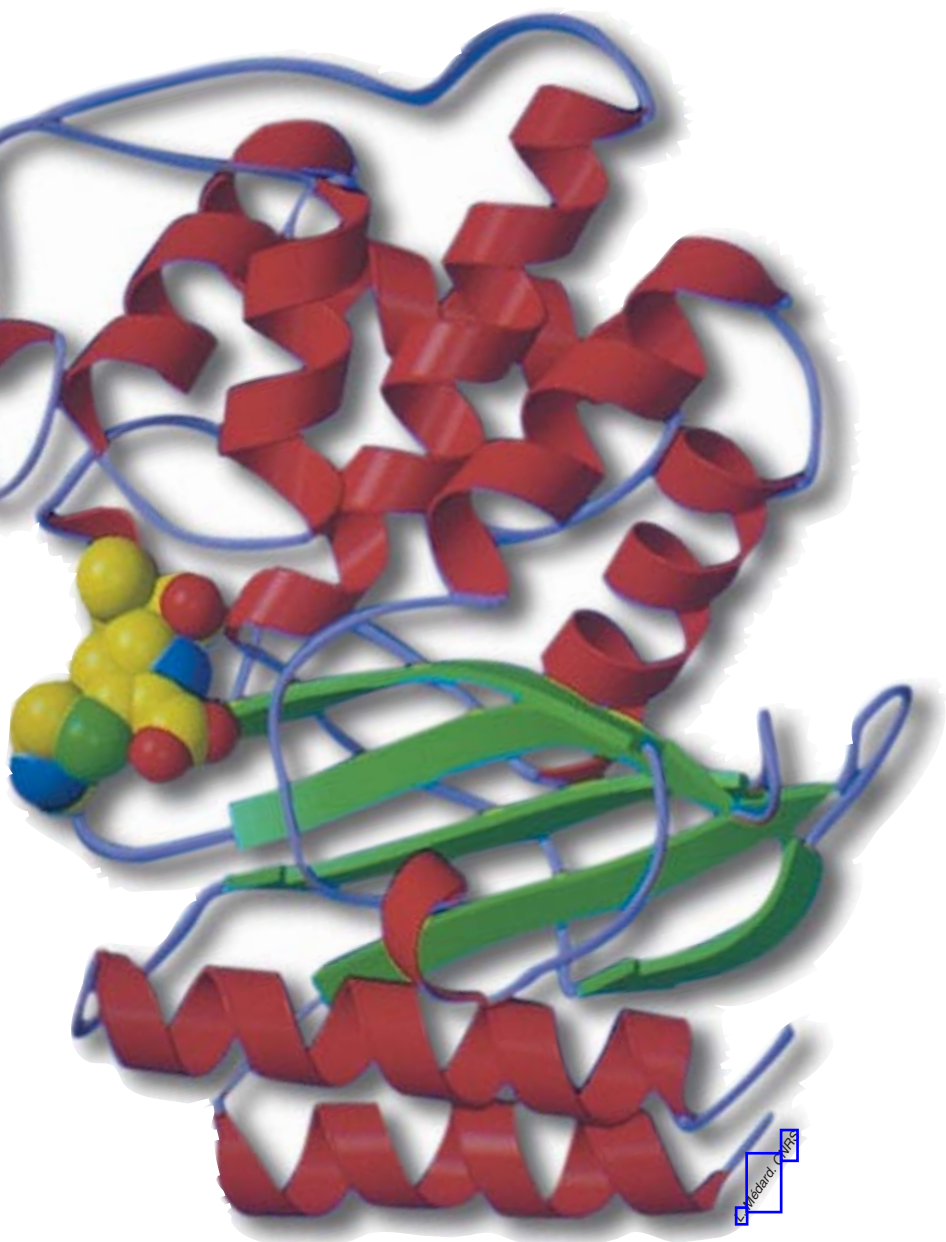
L'ossature d'une protéine n'est pas immobile, et les atomes bougent les uns par rapport aux autres. Leurs déplacements engendrent d'autres interactions intramoléculaires, plus faibles que les liaisons atomiques. Une liaison covalente, qui a une longueur moyenne stable, s'allonge ou se raccourcit en raison des fluctuations de l'ossature. Elle se comporte comme un ressort, et les atomes subissent une importante force de rappel, nommée interaction d'élongation. Deux liaisons

entre trois atomes dessinant un V prennent un mouvement semblable à celui de ciseaux, provoquant une interaction de cisaillement. Enfin, une liaison se tord en «vrille» quand les deux liaisons adjacentes se déplacent dans des directions opposées ; les atomes sont alors soumis à une interaction de torsion (voir la figure 2). Cette interaction de torsion est la plus faible des trois interactions intramoléculaires : elle est environ cinq fois inférieure à l'interaction de cisaillement.

Interactions intermoléculaires

Outre les liaisons atomiques et les interactions intramoléculaires, d'autres interactions surviennent entre les atomes de deux molécules (ou de deux parties distantes d'une même molécule). Elles sont de type coulombien (ou électrostatique) : les atomes porteurs de charges partielles opposées s'attirent et ceux de charges partielles identiques se repoussent. Elles sont aussi de type Van der Waals (non électrostatiques) : les atomes se repoussent à courte distance à cause de l'imbrication de leurs nuages électroniques et ils s'attirent lorsque la distance est grande en raison des forces d'interaction des dipôles induits.

Les liaisons qui assurent la cohésion de la chaîne entre les atomes sont supérieures aux interactions de cisaillement, elles-mêmes supérieures aux interactions de torsion, coulombiennes et de Van der Waals, dont l'énergie est seulement de l'ordre de quelques dizaines de milliélectronvolts. Ces trois interactions faibles de type torsion, coulombien et Van der Waals sont pourtant responsables de la forme des protéines repliées. À titre d'exemple, le repliement d'une protéine dans son solvant s'accompagne du déplacement de centaines de liaisons hydrogène, de milliers de transferts de charges électrostatiques, mais il s'effectue à température ambiante, où l'énergie thermique disponible est faible. Ces modifications s'effectuent de façon concertée et «économique», et ne nécessitent qu'une énergie extrêmement faible. Au total, malgré ce déploiement, l'énergie du repliement ne dépasse pas quelques dizaines de milliélectronvolts (ce qui correspond à la température ambiante, car une énergie de 25,8 milliélectronvolts équivaut à 300 kelvins).



1. LES PROTEINES prennent une forme en hélices (en rouge), en feuillets (en vert) ou en boucles (en bleu), en fonction de la succession des acides aminés qui les composent. Les protéines deviennent actives une fois repliées. Le repliement se produit à température ambiante, c'est-à-dire qu'il nécessite une énergie très faible. Des groupes d'atomes éloignés se rapprochent et créent ainsi des sites actifs.

Les différentes interactions de tous les atomes constituent ce que l'on nomme un «champ de forces». Les biologistes effectuent des simulations numériques des protéines à partir de ce champ de forces : soit ils modifient une structure initiale afin de minimiser l'énergie potentielle (et déterminer les positions atomiques correctes), soit ils calculent la dynamique de la structure à l'aide des équations de Newton (qui donnent l'accélération en fonction des forces appliquées).

La moindre erreur dans l'estimation des interactions faibles fausse les simulations. Par exemple, un repliement se différencie d'un autre par une énergie de l'ordre de un milliélectron-

volt par acide aminé. Quand les erreurs sur les interactions faibles sont trop grandes, l'erreur sur ces simulations atteint quelques dizaines d'électronvolts. Comme les prévisions météorologiques, les simulations sont plausibles, mais pas entièrement fiables. Comment améliorer l'évaluation des interactions faibles et par conséquent la fiabilité des simulations de la structure et de la dynamique des protéines?

Pour ce faire, nous avons mis au point une méthode fondée sur un effet quantique connu depuis la naissance de la physique quantique : l'effet tunnel. Cet effet décrit la probabilité qu'une particule franchisse une barrière d'énergie, bien que sa propre énergie soit inférieure

à celle de la barrière. Par exemple, dans les microscopes à effet tunnel, une pointe constituée de quelques atomes se déplace au-dessus de la surface d'un matériau conducteur. Lorsque la pointe est proche de la surface, mais qu'elle ne la touche pas, des électrons « sautent » du matériau vers la pointe, avec une probabilité qui dépend de la distance entre la pointe et la surface. Le signal est d'autant plus intense que la pointe est proche de la surface. Avec un tel microscope, on peut « voir » la rugosité du matériau.

L'effet tunnel utilisé ici ne concerne pas les électrons, mais les protons des groupes méthyle, composés d'un atome de carbone et de trois atomes d'hydrogène, (CH_3), ou encore de groupes ammoniac (NH_3). Les trois atomes d'hydrogène (protons) sont placés aux trois sommets d'un triangle, et, à cause de l'agitation thermique, ils changent de position : ils occupent à tour de rôle l'un des trois sommets. Tout se passe comme si le groupe tournait comme un tourniquet (voir la figure 3).

Pour passer d'une position à une autre, les protons doivent franchir une barrière d'énergie. Cette barrière

d'énergie rotationnelle dépend de l'environnement atomique du groupe méthyle. Plus les interactions sont fortes, plus cette barrière est élevée, et plus le tourniquet ralentit, un peu comme s'il y avait un frottement important. À température ambiante, les protons franchissent sans difficulté la barrière d'énergie.

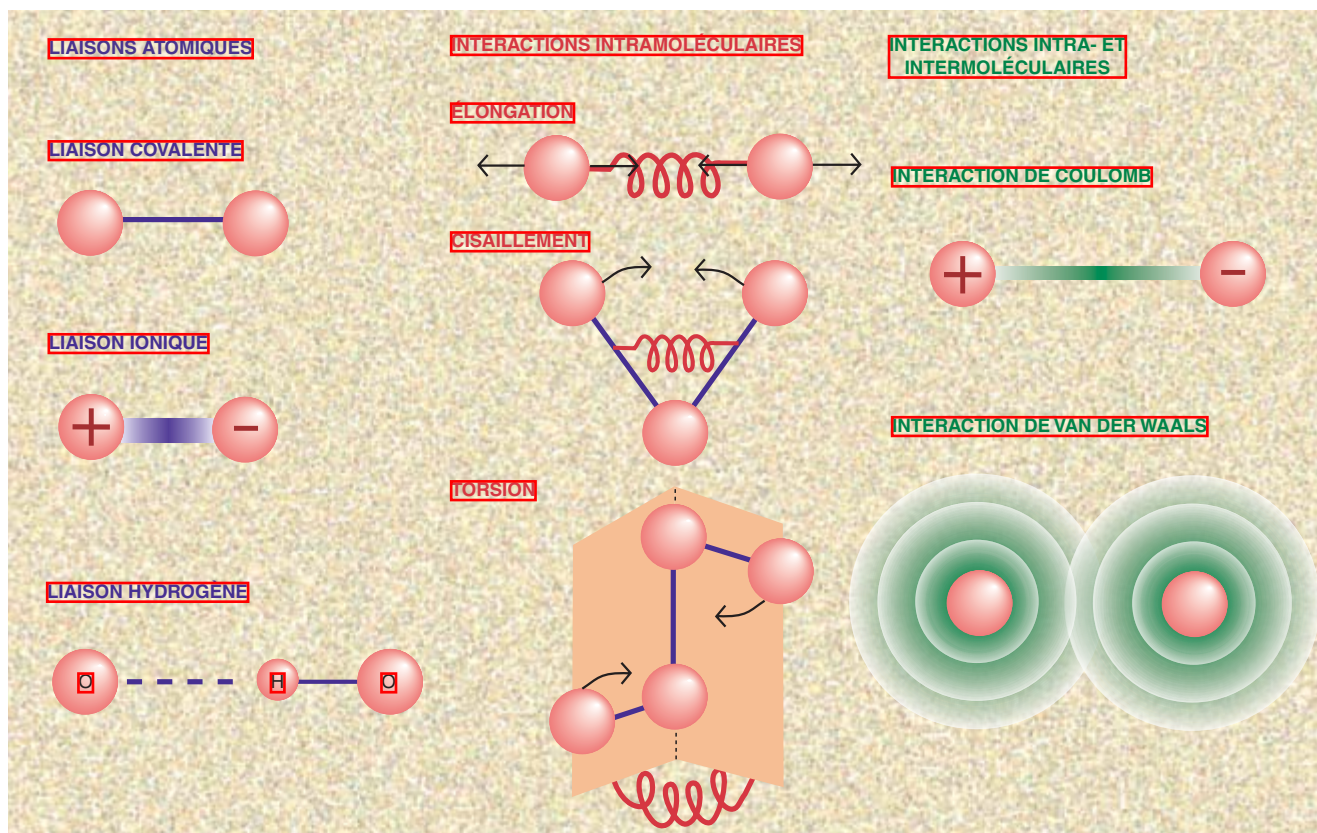
Et pourtant, il tourne!

En revanche, quand la température décroît, la vitesse de rotation du groupe méthyle diminue. Au zéro absolu, tous les atomes sont figés. Pourtant, le groupe méthyle tourne toujours! Les protons traversent la barrière d'énergie par effet tunnel, au lieu de l'escalader.

Dans ce système quantique, les protons ne se comportent plus comme des particules classiques, mais comme des ondes : ils sont indiscernables. Au lieu d'occuper une position fixe, le proton « s'étale » – on dit qu'il est délocalisé. Il peut se trouver n'importe où, avec une probabilité de présence variable. La probabilité de présence dépend de

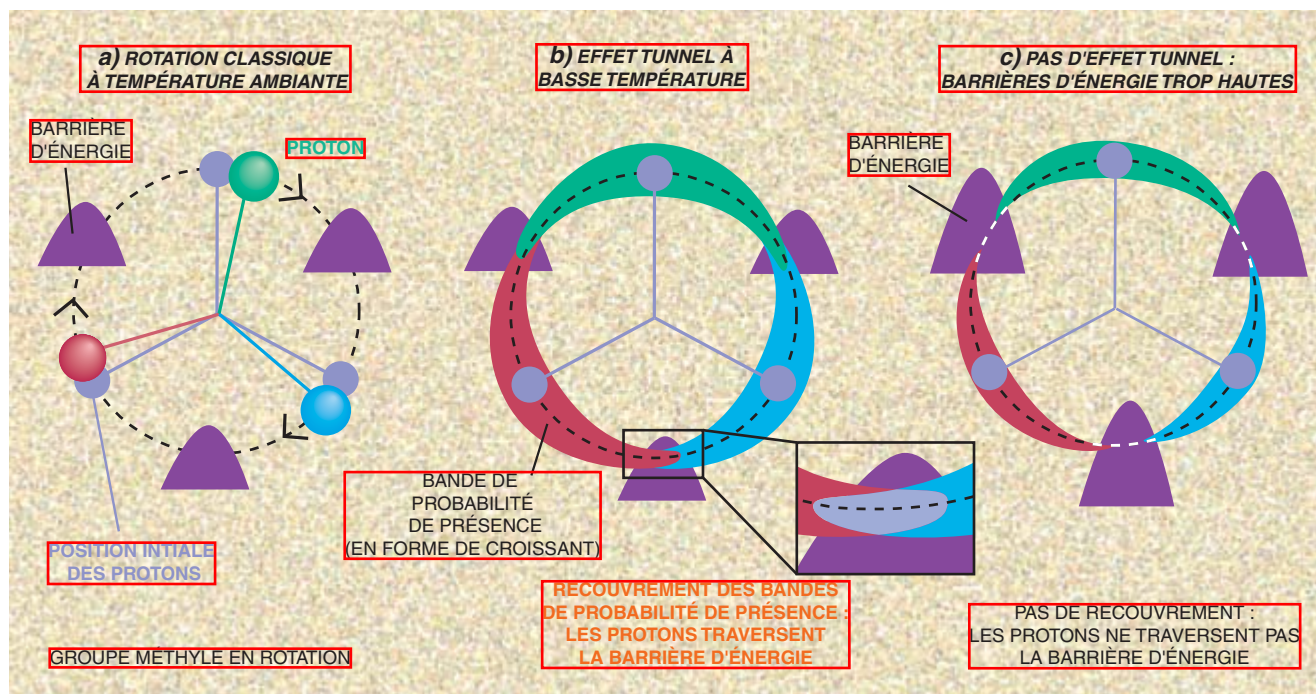
la hauteur des barrières : quand elle est faible, le proton peut se mouvoir facilement. Les bandes de probabilité de présence des protons, en forme de croissant, s'étendent, se recouvrent et forment un anneau presque continu. Dans ce cas, un proton peut passer d'un croissant de probabilité de présence à une autre par effet tunnel au point de recouvrement. Le tourniquet méthyle devient un rotateur quantique. En revanche, quand les barrières sont élevées, les bandes de densité ne se recouvrent guère, et l'effet tunnel disparaît.

Dans l'effet tunnel, le proton passe d'autant plus facilement d'une bande à une autre que le recouvrement est important. La vitesse de rotation du groupe méthyle, directement proportionnelle à la fréquence de l'effet tunnel, est alors élevée. La fréquence de l'effet tunnel diminue exponentiellement lorsque la hauteur de la barrière traversée augmente. Ainsi, les groupes méthyle omniprésents dans les molécules biologiques, constituent des sondes des interactions faibles : ces sondes reflètent la « rugosité » de leur environnement atomique. Elles



2. LES LIAISONS ENTRE LES ATOMES ont une énergie élevée et maintiennent l'ossature de la protéine. La protéine est soumise à des fluctuations et son ossature bouge, ce qui engendre des interactions supplémentaires entre les atomes de la molécule, dues à des mouvements d'élongation, de cisaillement et de torsion.

Enfin, d'autres interactions interviennent entre les atomes d'une molécule ou de molécules différentes (celles du solvant, par exemple) : ce sont des interactions de Coulomb et de Van der Waals. Les interactions faibles, de type torsion, Coulomb et Van der Waals, déterminent le repliement des protéines.



3. L'EFFET TUNNEL s'applique aux trois protons du groupe méthyle. À température ambiante (a), ils n'occupent pas une position fixe, mais changent de place, comme dans le jeu des chaises musicales. Ils escaladent les barrières d'énergie qui séparent les positions des protons grâce à l'agitation thermique. Tout se passe comme si le groupe méthyle tournait. Au zéro absolu en revanche (b), tous les atomes sont figés. Pourtant, le groupe méthyle tourne toujours. Les protons franchissent la barrière d'énergie par effet tunnel. Le groupe méthyle est un rotateur quantique. En effet, les protons occupent une bande de probabilité de présence en forme de croissant.

Si les barrières ne sont pas trop élevées, alors les croissants se recouvrent, et les protons passent d'une bande à une autre : c'est l'effet tunnel. Si les barrières sont élevées (c), alors les croissants ne se recouvrent pas, et l'effet tunnel disparaît. Les barrières d'énergie sont d'autant plus élevées que les interactions faibles entre les atomes autour du groupe méthyle sont importantes. C'est pourquoi l'effet tunnel est une sonde de l'environnement du groupe méthyle. Il reflète l'intensité des interactions faibles. Plus l'effet tunnel a une fréquence élevée (c'est-à-dire plus le rotateur quantique tourne vite), plus les interactions sont faibles.

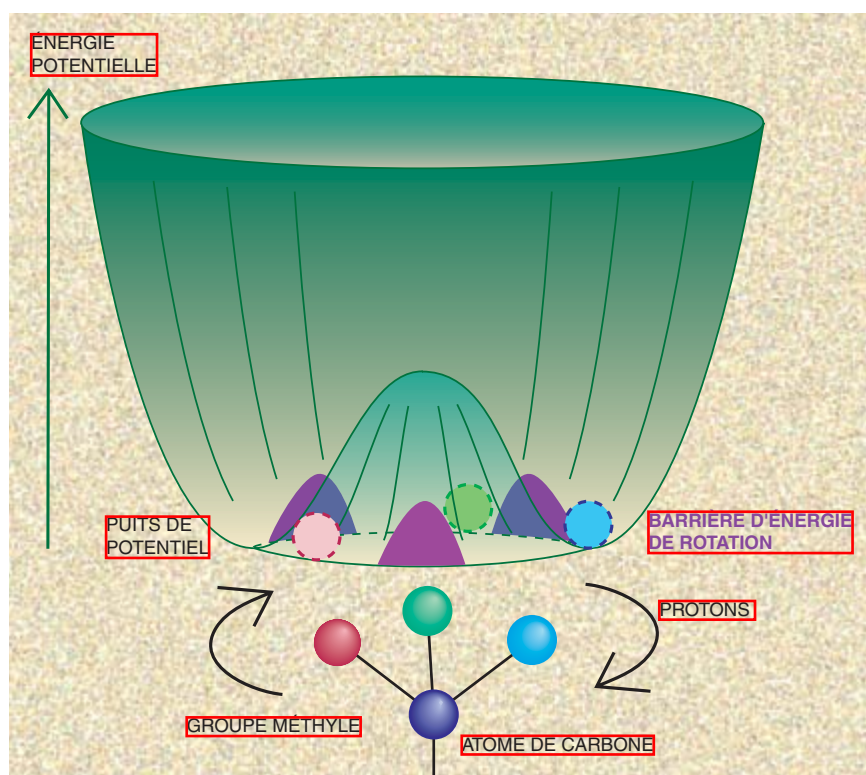
renseignent sur la hauteur de la barrière d'énergie rotationnelle, qui fournit des indications sur les interactions faibles subies par le groupe méthyle.

L'énergie de l'effet tunnel se détermine expérimentalement, par diffusion de neutrons (spectrométrie neutronique). Les neutrons ont une charge nulle et n'interagissent guère avec les électrons (comme le font les rayons X), mais avec les noyaux des atomes.

Effet tunnel dans l'aspirine

Nous avons choisi des molécules simples, telle l'aspirine (21 atomes). Elle est à l'état cristallin à la température de l'hélium liquide. Les neutrons traversent l'échantillon de cristaux d'aspirine et ils échangent de l'énergie avec les atomes (la diffusion est inélastique). Une partie de l'énergie est captée par les protons du groupe méthyle : c'est l'énergie consommée par l'effet tunnel que subit le rotateur quantique.

Nous avons mesuré l'énergie de l'effet tunnel dans l'aspirine (elle vaut 1,22 milliélectronvolt), ainsi que dans l'acide acétique, le paracétamol, l'acétanilide, etc. Les énergies valent



4. CARTE EN RELIEF : l'énergie potentielle a une surface en relief, et les atomes occupent les positions où l'énergie est la plus faible (les vallées de la carte). Ici, la surface de l'énergie du groupe méthyle ressemble à un chapeau mexicain, avec trois barrières d'énergie au fond de la vallée de rotation des trois protons.

0,6 milliélectronvolt dans les molécules qui ont des barrières d'énergie rotationnelle faibles (inférieures à 10 milliélectronvolts). Pour les molécules dont les barrières sont plus élevées, de l'ordre de 70 milliélectronvolts (les interactions y sont plus fortes), la fréquence de l'effet tunnel est très faible, et son énergie ne vaut plus que 0,0003 milliélectronvolt.

Carte en relief

Après avoir déterminé l'énergie de l'effet tunnel dans un cristal d'aspirine, nous l'évaluons à partir d'une simulation de l'aspirine. Imaginons ce modèle comme une carte en relief composée de vallées et de collines, qui représenterait l'énergie potentielle globale de la molécule (proportionnelle aux interactions entre les atomes). Les points situés le plus bas dans les vallées correspondent aux positions atomiques stables : l'état d'équilibre du cristal. La hauteur et la pente des collines correspondent à l'énergie thermique nécessaire aux atomes pour qu'ils escaladent les flancs, passent

éventuellement des cols et se retrouvent dans d'autres vallées.

Pour établir cette carte-modèle, nous déterminons d'abord les positions des atomes de l'aspirine, par diffraction de neutrons (cristallographie neutronique). Dans ce cas, la diffusion des neutrons est élastique, c'est-à-dire que les neutrons traversent la cible (l'échantillon cristallin) sans modification de leur longueur d'onde (sans échanger d'énergie avec les atomes).

Les rayons sont diffractés par les atomes selon la loi de Bragg, et l'on détermine ainsi les positions des atomes de l'aspirine (voir la figure 5). On les reporte sur la carte en relief en considérant que ces positions représentent le fond des vallées, que les atomes y sont immobiles et que l'énergie potentielle de la molécule est minimale pour ces positions.

Nous établissons ensuite les pentes et les hauteurs des collines (les barrières d'énergie) sur la carte de l'aspirine, à partir des interactions entre les atomes, décrites par le champ de forces. En pratique, nous considérons les interactions comme des ressorts plus ou moins rigides, décrits par un ou deux para-

mètres. Les charges, ou les charges partielles, attribuées aux atomes, sont aussi des paramètres ajustables.

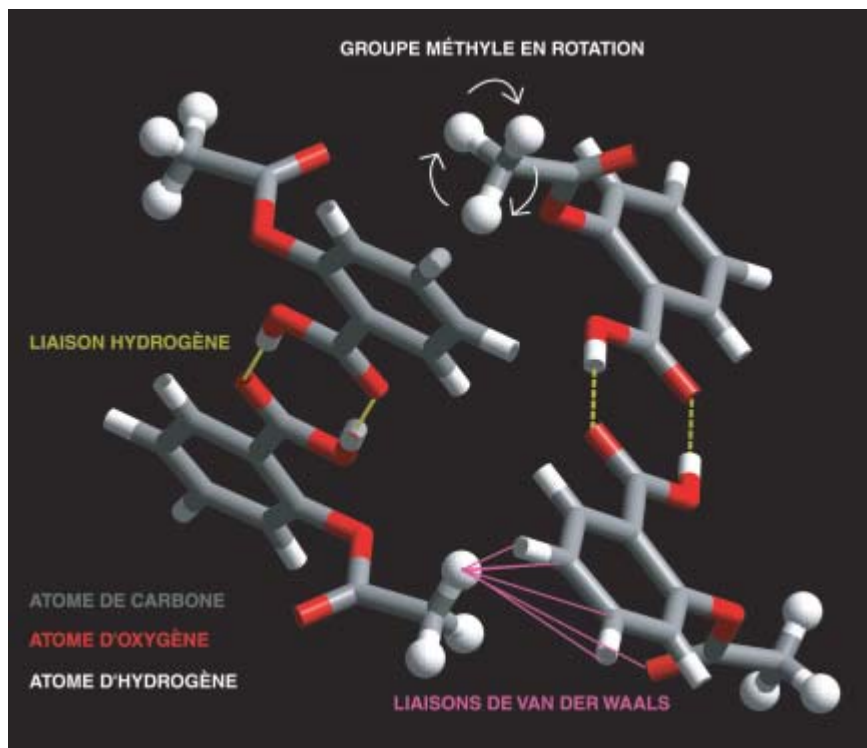
Une fois toutes les interactions paramétrées, nous calculons l'énergie potentielle de l'aspirine. Puis nous tournons virtuellement le groupe méthyle d'une molécule d'aspirine simulée sur ordinateur dans son milieu cristallin, et l'on obtient l'énergie du cristal à mesure que la rotation s'effectue. La variation d'énergie est celle de la barrière d'énergie rotationnelle. Nous en déduisons la fréquence de l'effet tunnel. Cette fréquence de l'effet tunnel calculée est environ 10 fois inférieure à la fréquence de l'effet tunnel déterminée expérimentalement par la diffusion neutronique. En d'autres termes, le tourniquet simulé tourne plus lentement que le tourniquet réel. Ce désaccord dépend du champ de forces utilisé, mais il survient à chaque fois, pour la trentaine de molécules que nous avons étudiées.

Cette absence de cohérence entre l'observation et le calcul révèle des erreurs de paramétrage dans les interactions faibles simulées : la barrière d'énergie rotationnelle et, par conséquent, les interactions faibles dans notre modèle de l'aspirine ont été surestimées, ainsi que dans les modèles des autres molécules que nous avons étudiées.

Qu'est-ce qui ne tourne pas rond?

Les mesures des positions atomiques et de l'effet tunnel sont très fiables, les erreurs proviennent donc du calcul de l'énergie potentielle du rotateur quantique et de l'évaluation des interactions faibles dans le modèle. Le mouvement de rotation des protons du groupe méthyle est influencé par les trois interactions faibles de type torsion, Van der Waals et Coulomb. La méthode du champ de forces introduit des erreurs dans le calcul de ces trois contributions : l'interaction de torsion est représentée par une seule constante de force, tandis qu'elle devrait l'être par plusieurs paramètres.

L'interaction de Van der Waals décrit de façon trop schématique les forces de répulsion ou d'attraction entre les atomes, sans tenir compte de l'imbrication des nuages d'électrons entre les différents atomes. Enfin, les réactions de Coulomb caractérisent les forces électrostatiques, lesquelles dépendent des charges attribuées aux atomes, qui ne sont pas



5. L'ASPIRINE est cristallisée à la température de l'hélium liquide, et le motif de répétition (la maille) du cristal contient quatre molécules. La position des atomes a été déterminée par diffraction de neutrons. Sur ce modèle, on a représenté quelques-unes des interactions entre les atomes prises en compte dans la simulation : quatre liaisons hydrogène intermoléculaires (en jaune) et des interactions de Van der Waals (en rose). L'énergie du cristal est calculée, puis un des groupes méthyle est mis virtuellement en rotation ; on calcule la nouvelle énergie du cristal, notamment l'énergie de l'effet tunnel. En comparant l'énergie de l'effet tunnel calculée et celle que l'on a déterminée expérimentalement, on vérifie que les valeurs de l'énergie des interactions faibles sont correctes.

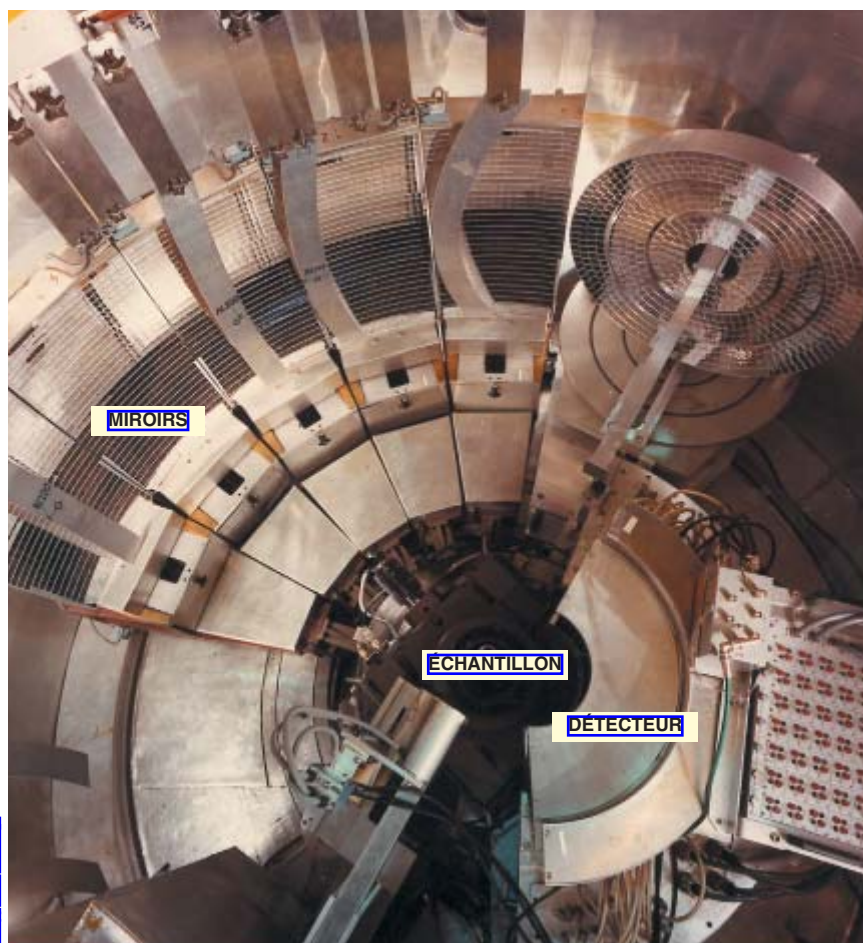
connues avec exactitude. De surcroît, les forces de Coulomb agissent à longue distance (plus de un nanomètre), donc les erreurs sur l'évaluation des charges s'accumulent. La méthode de calcul par un champ de forces dépend de trop de paramètres approximatifs, et les sondes à effet tunnel en ont révélé les limites.

Accord avec l'expérience

Nous avons cherché une autre méthode pour évaluer les interactions entre les atomes de l'aspirine, et pour établir une carte énergétique plus correcte. Au lieu de considérer les interactions intramoléculaires comme des ressorts plus ou moins rigides, nous avons tenu compte des nuages d'électrons entre les atomes, et nous avons fondé une partie de nos calculs sur les équations de la mécanique quantique. Nous avons ainsi dessiné les nouvelles vallées et les nouvelles collines sur la carte en relief. Après avoir fait tourner virtuellement le groupe méthyle dans ce nouveau paysage, nous avons comparé la valeur de l'effet tunnel calculée avec celle mesurée, pour l'ensemble des molécules étudiées. La concordance entre les résultats de l'expérience et ceux du calcul était ainsi améliorée.

Enfin, nous avons utilisé une dernière méthode, dite de la fonctionnelle de densité, élaborée dans les années 1960 par Walter Kohn et John Pople, qui ont reçu le prix Nobel de chimie en 1998, pour dresser la carte du relief énergétique de l'aspirine, ainsi que de 15 autres cristaux. Pour ce faire, on subdivise le cristal en petits volumes nommés mailles et l'on calcule la densité électronique par maille, et non par molécule. L'écart entre l'énergie de l'effet tunnel ainsi calculée et l'énergie déterminée expérimentalement est inférieur à cinq pour cent pour l'aspirine, ainsi que pour les 15 autres molécules que nous avons étudiées avec cette méthode et qui ont un groupe méthyle.

Grâce à l'effet tunnel des protons dans les groupes méthyle, nous avons validé les expressions des interactions faibles. Nous disposons ainsi de descriptions précises de ces interactions dans 15 molécules organiques simples, qu'un champ de forces bien affiné pourrait reproduire. Ces descriptions des interactions constituent des références fiables pour l'étude des protéines. Les



6. LA MESURE DE L'EFFET TUNNEL est fondée sur la diffusion des neutrons (ici, un spectromètre de rétrodiffusion à l'Institut Laue Langevin). L'échantillon, placé au centre de l'enceinte d'environ trois mètres de diamètre, est entouré de miroirs où se réfléchissent les neutrons avant d'être captés par le détecteur.

biologistes vont bientôt les extrapoler à des molécules plus complexes et valider ou améliorer le champ de forces utilisé dans leurs simulations. Ces expressions des interactions faibles sont en effet indispensables aux simulations des protéines, car les méthodes calculatoires qui déterminent explicitement la distribution électronique sont

trop lentes pour être appliquées à la simulation des grandes biomolécules, et les biologistes doivent donc – à ce jour – se contenter de la méthode classique du champ de forces. La simulation des structures des protéines et de leur dynamique pourrait ainsi gagner en précision, améliorant la compréhension du repliement des protéines.

Mark JOHNSON dirige le service de calcul scientifique de l'Institut Laue Langevin, à Grenoble. Gordon KEARLEY, professeur de physique des neutrons, est responsable des instruments à la source IRI (Interfaculty Reactor Institute) de Delft ; il a travaillé 20 ans à l'Institut Laue Langevin.

M. JOHNSON, M. PRAGER, H. GRIMM, M. NEUMANN, G. KEARLEY et C. WILSON, *Methyl group dynamics in paracetamol and acetanilide : probing the static properties of intermolecular hydrogen bonds formed by peptide groups*, in *Chem. Phys.*, 244, pp. 49-66, 1999.

M. JOHNSON, M. NEUMANN, B. NICOLAI, P. SMITH et G. KEARLEY, *The origin and temperature dependence of the single particle, methyl group rotational potential in acetic acid* in *Chem. Phys.*, 215, 343, 1997.

M. NEUMANN et M. JOHNSON, *Methyl group tunnelling-A quantitative probe of atom-atom potentials* in *J. Chem. Phys.*, 107, 1725, 1997.

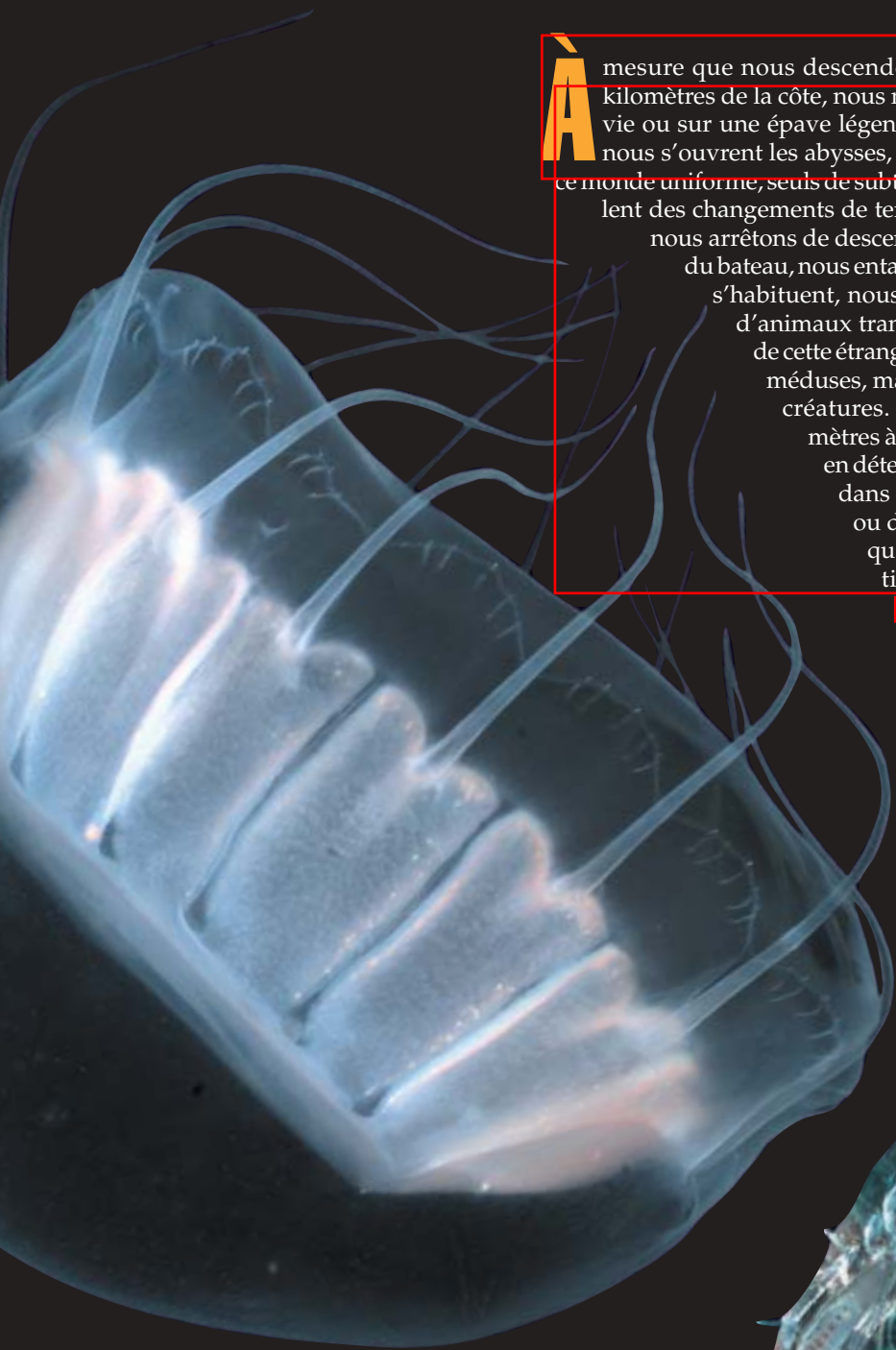
M. JOHNSON et G. KEARLEY, *Quantitative atom-atom potentials from rotational tunnelling ; their extraction and their use*, in *Annual Review of Physical Chemistry*, 51, pp. 297-321, 2000.

Les animaux transparents



SÖNKE JOHNSEN

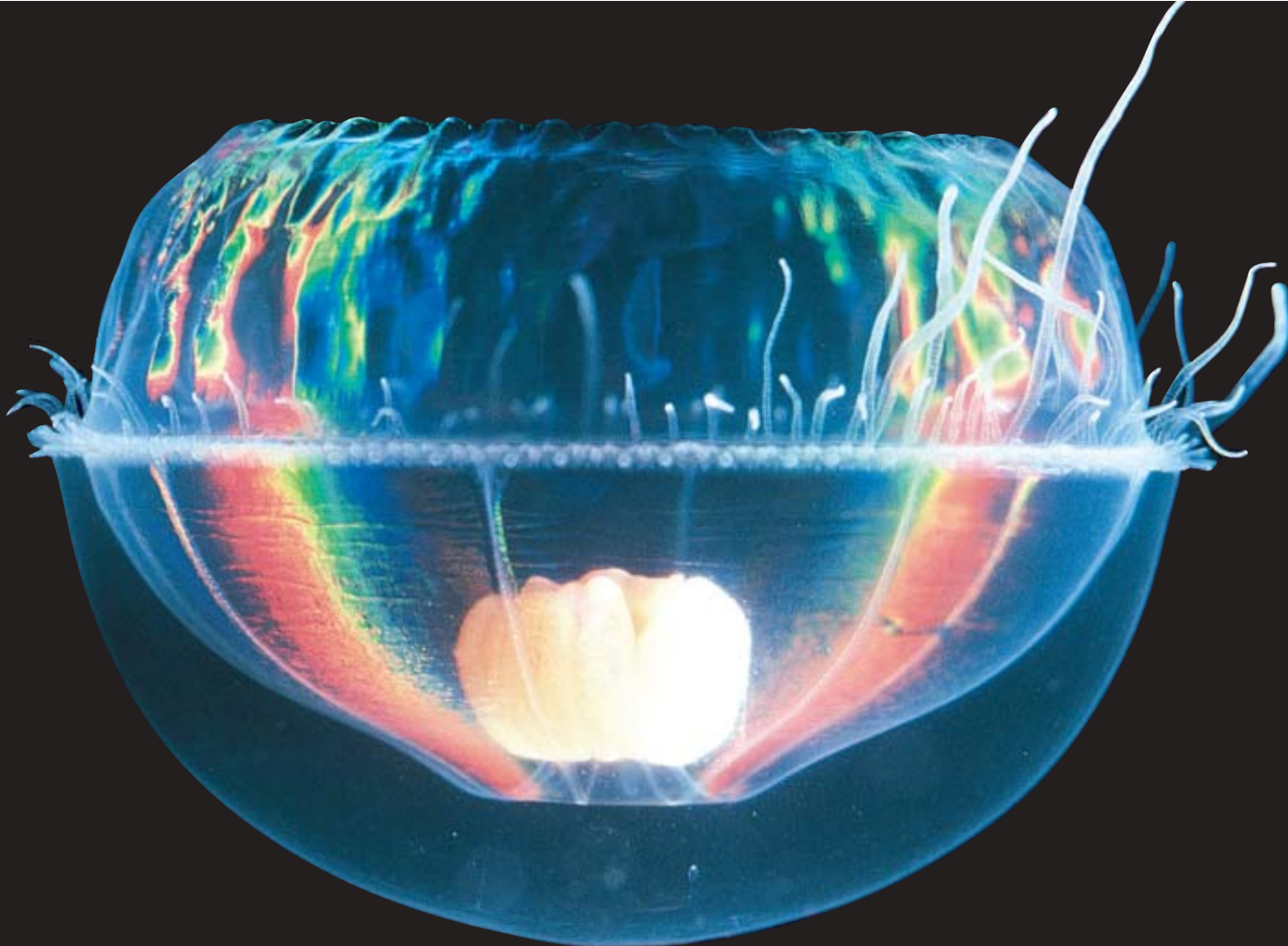
Grâce à d'ingénieuses adaptations physiologiques, de nombreux animaux marins sont devenus transparents.



A mesure que nous descendons, l'eau s'assombrit. À des centaines de kilomètres de la côte, nous ne plongeons pas sur un récif fourmillant de vie ou sur une épave légendaire, mais simplement en haute mer. Sous nous s'ouvrent les abysses, à plus de 3 000 mètres de profondeur. Dans ce monde uniforme, seuls de subtils dégradés de couleurs et de lumières signalent des changements de temps ou de lieu. À 18 mètres de profondeur, nous arrêtons de descendre. Reliés à une ligne de sécurité qui pend du bateau, nous entamons nos recherches. À mesure que nos yeux s'habituent, nous découvrons, autour de nous, des dizaines d'animaux transparents aux mouvements lents. Au milieu de cette étrange ménagerie de cristal, on distingue quelques méduses, mais nous ne reconnaissons pas la plupart des créatures. Ces animaux mesurent de quelques centimètres à une trentaine de centimètres. Alors que l'on en détecte certains grâce à la nourriture qui se trouve dans leur estomac, ou par des taches de couleur, ou des éclats irisés, d'autres sont si transparents qu'ils restent invisibles, même à quelques centimètres de nous. Nous sortons des bocaux de nos sacs et commençons la récolte.



L'estomac de la méduse *Punctata* (à gauche), une espèce du genre *Nausithoe*, est la zone à quatre sommets. On voit les huit gonades rouges de l'animal. *Phronima* (ci-dessus) aurait inspiré le monstre du film *Alien*. Il s'agit en fait d'une créature inoffensive, longue de deux à trois centimètres. On capture très rarement l'hydroméduse *Cunina* (au centre).



LAURENCE T. VIER / M. VIER / ARCTAPODEMA / T. RICHARD / PTEROSOMA / M. VIER / CYSTOSOMA

La ménagerie de verre

L'hydroméduse du genre *Arctapodema* (en haut, à gauche) se pare de couleurs irisées quand la lumière du flash du photographe se reflète sur les fines striations musculaires de l'animal. La rétine allongée du gastéropode transparent *Pterosoma* (en bas, au centre) capte les images ligne par ligne, comme une caméra de télévision. L'amphipode (en haut, à droite), connu sous le nom de *Cystosoma*, ressemble à un cafard en cristal de cinq centimètres de longueur. Sa carapace contient surtout de l'eau et un minuscule intestin en forme d'aiguille (invisible sur ce cliché). Rarement capturée, la pieuvre transparente *Vitreledonella richardi* (à gauche) est mal connue. Plus encore, l'animal (en bas à droite) n'a pas de nom, car il n'a été découvert que très récemment.



Une vie de gélatine

La plupart de ces animaux sont en grande partie constitués d'un matériau gélatineux qui leur confère de nombreux avantages. Puisque cette substance contient surtout de l'eau incompressible, les animaux ne sont pas écrasés par la pression due à la profondeur. Cette substance a la bonne densité pour leur permettre de flotter au-dessus des abysses. De plus, elle est inerte et facile à synthétiser ; les animaux qui en contiennent peuvent vivre même quand la nourriture est peu abondante. Lorsque les ressources abondent, les animaux se développent et se reproduisent à une vitesse considérable. En une semaine, certains constituent des colonies qui regroupent des milliards d'individus et couvrent des milliers de kilomètres carrés.

L'avantage probablement le plus important de cette substance gélatineuse, et la cause de son succès évolutif dans l'univers sous-marin, c'est la transparence qu'elle confère. Presque tous les animaux de haute mer, qui ne sont pas protégés par des dents, des

toxines, une vitesse élevée ou une petite taille, sont plus ou moins invisibles. En fait, la transparence ne devient rare qu'aux profondeurs où la lumière ne pénètre jamais : l'invisibilité ne conférerait plus aucun avantage.

Malheureusement, les animaux gélatineux sont lents et fragiles. Leur survie n'est liée qu'à leur caractère invisible, la forme suprême de camouflage ; c'est ainsi qu'ils échappent à leurs prédateurs et qu'ils capturent leurs propres proies.

Quel degré de transparence ces animaux peuvent-ils atteindre ? Quelles caractéristiques physiologiques leur confèrent leur transparence ? Quand on étudie la transparence, la première difficulté à laquelle on est confronté est la capture d'animaux en bon état. Vivants et en bonne santé, ils sont transparents, mais deviennent très rapidement opaques après leur mort. Comme ce sont des animaux fragiles, les turbulences de l'eau provoquées, par exemple, par le battement de la queue d'un poisson risquent de les déchirer. C'est pourquoi on doit les capturer dans leur habitat, en plongeant à grande profondeur ou avec un submersible.

Nous avons ainsi collecté une grande variété d'animaux transparents, pour la plupart en excellent état. Ensuite, dans un laboratoire de recherche, à bord du navire, nous avons mesuré leur transparence dans le spectre visible avec un spectromètre fonctionnant comme ceux que les ophtalmologistes utilisent pour mesurer la transparence du cristallin de l'œil humain.

Nous avons constaté que la transparence des animaux change : la quantité de lumière qui traverse les organismes étudiés varie de 20 à 90 pour cent ; les animaux les plus gros ont les tissus les plus transparents ; la transparence ne change pas avec la profondeur, les animaux capturés à 750 mètres de profondeur étant aussi transparents que les organismes prélevés près de la surface.

Pourquoi les animaux proches de la surface, où le milieu est mieux éclairé et où, par conséquent, il est plus difficile de se cacher, ne sont-ils pas plus transparents ? Inversement, pourquoi certains animaux des profondeurs sont-ils si transparents, alors que leurs prédateurs ne peuvent voir à plus de quelques centimètres ?

Pour comprendre une telle transparence, soulignons que la visibilité d'un objet dépend de son contraste,

c'est-à-dire de sa luminosité par rapport au milieu qui l'entoure. L'eau qui sépare un animal marin de son prédateur diffuse et absorbe la lumière réfléchie par l'animal. Ainsi, plus l'animal est éloigné, moins les contrastes sont marqués et plus il est difficile à distinguer. À une certaine distance qui dépend du contraste propre de l'animal et de l'absorption de la lumière par l'eau, le contraste diminue à tel point que le prédateur ne voit plus sa proie (dès lors en sécurité).

Transparence et structure

Contrairement aux autres formes de camouflage, la transparence concerne tout l'organisme, pas seulement sa surface externe ; l'évolution a trouvé plusieurs façons ingénieuses de tourner les difficultés que pose la transparence de tous les organes.

On peut en observer quelques-unes à l'œil nu. Parmi les animaux transparents, certains sont aplatis et minces : ils ont plus de chances de laisser passer davantage de lumière (si un organisme de un centimètre d'épaisseur laisse passer un neuvième d'un faisceau lumineux, un organisme de un demi-centimètre en laisse passer trois fois plus). De surcroît, plus un animal est mince, moins il est repérable quand il est vu de profil. Des animaux comme les leptocéphales, les larves d'anguilles, utilisent cette astuce à l'extrême et ressemblent à des lamelles mesurant seulement un ou deux millimètres d'épaisseur pour 10 centimètres de longueur. Certains cténaïres, dont le nom de « ceinture de Vénus » est évocateur, sont aussi longs et plats qu'une ceinture. Les jeunes langoustes sont aussi minces qu'une feuille de papier. Le seul moyen de détecter leur présence est d'apercevoir leur ombre furtive.

Les autres transformations évidentes concernent des parties qui, pour des raisons physiques, ne peuvent être rendues transparentes. Ainsi, dans la mesure où la rétine doit absorber la lumière pour fonctionner, une partie de l'œil au moins reste toujours visible. Trois solutions à ce problème sont apparues. Certains organismes portent leurs yeux à l'extrémité de longs pédoncules, afin de les éloigner le plus possible de leur corps. D'autres, à l'instar du crustacé *Phronima*, ont des rétines compactes et utilisent des sortes de fibres optiques où se propage la lumière. D'autres encore, comme le grand crustacé *Cystisoma*, possèdent des

Les siphonophores : des colonies prédatrices

Certains animaux transparents utilisent leur invisibilité à d'autres fins que le camouflage passif. Les siphonophores, des individus réunis en colonies, sont d'étranges cousins des méduses. La Physalie est le plus connu d'entre eux. La plupart des siphonophores sont transparents, mais certains ont des cellules urticantes regroupées en boutons clairs qui évoquent de jeunes poissons, de petites crevettes et d'autres proies attrayantes. Les animaux les poursuivent, mais, ne voyant pas l'animal transparent beaucoup plus gros auquel ils sont fixés, sont rapidement capturés. Les siphonophores de la famille des *Prayidae* sont ici (a) sous leur forme compacte qui mesure entre 10 et 12 centimètres seulement de longueur. Lorsqu'elle chasse, cette colonie s'étire jusqu'à atteindre un mètre de longueur ; ses cellules urticantes suspendues aux organes de flottaison se balancent comme un filet. Les siphonophores de la famille des *Forshalea* (b) chassent de la même façon.



Edith A. Widder



G. Richard Harrison



Nadia Shashai



La polarisation : l'arme secrète des prédateurs

Dans la course perpétuelle à l'armement engagée entre les proies et les prédateurs, ces derniers parviennent parfois à priver leurs proies de leur transparence. Dans l'océan, les molécules d'eau diffusent la lumière, produisant une lumière polarisée, dont les ondes oscillent en parallèle. L'homme ne discerne la lumière polarisée qu'au moyen de verres polarisants, mais de nombreux animaux, notamment les crustacés et les calmars, y sont naturellement sensibles. Cette aptitude les aide à chasser, car les tissus de certains des animaux transparents dont ils se nourrissent suppriment ou dévient la polarisation de la lumière qui les traverse. Détectant ces changements, les prédateurs devinent la présence de leurs proies. Un même copépode *Labidocera* est vu différemment selon que l'œil détecte les changements de polarisation (d) ou non (c).

On sait que les calmars utilisent leur aptitude à détecter la lumière polarisée pour trouver des proies transparentes et pour se transmettre des signaux. Au cours d'une expérience, on donne à des calmars le choix d'attaquer deux perles de verre. L'une des perles a un effet sur la polarisation de la lumière, l'autre non. On constate que les calmars préfèrent attaquer la perle qui modifie la polarisation de la lumière. Sous un éclairage polarisé (c'est l'état naturel de l'océan), les calmars détectent de plus loin les animaux qui agissent sur la polarisation.

yeux énormes dotés d'une rétine pâle et très mince située juste sous la cornée.

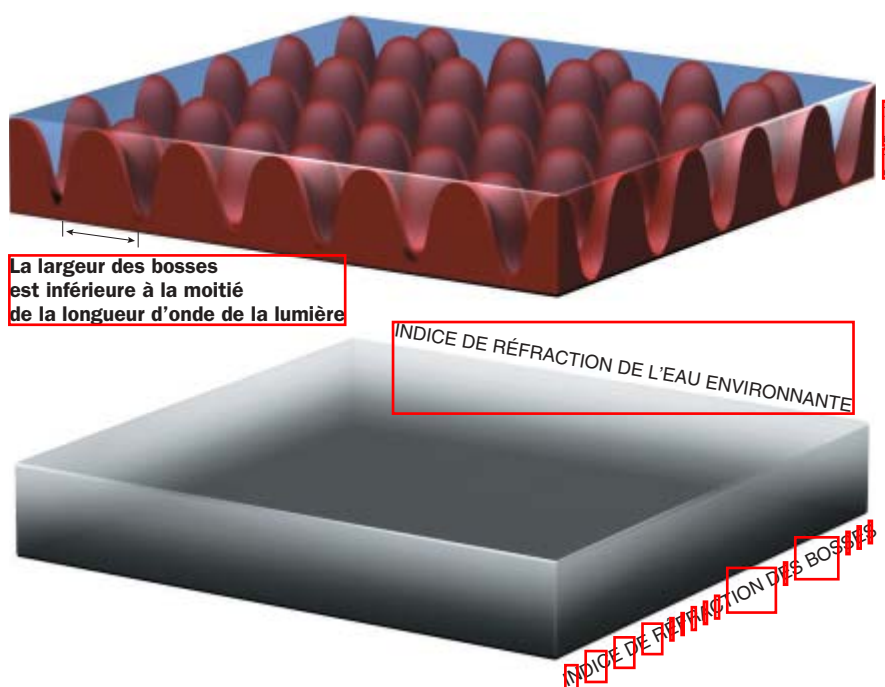
L'estomac est aussi un organe qui reste toujours visible. Non pas à cause de l'estomac lui-même, mais de son contenu (des animaux ou des végétaux en cours de digestion), qui est généralement opaque. Toutefois, chez certains animaux transparents, l'estomac est en forme d'aiguille et toujours dirigé vers le bas, quelle que soit l'orientation de l'animal. Cette méthode est efficace, car de nombreux prédateurs détectent leurs proies en cherchant les ombres qui se détachent sur la surface éclairée de l'eau (une aiguille verticale a une ombre minimale). Une autre stratégie consiste à tapisser l'extérieur de l'estomac d'un tissu réfléchissant. Comme un miroir, ce type de tissu est invisible en pleine mer, car il reflète la lumière environnante et se confond avec elle. C'est pour cette même raison que les poissons sont généralement couverts d'écailles argentées et miroitantes.

La peau est le troisième organe à poser des difficultés, car elle reflète toujours un peu de lumière. Certains animaux ont une forme simple qui minimise la surface corporelle et évite les reflets. Plus rarement, mais plus curieusement, certains animaux sont couverts de bosses microscopiques qui réduisent la réflexion de la lumière.

Cette stratégie dépend de l'indice de réfraction du matériau, qui indique à quelle vitesse la lumière le traverse. La lumière se propage plus lentement dans un matériau qui a un indice de réfraction élevé que lorsque l'indice est plus faible.

Quand une surface est couverte de bosses plus petites que la moitié de la longueur d'onde de la lumière reçue, la surface se comporte comme une substance uniforme dont l'indice de réfraction est une moyenne entre celui des bosses et celui du milieu environnant (l'eau, dans notre cas). Puisque les bosses sont plus larges à leur base qu'à leur sommet, l'indice de réfraction à la base est proche de celui du matériau (généralement supérieur à celui de l'eau), car ce matériau est sur un même plan, plus abondant que l'eau. En revanche, au sommet, où l'eau est majoritaire, l'indice est plus faible.

Ainsi, l'augmentation de l'indice de réfraction est progressive, de l'eau ambiante vers le corps de l'animal, ce qui réduit les phénomènes de réflexion. En réalité, ce système est si performant que les concepteurs de lentilles utili-



LES MINUSCULES BOSSES à la surface d'un animal transparent réduisent les reflets, ce qui améliore son camouflage. Les bosses dont la largeur est inférieure à la moitié de la longueur d'onde de la lumière qu'elles reçoivent ont un indice de réfraction intermédiaire entre celui des bosses et celui du milieu. Comme les bosses sont plus étroites au sommet, il y a davantage de matériau à la base. Ainsi, l'indice de réfraction passe progressivement de celui du matériau à celui du milieu environnant. Cette variation progressive interfère avec la capacité de la surface bosselée à refléter la lumière.

sent le même principe pour améliorer le revêtement des lentilles pour l'optique de précision. Il serait aussi employé pour réduire la réflexion des ondes radar par certains sous-marins.

Les conditions de l'invisibilité

La réduction des réflexions est une condition nécessaire, mais pas suffisante, pour qu'un animal soit invisible. La lumière doit aussi traverser le corps, ce qui nécessite que les faisceaux ne soient ni diffusés, ni absorbés sur leur parcours. Des deux phénomènes, la diffusion est le principal obstacle à la transparence animale, car très peu de molécules organiques absorbent la lumière.

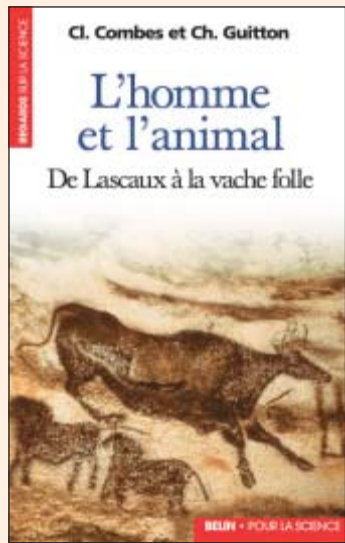
La diffusion est due à des variations de l'indice de réfraction. Quand la lumière passe d'un milieu à un autre, le changement d'indice de réfraction modifie la vitesse de la lumière. En outre, à moins que le faisceau lumineux ne pénètre perpendiculairement dans le deuxième milieu, la direction de propagation du faisceau change.

Les tissus animaux présentent en général de nombreuses variations de l'indice de réfraction, parce que les différents constituants nécessaires à la vie (les cellules, les fibres, les

noyaux, les nerfs, etc.) s'y côtoient. Même les animaux gélatineux, qui contiennent beaucoup d'eau, ont des indices de réfraction qui varient. La relation entre la variation de l'indice de réfraction et la diffusion de la lumière est particulièrement compliquée, et nous ignorons les détails de la répartition des indices de réfraction dans les tissus vivants.

Néanmoins, en utilisant des modèles simplifiés, et en supposant qu'un tissu requiert certains volumes de différents constituants pour vivre, j'ai examiné comment la taille, la forme et l'indice de réfraction de ces éléments agissent sur la quantité totale de lumière diffusée. Les fabricants de peintures pour le bâtiment utilisent des méthodes identiques pour améliorer la diffusion de la lumière et augmenter le pouvoir couvrant de leurs peintures.

Les facteurs les plus importants sont la répartition et la taille des constituants. Quand une cellule a besoin d'une certaine quantité de graisse pour survivre, mais qu'elle doit diffuser le moins de lumière possible, la meilleure stratégie est de diviser la graisse en un grand nombre de minuscules gouttelettes. La pire des stratégies serait de diviser la graisse en gouttes dont la



L'homme et l'animal

**Claude Combes,
Christophe Guitton**

«160 pages brillantes
d'érudition, de profondeur
et d'ouverture d'esprit.»

*Philippe Dorchies,
professeur de parasitologie,
La Dépêche vétérinaire*

...

«Une promenade plaisante,
claire et documentée, guidée
conjointement par un biologiste
et un vétérinaire.»

Eurêka

...

«Un livre riche et divertissant
alliant philosophie et sciences
grand public publié par deux
scientifiques de l'université
de Perpignan.»

Midi Libre

**Code 075012 • 95 F
160 pages**

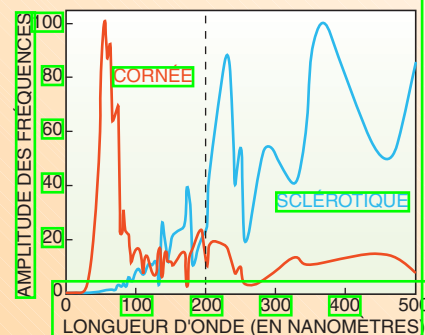
**Voir bon de commande
page 98**

BELIN • POUR LA SCIENCE

Pourquoi la cornée est-elle transparente ?

L'analyse de Fourier, qui détermine les fréquences prédominantes dans un ensemble d'ondes ou autres phénomènes périodiques, est utile pour étudier la transparence des animaux gélatineux, mais aussi de la cornée humaine. Comme le corps des animaux transparents, la cornée et le blanc de l'œil, nommé sclérotique, sont constitués de protéines fibreuses disposées périodiquement ou presque. Quand ces fibres sont régulièrement organisées et espacées d'une «longueur d'onde» inférieure à la moitié de la longueur d'onde la plus courte de la lumière visible, le tissu est quasi transparent. La lumière qui traverse directement le tissu se renforce, subissant des interférences constructives, tandis que la lumière diffusée par les côtés est éliminée par des interférences destructives.

Dans la cornée et dans la sclérotique, les fibres du tissu existent sous divers motifs répétitifs, qui ont tous des longueurs d'onde différentes. Sur le graphe, les longueurs d'onde sont indiquées en abscisse. En ordonnée, on a indiqué la prédominance des longueurs d'onde dans les deux tissus analysés. Dans la cornée, par exemple, les fibres qui se répètent avec une longueur d'onde d'environ 50 nanomètres sont les plus abondantes. Cette valeur est notablement inférieure à 200 nanomètres, approximativement la moitié de la longueur d'onde de la lumière violette, la plus courte que l'œil humain puisse observer. En revanche, les pics de la sclérotique sont supérieurs à 200 nanomètres, ce qui la rend opaque.



Yvonne Gracq

taille serait proche de la longueur d'onde de la lumière. L'indice de réfraction de la graisse est peu important, et la forme des gouttelettes encore moins. Ainsi, on connaît les caractéristiques importantes que l'on doit rechercher quand on observe des animaux transparents au microscope.

Toutefois, des variations d'indices de réfraction n'engendrent pas toujours une diffusion. Quand l'amplitude des variations des indices de réfraction est inférieure à la moitié de la longueur d'onde de la lumière incidente, la lumière diffusée par toutes les variations est éliminée par des interférences destructives. Lors d'une interférence destructive, les ondes lumineuses s'annulent les unes les autres.

Par exemple, le blanc de l'œil (la sclérotique) et la cornée sont tous deux constitués de couches denses de fibres de collagène. Toutefois, dans la cornée, les fibres sont plus petites et arrangées plus régulièrement, de sorte que les variations de l'indice de réfraction sont toutes inférieures à la moitié de la longueur d'onde de la lumière. Il y a une forte interférence destructive, et l'organe est transparent. Sans cette interférence, la cornée serait opaque. La cataracte se produit chez les personnes âgées, lorsque cet assemblage uniforme de

fibres est perturbé, ce qui diminue l'interférence destructive.

La transparence est un extraordinaire exemple d'adaptation à des situations difficiles. Par des transformations ingénieuses de leur organes et de leurs cellules, ces fragiles animaux ont trouvé un moyen de survivre dans un milieu dangereux. Comme c'est souvent le cas, les solutions apparues naturellement rivalisent avec des découvertes techniques récentes, par exemple les fibres optiques ou les revêtements antireflets. Ces animaux, si courants et pourtant très mystérieux, ont des choses étonnantes à nous apprendre.

Sönke JOHNSEN travaille à l'Institut Océanographique de Cap Cod.

A.C. HARDY, *The Open Sea, Its Natural History : The World of Plankton*, Houghton Mifflin Company, 1956.

K. MADIN et D. KOVACS, *Beneath Blue Waters : Meeting with Remarkable Deep-Sea Creatures*, Viking Press, 1996.

S. JOHNSEN et E.A. WIDDER, *The Physical Basis of Transparency in Biological Tissue : Ultrastructure and the Minimization of Light Scattering*, in *Journal of Theoretical Biology*, vol. 199, n° 2, pp. 181-198, juillet 1999.

El Niño et la rotation de la Terre

RODRIGO ABARCA DEL RIO • DANIEL GAMBIS • DAVID SALSTEIN • BORIS DEWITTE

El Niño est un phénomène climatique qui se déclenche tous les deux à sept ans. Il naît dans le Pacifique tropical, mais modifie la circulation atmosphérique à l'échelle planétaire et même la vitesse de rotation de la Terre, que l'on étudie pour essayer de le prévoir.

Les conquistadores furent les premiers à rapporter l'existence du phénomène El Niño, il y a quatre siècles, sous le nom de «El Año de abundancia» (l'année de l'abondance). On dit même qu'El Niño aurait facilité la victoire de l'Espagnol Francisco Pizarro sur l'empire des Incas, en 1532, rendant le désert péruvien plus hospitalier pour son armée. El Niño, qui signifie «l'enfant Jésus» en espagnol, est synonyme de richesses : c'est un courant chaud qui coule dans le Pacifique le long de la côte Sud-américaine au moment de Noël, apportant avec lui des poissons exotiques et des pluies torrentielles (l'évaporation des eaux de surface s'intensifie et l'air se charge d'une humidité qui se condense et retombe sous forme de précipitations sur le continent) : une végétation florissante envahit des zones habituellement désertiques.

Aujourd'hui, on sait qu'El Niño se déclenche tous les deux à sept ans dans l'océan Pacifique tropical et qu'il modifie la circulation atmosphérique à l'échelle mondiale. Ses répercussions se font sentir aussi bien en Afrique, où il apporte la sécheresse à l'Ouest et d'abondantes précipitations à l'Est, qu'en Asie, où il perturbe le cycle de la mousson : en Inde, les précipitations diminuent en été. Les récoltes s'en ressentent, causant

de grandes famines, telle celle de 1900 qui tua plus de 450 000 personnes. Les conséquences socio-économiques d'El Niño sont si importantes que sa prévision est l'un des principaux enjeux de la climatologie. Les approches classiques semblent pour l'instant impuissantes à résoudre ce problème, mais l'étude de l'influence du phénomène El Niño sur la vitesse de rotation de la Terre est prometteuse. En mesurant la «longueur du jour» (la période de rotation de la Terre, inversement proportionnelle à sa vitesse), on constate qu'elle est maximale lors des événements El Niño. En combinant ces données, qui relèvent de la géodésie, avec celles de la météorologie et de la climatologie, on comprendra peut-être mieux le système Terre-atmosphère-océan, ce qui permettra de prévoir les épisodes El Niño.

El Niño commence dans l'océan

Le phénomène El Niño prend naissance dans le Pacifique tropical et il modifie aussi la circulation atmosphérique, à cause des interactions existant entre l'océan et l'atmosphère : la température des eaux de surface détermine l'intensité de l'évaporation (et l'humidité de l'air ou encore sa densité), dont

dépend la pression atmosphérique locale. Quand des différences de pression suffisantes engendrent des vents qui repoussent les eaux de surface par friction, les eaux profondes plus froides remontent. La température des eaux de surface diminue, et ces variations ont à leur tour des répercussions sur l'atmosphère, les déplacements des masses d'air, d'eau... Après avoir longtemps considéré l'océan comme un élément passif, les climatologues ont pris conscience de ce «couplage océan-atmosphère» et du rôle déterminant qu'il joue dans l'évolution du climat. Il est plus marqué dans les régions tropicales où la température de l'océan, chauffé par le Soleil, dépasse 28,5°C en surface : l'évaporation intense donne naissance à des pressions plus élevées que la normale en altitude et à des vents puissants qui agissent à leur tour sur l'océan. L'océan Pacifique est le plus vaste des océans tropicaux et le plus impliqué dans l'évolution du climat. Il est le berceau d'El Niño, à l'origine des plus grandes variations naturelles du système climatique.

Quelle est la cause d'un événement El Niño ? Dans les conditions normales (voir la figure 1, en haut), la température de surface de l'océan Pacifique dépend de la position de la thermocline, c'est-

à-dire de la frontière qui sépare les eaux chaudes, en surface, des eaux plus froides, en profondeur. Plus la thermocline est profonde, plus les eaux en surface sont chaudes. Dans le Pacifique Est, elle se situe de 50 à 80 mètres de la surface environ, alors que, dans le Pacifique Ouest, elle atteint 150 à 200 mètres de profondeur. Les vents parallèles à la côte Sud-américaine, notamment le long du Pérou, repoussent les eaux chaudes de surface, ce qui fait remonter les eaux froides, donc la thermocline. En se rapprochant de l'équateur, ces vents obliquent vers l'Ouest sous l'effet de la force de Coriolis, liée à la rotation de la Terre. Ils deviennent alors des alizés, vents d'Est dominants sous les tropiques. Les alizés poussent les eaux de surface vers l'Indonésie, de sorte que la surface de l'océan Pacifique est en pente vers l'Est (le dénivelé qu'ils induisent est de 80 centimètres environ entre l'Indonésie et l'Amérique du Sud). En revanche, la thermocline s'enfonce à l'Ouest et remonte à l'Est.

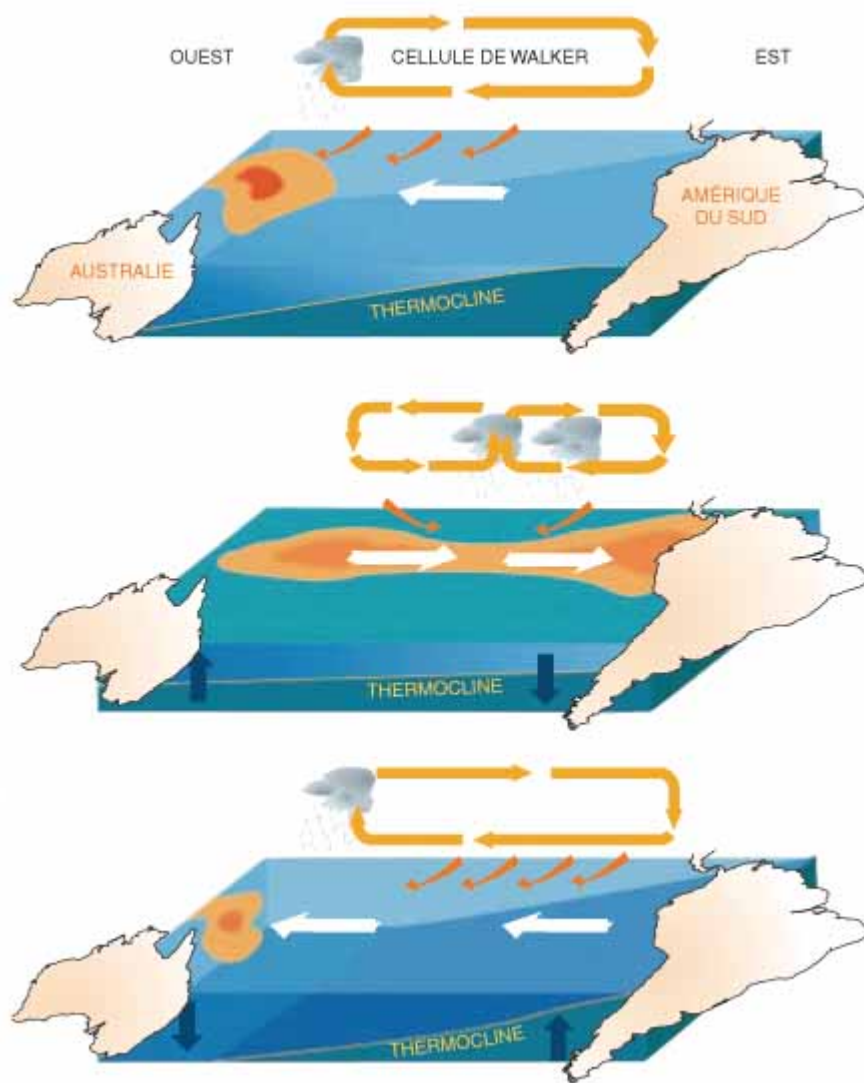
Un phénomène El Niño apparaît quand les alizés faiblissent et que la poussée qu'ils exercent sur la surface de l'océan n'est plus assez forte pour contrebalancer le poids des eaux accumulées à l'Ouest. Celles-ci se déversent vers l'Est, en une onde océanique dite de Kelvin, qui met environ deux mois à traverser l'océan Pacifique et à atteindre les côtes Sud-américaines. Ce reflux des eaux de surface vers l'Est entraîne l'abaissement de la thermocline à l'Est et sa remontée à l'Ouest, de sorte qu'elle se rapproche de l'horizontale (voir la figure 1, au milieu). Les eaux de surface, relativement froides à l'Est, se réchauffent, ce qui est caractéristique des événements El Niño.

Gilbert Walker, un météorologiste britannique envoyé en Inde en 1924 pour y étudier les moussons, fut le premier à remarquer cette modification de la circulation atmosphérique, qui s'étale sur plusieurs années. Il constata que lorsque la pression atmosphérique est supérieure à la normale dans le Pacifique tropical Ouest, elle diminue dans le Pacifique tropical central et que cette différence de pression est proportionnelle à l'intensité des phénomènes El Niño. Aujourd'hui, on utilise l'indice de l'oscillation australe (voir la figure 5), défini comme la différence de pression atmosphérique entre Tahiti, dans le Pacifique cen-

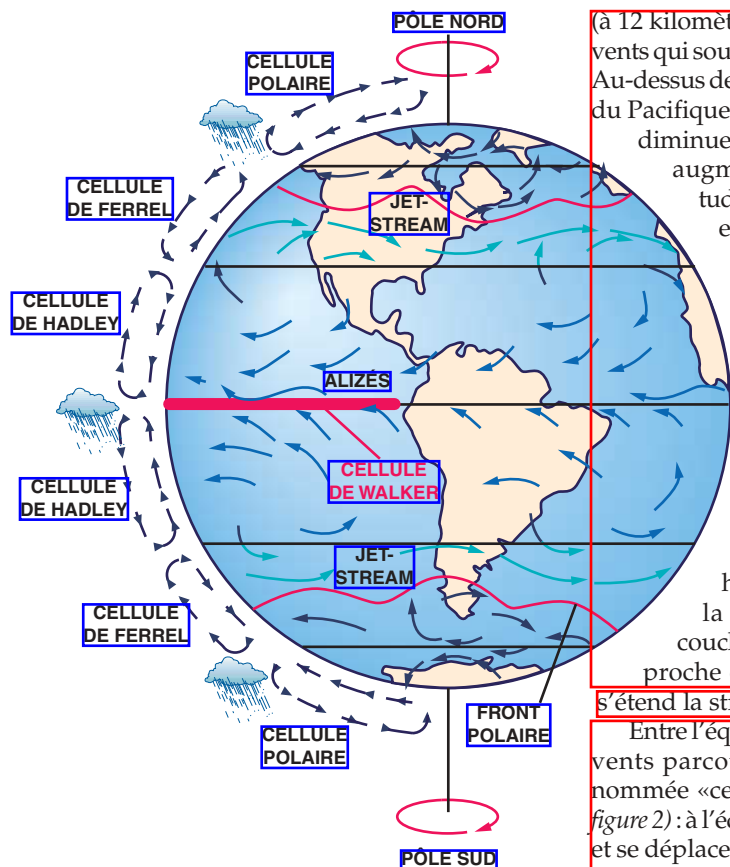
tral, et Darwin, en Australie. Les alizés soufflant des régions de fortes pressions vers les régions de basses pressions, cet indice mesure leur force. Ainsi une valeur négative de l'indice de l'oscillation australe correspond à une pression plus élevée que la normale dans le Pacifique Ouest, à un affaiblissement des alizés et à l'apparition d'un événement El Niño.

El Niño modifie la circulation atmosphérique

Comment un événement El Niño modifie-t-il la circulation atmosphérique ? Dans le Pacifique, les vents parcourent une boucle, nommée « cellule de Walker ». Elle est constituée en surface par les alizés (créés par la différence de pression entre l'Est et l'Ouest) et en altitude



1. DANS LE PACIFIQUE, les événements El Niño et La Niña modifient le système océan-atmosphère, agissant sur la thermocline (la frontière qui sépare les eaux chaudes, en surface, des eaux plus froides, en profondeur) et la cellule de Walker (la boucle formée par les alizés, qui circulent d'Est en Ouest à basse altitude, et les vents qui circulent en sens inverse à haute altitude). Dans les conditions normales (*en haut*), les alizés poussent les eaux chaudes de surface qui s'accumulent à l'Ouest, où les eaux froides s'enfoncent, abaissant la thermocline. Au-dessus des eaux chaudes de l'Ouest du Pacifique, l'air monte, diminue la pression en surface et augmente la pression en altitude, tandis qu'au-dessus des eaux froides de l'Est du Pacifique, la pression augmente en surface et diminue en altitude. Les vents se propagent des hautes vers les basses pressions (selon les flèches oranges). Lors d'un événement El Niño (*au milieu*), les alizés faiblissent et les eaux chaudes accumulées à l'Ouest se déversent vers l'Est (selon les flèches blanches), entraînant un réchauffement de la surface de l'océan au centre et à l'Est, l'abaissement de la thermocline à l'Est et sa remontée à l'Ouest, de sorte qu'elle se rapproche de l'horizontale. La cellule de Walker se déplace vers l'Est, suivant les eaux chaudes de surface, et se scinde parfois en deux. Lors d'un événement La Niña (*en bas*), les alizés se renforcent, déplaçant le réservoir d'eau chaude (selon les flèches blanches) plus à l'Ouest que dans les conditions normales, et entraînent la remontée des eaux froides et de la thermocline à l'Est.



(à 12 kilomètres de la surface) par des vents qui soufflent dans le sens inverse. Au-dessus des eaux chaudes de l'Ouest du Pacifique, l'air chaud, en montant, diminue la pression en surface et augmente la pression en altitude, tandis qu'au-dessus des eaux froides de l'Est du Pacifique, la pression augmente en surface et diminue en altitude. Pendant les événements El Niño, la cellule de Walker se déplace vers l'Est et se scinde parfois en deux (voir la figure 1, au milieu). Dans le Pacifique central, une zone de haute pression se crée dans la haute troposphère, la couche atmosphérique la plus proche de la surface (au-dessus s'étend la stratosphère).

Entre l'équateur et les tropiques, les vents parcourent une autre boucle, nommée « cellule de Hadley » (voir la figure 2) : à l'équateur, l'air chaud s'élève et se déplace vers les pôles (où la température et la pression sont moins élevées), mais la force de Coriolis les dévie de plus en plus vers l'Est, de sorte qu'ils deviennent parallèles aux cercles de latitude, formant les jet-streams subtropicaux, des courants rapides qui circulent dans la haute troposphère vers 12 kilomètres d'altitude (voir la figure 2). Pour compenser l'accumulation d'air due aux jet-streams, une partie de l'air de la haute troposphère redescend vers l'équateur, alimentant les alizés et bouclant la cellule de Hadley (l'autre par-

tie se dirige vers les pôles). Lors des événements El Niño, les jet-streams s'intensifient, car l'élévation de température du Pacifique central augmente la différence de pression entre l'équateur et les moyennes latitudes.

La modification des cellules de Walker et de Hadley perturbe l'ensemble du système climatique de la planète : d'autres cellules de Walker existent tout le long de l'équateur, de sorte que lorsque celle du Pacifique est modifiée, les autres le sont aussi. Il en va de même pour la cellule de Hadley, dont les modifications entraînent des changements dans d'autres cellules (la cellule de Ferrel et la cellule polaire) situées le long des méridiens (voir la figure 2).

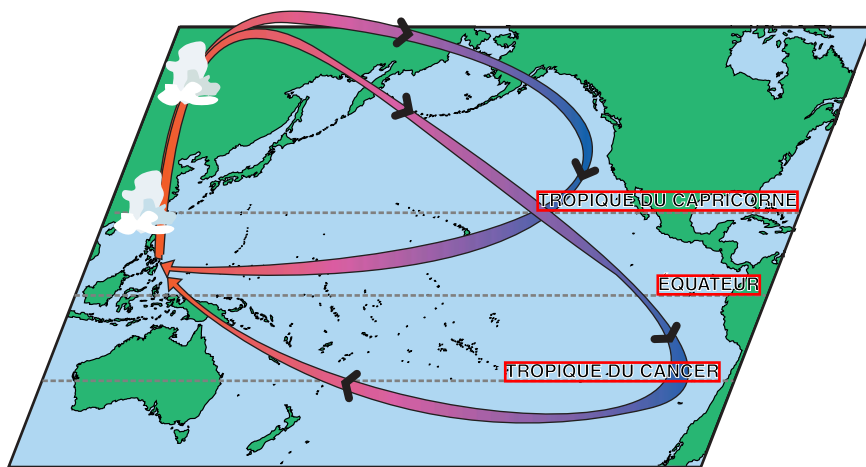
Après un événement El Niño dans le Pacifique, on constate souvent que, dans les autres régions tropicales, la température des océans augmente d'un degré en moyenne, ce qui perturbe la circulation atmosphérique locale. Statistiquement, les événements El Niño s'accompagnent de pluies diluviennes sur le Sud du Brésil, sur le Paraguay et sur le Nord de l'Argentine, de tempêtes plus fréquentes dans le golfe du Mexique, de sécheresses en Afrique de l'Ouest, en Australie, en Indonésie, de moussons moins humides que la normale en Inde...

2. LES JET-STREAMS SUBTROPICAUX qui circulent parallèlement aux latitudes (selon les flèches vertes) alimentent les alizés, qui reviennent vers l'équateur (selon les flèches bleues), bouclant la cellule de Hadley. Ils alimentent aussi des vents qui se dirigent vers les pôles et qui font partie de la cellule de Ferrel. La circulation atmosphérique globale comprend plusieurs « cellules » ou boucles de vent juxtaposées. Lors d'un événement El Niño, qui modifie la cellule de Walker (parallèle à l'équateur) et la cellule de Hadley, les cellules voisines sont également modifiées, ainsi que leurs voisines... ce qui explique pourquoi El Niño a des répercussions sur l'ensemble du globe.

Après El Niño, La Niña

Le phénomène El Niño perturbe la circulation atmosphérique de l'ensemble de la planète. Les vents anormaux qu'il crée, par rapport à la circulation atmosphérique moyenne, agissent à leur tour sur l'océan en amplifiant El Niño ou en s'opposant à lui. Ils déclenchent parfois La Niña, c'est-à-dire un renforcement des alizés (correspondant à une valeur positive de l'indice de l'oscillation australe), qui déplace le réservoir d'eau chaude plus à l'Ouest que la position qu'il occupe dans les conditions normales, apportant des pluies abondantes sur l'Indonésie. La remontée des eaux froides à l'Est provoque alors des sécheresses sur les côtes Ouest Sud-américaines (voir la figure 1, en bas).

La survenue de La Niña dépend de la réflexion des ondes océaniques sur les côtes indonésiennes ou Sud-Américaines. Si les ondes de Kelvin ont assez d'énergie lorsqu'elles atteignent les côtes de l'équateur, elles se réfléchissent en ondes dite de Rossby, qui se propagent vers l'Ouest, mais plus lentement que les ondes de Kelvin. Les ondes de Rossby



3. LA CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE TROPICALE est une combinaison de la cellule de Walker et de la cellule de Hadley : l'air chaud qui s'élève au dessus du Pacifique Ouest, au lieu de se répartir en sens inverse vers l'Est pour boucler la cellule de Walker, a tendance à se diriger vers les tropiques et à intégrer la cellule de Hadley. Ainsi, des changements dans la cellule de Walker initient des changements dans la cellule de Hadley.

peuvent aussi être créées par la poussée des vents d'Est. Elles se réfléchissent à leur tour sur les côtes indonésiennes en ondes de Kelvin. On obtient ainsi une combinaison d'ondes en phase ou en opposition de phase, selon leur vitesse de propagation et le pouvoir réflecteur des côtes. Cette combinaison détermine les variations de température de surface de l'océan. Par couplage, l'atmosphère tropicale réagit à ces variations océaniques, et, ce faisant, en provoque de nouvelles. On comprend ainsi pourquoi, une fois qu'El Niño s'est déclenché, il n'est pas toujours suivi de La Niña : ces événements dépendent de l'inertie du système oscillant formé par l'atmosphère et par l'océan. On comprend éga-

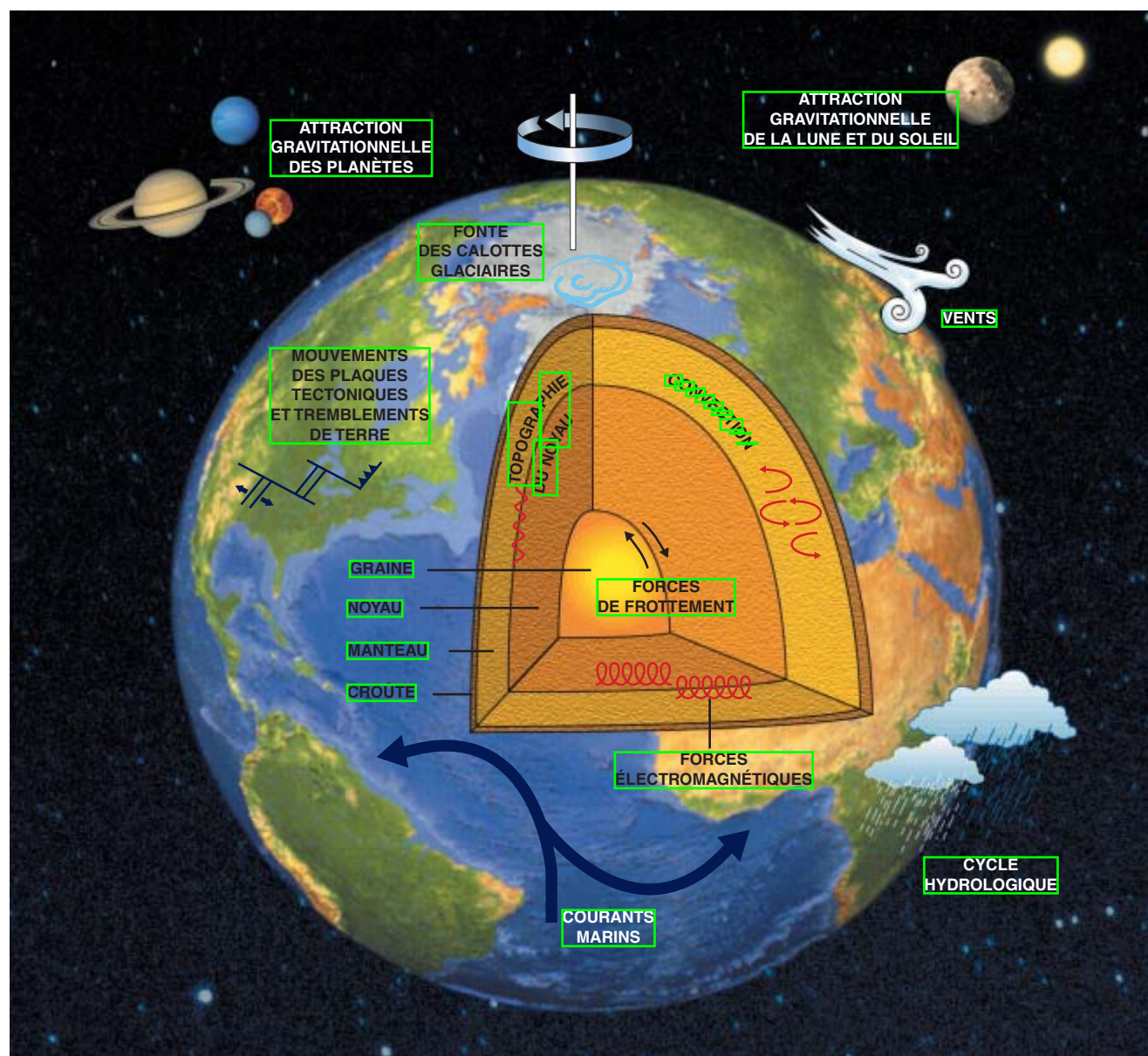
lement comment El Niño agit sur l'atmosphère à des échelles de temps qui vont de quelques mois à la décennie.

La rotation de la Terre et l'atmosphère

Dans ce système oscillant, les facteurs à prendre en compte et les interactions sont si nombreuses qu'aujourd'hui les climatologues essaient une nouvelle approche plus globale : ils s'intéressent à la vitesse de rotation de la Terre, dont on a découvert qu'elle diminue et passe par des minimums à chaque événement El Niño.

La Terre ne tourne pas toujours à la même vitesse. Au début du XVII^e

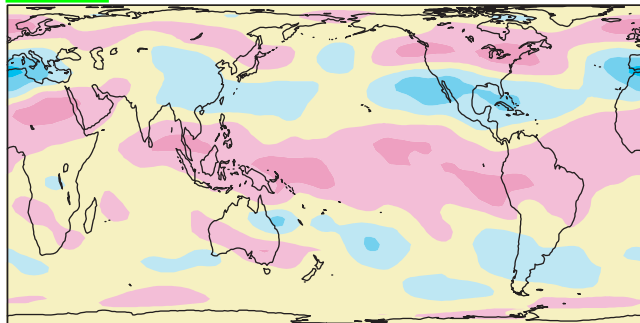
siècle, Kepler est le premier à soupçonner que sa rotation n'est pas uniforme (il fait allusion à cette possibilité dans divers passages de son œuvre), suivi par Newton, qui écrit : « Il est possible qu'il n'existe aucun mouvement uniforme par lequel le temps puisse être mesuré avec précision. » Edmund Halley, son contemporain et le découvreur de la comète qui porte son nom, remarque que la Lune est en avance par rapport à la position qu'elle devrait avoir selon les calculs de Ptolémée et selon ceux des Arabes, datant du IX^e siècle. Au XVIII^e siècle, Emmanuel Kant parle des marées et André Lalande de la circulation atmosphérique pour expliquer les variations de la longueur du



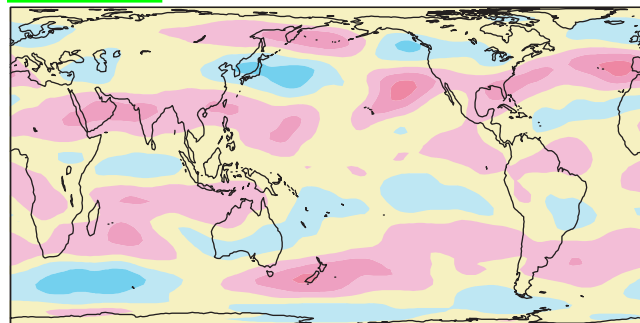
4. LA ROTATION DE LA TERRE n'est pas uniforme. Plusieurs phénomènes la font varier : l'attraction gravitationnelle de la Lune, du Soleil et des planètes, la circulation atmosphérique et océanique, le cycle

hydrologique et les phénomènes géophysiques internes (liés à la topographie, la convection et les forces électromagnétiques entre le manteau et le noyau).

MARS 1997



NOVEMBRE 1997



jour. En 1870, Simon Newcomb constate que les tables de la position de la Lune publiées en 1857 ne s'accordaient pas avec ses observations. Cependant, ses confrères sont à tel point persuadés de l'uniformité de la rotation de la Terre qu'ils n'acceptent pas immédiatement de la remettre en cause. À la fin du XIX^e siècle que George Darwin (le fils de Charles Darwin) démontre que, dans le passé, la Lune était plus proche de la Terre et que la durée du jour était plus courte. Enfin, en 1915, des mesures suffisamment précises le confirment.

Pourquoi n'est-elle pas uniforme ? Plusieurs phénomènes font varier la vitesse de rotation de la Terre (voir la figure 4), chacun agissant à des échelles

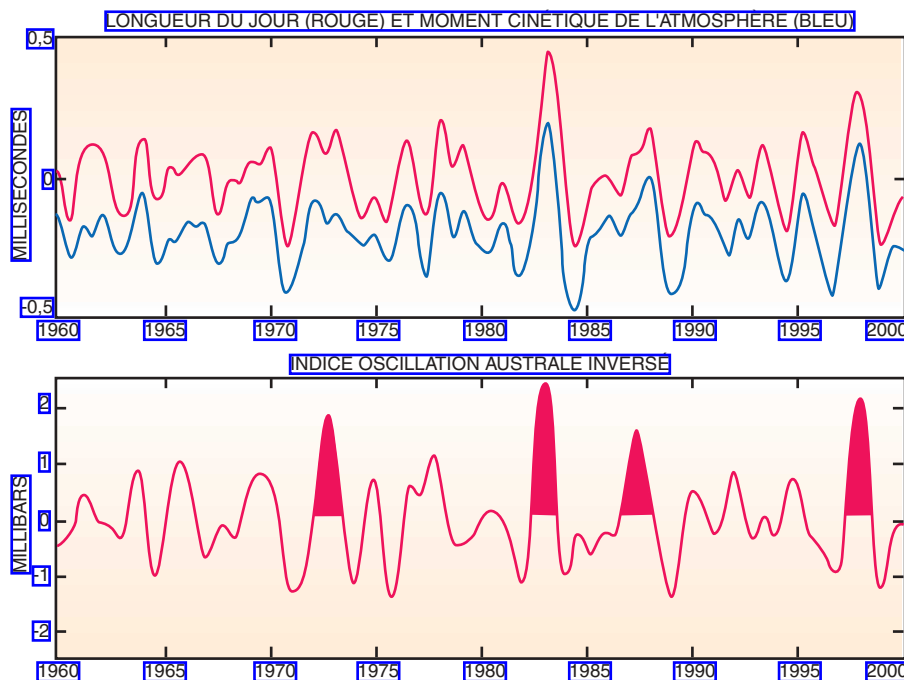
de temps différentes. La Lune et le Soleil sont responsables de variations séculaires de la vitesse de rotation de la Terre, sur laquelle elles exercent des forces de gravitation qui freinent son mouvement : la longueur du jour augmente d'environ deux millisecondes par siècle. Selon cette estimation, il y a 500 millions d'années, la Terre devait accomplir une rotation complète en 21 heures.

Ces variations n'interviennent pas dans le cadre de l'étude du phénomène El Niño, car elles concernent des échelles de temps beaucoup plus longues que celles qui nous intéressent. Dans la suite, nous ferons abstraction des forces extérieures qui s'exercent sur la Terre, que nous considérerons comme un système

isolé. Dans ces conditions, d'après les lois de la physique newtonienne, la «quantité de rotation» ou moment cinétique global de la Terre se conserve (le moment cinétique d'un corps en rotation autour d'un axe dépend de sa masse, de sa vitesse et de la distance qui le sépare de cet axe). Cependant, la Terre n'est pas une boule solide et homogène. Elle est constituée d'éléments solides (la graine, le manteau et la croûte terrestre) et de fluides (le noyau, l'hydrosphère et l'atmosphère) qui évoluent et interagissent : leur moment cinétique change. Or, la loi de conservation du moment cinétique global de la Terre impose que, si le moment cinétique de l'une de ses composantes varie, celui d'une ou de plusieurs autres de ses composantes varient en sens opposé. Notamment, le moment cinétique de ces composantes solides est modifié et, avec lui, la vitesse de rotation de la Terre.

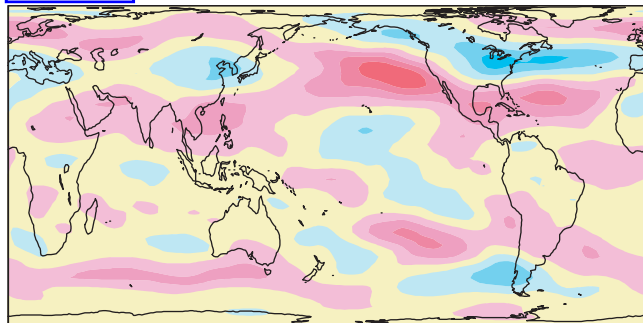
Les phénomènes géophysiques, tels la cristallisation de la graine liée au refroidissement progressif de la Terre depuis sa formation, les couplages électromagnétiques entre le noyau et le manteau ou les mouvements de convection au sein de ces deux éléments entraînent des variations décennales irrégulières de la longueur du jour. La période de ses variations est de 20 à 60 ans, et leur amplitude est de 3 à 4 millisecondes.

Les phénomènes qui perturbent la circulation atmosphérique sont les principaux responsables des variations journalières, saisonnières ou à l'échelle de quelques années. Ils déterminent la valeur du moment cinétique de l'atmosphère, qui se répercute sur le moment cinétique de la Terre. Pour accéder au moment cinétique global de l'atmosphère, on fait la moyenne des moments cinétiques locaux, calculés avec les données météorologiques recueillies par des ballons sondes et des satellites, telle la vitesse des vents le long des latitudes (ces vents sont ceux qui influencent le plus la rotation

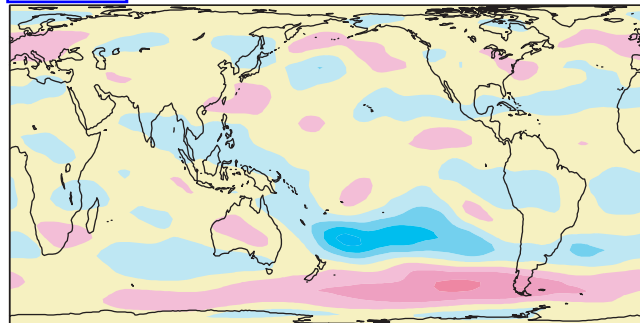


5. LA LONGUEUR DU JOUR, ou période de rotation de la Terre, varie en phase avec le moment cinétique atmosphérique, qui mesure la «quantité de rotation» de l'atmosphère et avec l'indice de l'oscillation australe inversé, c'est-à-dire la différence de pression entre Darwin, en Australie, et Tahiti, qui mesure l'intensité des événements El Niño (les pics en rouge correspondent aux plus intenses) : ces courbes qui représentent les variations à des échelles de temps comprises entre un et six ans (les autres, telles les variations saisonnières, étant filtrées) montrent que le phénomène El Niño influence le moment cinétique atmosphérique, qui influence la longueur du jour. Précisons que le moment cinétique atmosphérique est proportionnel à une quantité en millisecondes, représentée ici, à laquelle on a enlevé 2 millisecondes, pour pouvoir mieux comparer à la longueur du jour.

FÉVRIER 1998



JUILLET 1998



de la Terre, car ils sont perpendiculaires à l'axe de rotation). Lors des événements El Niño, sous l'effet de l'accélération des jet-streams, le moment cinétique global de l'atmosphère augmente, ce qui est contrebalancé par une baisse du moment cinétique de la Terre solide, donc un ralentissement de sa vitesse de rotation. À ces échelles de temps, la circulation océanique intervient aussi sur la rotation de la Terre, mais dans une bien moindre mesure.

D'autres phénomènes, telles les fluctuations du cycle hydrologique (surtout influencées par les pluies), font aussi varier la longueur du jour à des échelles de temps diverses, mais de façon négligeable.

En somme, bien que les causes des variations de la vitesse de rotation de la Terre soient nombreuses, la circulation atmosphérique en est la principale responsable aux échelles de temps inférieures à la décennie. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer les valeurs du moment cinétique atmosphérique à celles de la vitesse de rotation de la Terre (voir la figure 5). On ne calcule plus cette dernière en observant les étoiles, comme autrefois, mais avec des techniques modernes plus précises (voir l'encadré ci-contre). Depuis plusieurs décennies, les valeurs ainsi obtenues de la longueur du jour montrent qu'elle varie conjointement avec le moment cinétique atmosphérique, aussi bien à l'échelle de la journée que de plusieurs années (voir la figure 5).

Ainsi, à des échelles de temps inférieures à la décennie, la vitesse de rotation de la Terre (du domaine de la géodésie) dépend des variations du moment cinétique de l'atmosphère, qui sont elles-mêmes liées au phénomène El Niño (du domaine de la climatologie). La vitesse de rotation de la Terre pourrait donc être un indicateur des signes précurseurs des événements El Niño dans l'atmosphère et servir à mieux les com-

6. EN 1997-1998, LE MOMENT CINÉTIQUE ATMOSPHÉRIQUE, qui mesure la «quantité» de rotation de l'atmosphère, a évolué en phase avec l'événement El Niño (les régions où il est bas sont en bleu, tandis que celles où il est haut sont en rose) : il était anormalement élevé à l'équateur de mars à octobre 1997, au début d'El Niño, puis aux latitudes moyennes de novembre à janvier 1998, à l'apogée d'El Niño, et enfin aux hautes latitudes jusqu'en juillet 1998, où El Niño est dans sa phase décroissante et va bientôt laisser la place à La Niña.

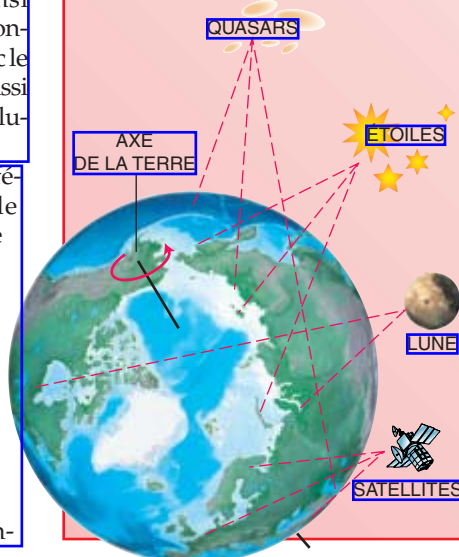
Les méthodes de mesure de la longueur du jour

Jusque dans les années 1970, on a observé les variations de la vitesse de rotation de la Terre à l'aide de lunettes et autres instruments optiques : on comparait l'heure de passage des étoiles en un point donné du ciel avec l'heure de passage théorique, donnée par des tables. Si l'étoile était en avance, cela signifiait que la Terre avait ralenti et si l'étoile était en retard, qu'elle avait accéléré. Cependant, cette méthode est imprécise, à cause de la déviation que subissent les rayons lumineux lorsqu'ils traversent l'atmosphère, que l'on ne sait pas calculer (elle dépend de l'état de l'atmosphère, que l'on ne connaît pas exactement).

Aujourd'hui, on utilise des techniques modernes plus précises. L'interférométrie à très longue base

consiste à observer simultanément en ondes radio une même source extragalactique (un quasar ou un noyau de galaxie) à l'aide de deux radiotélescopes distants de plusieurs milliers de kilomètres. Connaissant les coordonnées de la source (fixe), on calcule le décalage théorique entre les heures d'arrivée des ondes radio aux deux radiotélescopes. De la différence entre le décalage théorique (calculé avec une certaine vitesse de rotation de la Terre) et le décalage mesuré, on déduit la variation de la vitesse de rotation de la Terre par rapport à la valeur postulée.

La télémétrie Laser consiste à mesurer le temps que met une impulsion laser à atteindre la Lune (ou un des satellites artificiels conçus pour les études de géodynamique), à se réfléchir sur les cataphotes qui y sont installés et à retourner sur Terre (les cataphotes sont des systèmes optiques renvoyant la lumière en sens inverse et dans l'exacte direction d'où elle lui parvient). De même, le décalage entre la valeur mesurée et la valeur théorique donne la variation de la vitesse de rotation de la Terre par rapport à la vitesse postulée. On utilise également des mesures réalisées avec le système GPS (Global Positioning System) et le système radioélectrique DORIS, du Centre national d'études spatiales. En recoupant les résultats obtenus par ces différentes techniques, on obtient une précision de 0,01 milliseconde sur la longueur du jour.



prendre, peut-être même à les prévoir. Pour atteindre ce but, les géophysiciens et les climatologues étudient les relations existant entre ces trois éléments. Notamment ils sont en train de préciser et de quantifier les effets des événements El Niño sur le moment cinétique atmosphérique, l'un des indices les plus précis pour tester la validité des modèles climatiques.

La vitesse de rotation de l'atmosphère

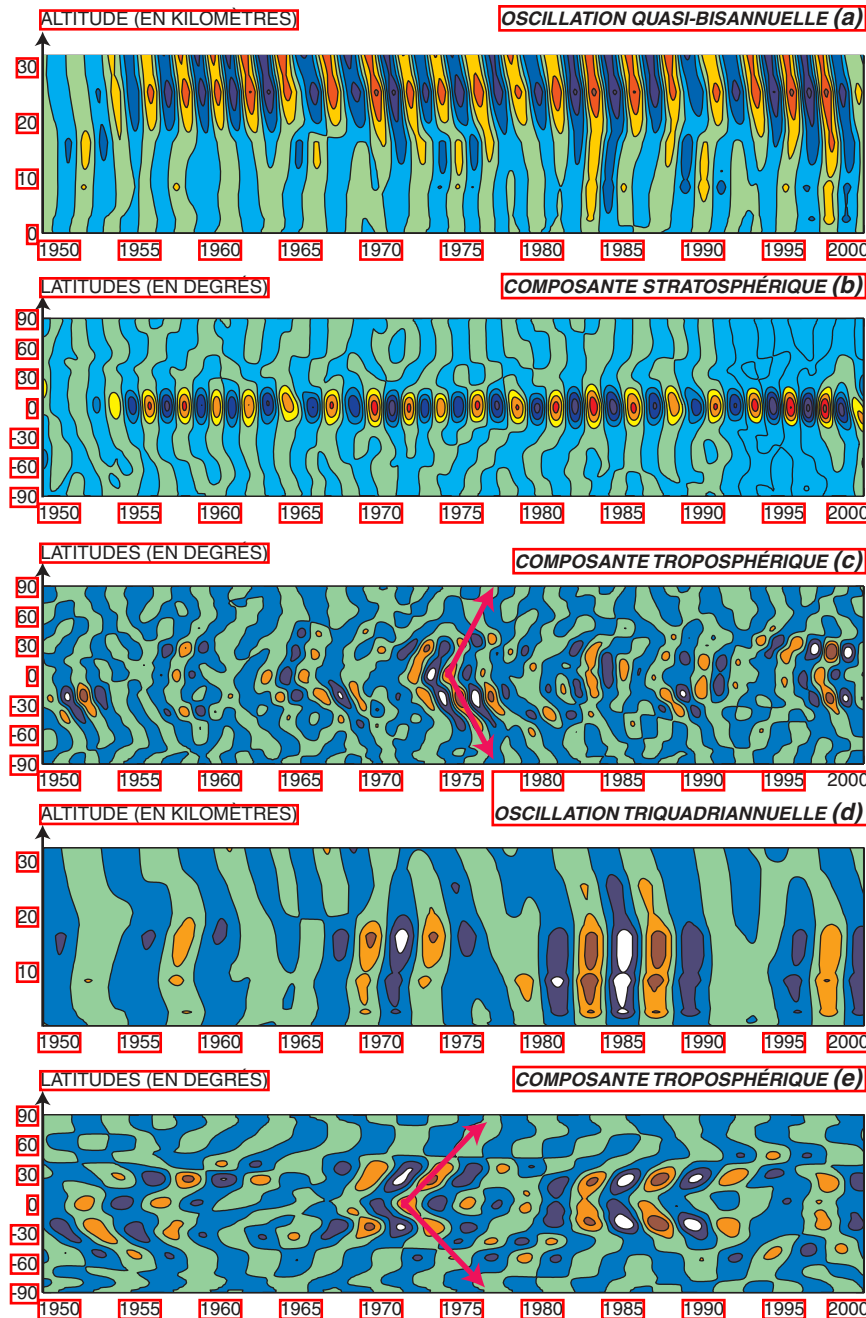
Les deux derniers El Niño intenses ont eu lieu en 1982-1983 et en 1997-1998 (il y en a eu de moindre intensité en 1986-1987 et 1992). Celui de 1982-1983 a été particulièrement intense. Il a provoqué des tempêtes et des inondations en Amérique et des sécheresses

en Indonésie et en Australie. C'est pendant cet événement que le moment cinétique de l'atmosphère a atteint la plus grande valeur jamais enregistrée et que l'on a remarqué pour la première fois les corrélations entre le moment cinétique atmosphérique et l'indice de l'oscillation australe. En comparant leurs valeurs lors des années précédentes, on constate qu'elles varient en opposition de phase et qu'elles atteignent des valeurs extrêmes chaque fois qu'un événement El Niño a lieu (voir la figure 5).

En juin 1997, le Pacifique tropical, jusqu'alors légèrement plus froid que d'habitude, a commencé à se réchauffer, et les observations par satellite ont montré que le niveau de la mer s'élevait à l'Est, à cause de l'arrivée d'un train d'ondes de Kelvin : ces prémices annonçaient l'épisode El Niño de 1997-1998. Les alizés ont faibli et le jet-stream de l'hémisphère Nord s'est intensifié, entraînant une augmentation du moment cinétique atmosphérique et de la longueur du jour. L'événement El Niño a atteint son apogée en février 1998, quand ces deux valeurs étaient maximales. Jusqu'en mai 1998, les eaux superficielles de l'océan Pacifique sont restées anormalement chaudes, puis, à partir d'août 1998, El Niño a laissé la place à La Niña.

Les moyennes régionales du moment cinétique atmosphérique montrent le lien direct entre cette quantité et les événements El Niño, pendant chaque phase de leur déroulement (voir la figure 6). Lors de l'épisode El Niño de 1997-1998, elles indiquent qu'il était anormalement élevé à l'équateur de mars à octobre 1997, ce qui correspond à la perturbation de la cellule de Walker, puis aux latitudes moyennes de novembre 1997 à janvier 1998, ce qui correspond à la perturbation de la cellule de Hadley, et enfin aux hautes latitudes jusqu'en juillet 1998.

A une échelle de temps un peu plus longue, trois types de vents sont responsables des variations du moment cinétique atmosphérique (voir la figure 7) : des vents stratosphériques qui se propagent des hautes vers les basses altitudes et localisés au voisinage de l'équateur, des vents troposphériques qui se propagent de la surface vers les hautes altitudes et de l'équateur vers les pôles (ces vents stratosphériques et troposphériques ont une période d'environ deux ans et forment ce que l'on nomme l'oscillation «quasi-bisannuelle»), des vents essentiellement



7. L'OSCILLATION QUASI-BISANNUELLE a une période d'environ 2 ans (a), comme le montrent les mesures du moment cinétique atmosphérique (qui augmente du violet au bleu, vert, jaune, rouge et blanc). Elle est formée par des vents stratosphériques (b) qui se propagent des hautes vers les basses altitudes et localisés au voisinage de l'équateur, des vents troposphériques (c) qui se propagent de la surface vers les hautes altitudes et de l'équateur vers les pôles (selon les flèches rouges). L'oscillation triadiennale (d) est formée par des vents essentiellement troposphériques (e) qui se propagent de l'équateur vers les pôles (selon les flèches rouges) avec une période de trois à quatre ans.

troposphériques qui se propagent de l'équateur vers les pôles avec une période de trois à quatre ans (ils forment l'oscillation «triquadriennale»).

Lors des deux événements El Niño de 1982-1983 et de 1997-1998, les variations d'intensité de ces vents étaient en phase et présentaient de grandes amplitudes. Était-ce une coïncidence? Non, car les deux types de vents troposphériques dépendent des variations de température en surface des océans, donc de El Niño. En outre, les variations d'intensité des vents stratosphériques étaient en phase avec celles des vents troposphériques, ce qui indique probablement un lien de cause à effet entre ces vents et les épisodes El Niño, par l'intermédiaire des vents troposphériques, et ce qui accentue encore la relation entre le moment cinétique atmosphérique et l'indice de l'oscillation australe.

Selon une hypothèse encore débattue au sein de la communauté scientifique, les épisodes El Niño intenses, tels ceux de 1982-1983 et de 1997-1998, se produiraient quand les oscillations quasi-bisannuelles et triquadriennales sont en phase et de grande amplitude. À l'aide de méthodes statistiques, on détermine l'évolution de ces oscillations. En 2001-2002, leurs composantes troposphériques seraient en phase, ce qui apparaît comme une condition nécessaire au déclenchement d'un épisode El Niño, mais celle de l'oscillation quasi-bisannuelle serait de faible amplitude, ce qui laisse présager un épisode El Niño peu intense. Cependant, cette prévision a ses limites : l'emploi des méthodes statistiques introduit une incertitude irréductible tant que l'on ne comprendra pas comment la période et l'amplitude

des oscillations quasi-bisannuelle et triquadriennale varie. En outre, elle suppose que ces deux oscillations intègrent l'influence des autres composantes du système climatique, notamment de l'océan.

Le moment cinétique atmosphérique présente aussi des fluctuations décennales. El Niño en est-il responsable? Nous ne savons pas encore répondre à cette question, tant les sources de variations sont nombreuses à cette échelle de temps. D'autres phénomènes climatiques pourraient aussi intervenir, notamment l'oscillation Nord-atlantique, le deuxième phénomène de plus grande ampleur après El Niño.

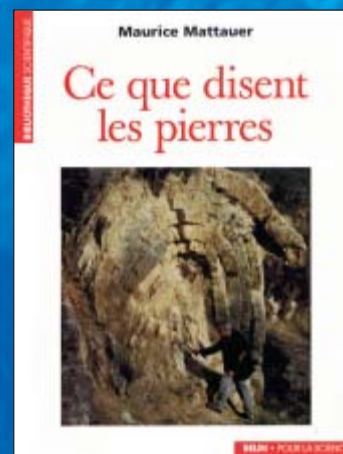
Aujourd'hui, on sait que les épisodes El Niño sont plus fréquents pendant certaines décennies, alors que les épisodes La Niña sont plus fréquents pendant d'autres. Dans les années 1990, des conditions chaudes se sont «anormalement» maintenues dans le Pacifique tropical. On parle de El Padre ou de La Madre pour qualifier ces périodes de 10 à 20 ans où les conditions sont respectivement plutôt chaudes ou plus froides et pendant lesquelles El Niño ou La Niña apparaissent plus souvent. La communauté scientifique essaie de trouver les causes de cette variabilité décennale. Dans ces modèles, elle doit aussi tenir compte de l'impact des gaz à effet de serre qui participent au réchauffement du climat de notre planète. Ceux qui, comme nous, étudient tant des données astrométriques et géodésiques que des processus atmosphériques, océaniques ou liés au couplage avec le noyau terrestre, cherchent à comprendre tous ces phénomènes pour prévoir le climat futur.

Rodrigo ABARCA DEL RIO est géophysicien au département de mécanique spatiale de la société Communication et Systèmes (CS), à Toulouse. Daniel GAMBIS est astronome à l'Observatoire de Paris, où il dirige le Service international de la rotation terrestre. David SALSTEIN est météorologiste dans la société de Recherche Atmosphérique et Environnementale, à Lexington (Massachusetts) où il dirige le service de diagnostic atmosphérique et océanique. Boris DEWITTE est océanographe de l'Institut de recherche pour le développement au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiale, à Toulouse.

ABARCA DEL RIO, R. D. GAMBIS, D.A. SALSTEIN, *Interannual signals in length of day and atmospheric angular momentum*, Ann. Geophys., n° 18, pp. 347-364, 2000.

DICKEY, J.O., P. GEGOUT, et S.L. MARCUS, *Earth-Atmosphere angular momentum exchange and ENSO. The rotational signature of the 1997-98 event.*, Geophys. Res. Lett., n° 26, pp. 2477-2488, 1999.

I. DELCROIX, B. DEWITTE, Y. DUPENHOAT, F. MASIA et J. PICAUT, 2000 : *Equatorial waves and warm pool displacement during the 1992-1998 El Niño events*. J. Geophys. Research., n° 105, pp. 26045-26062, 2000.



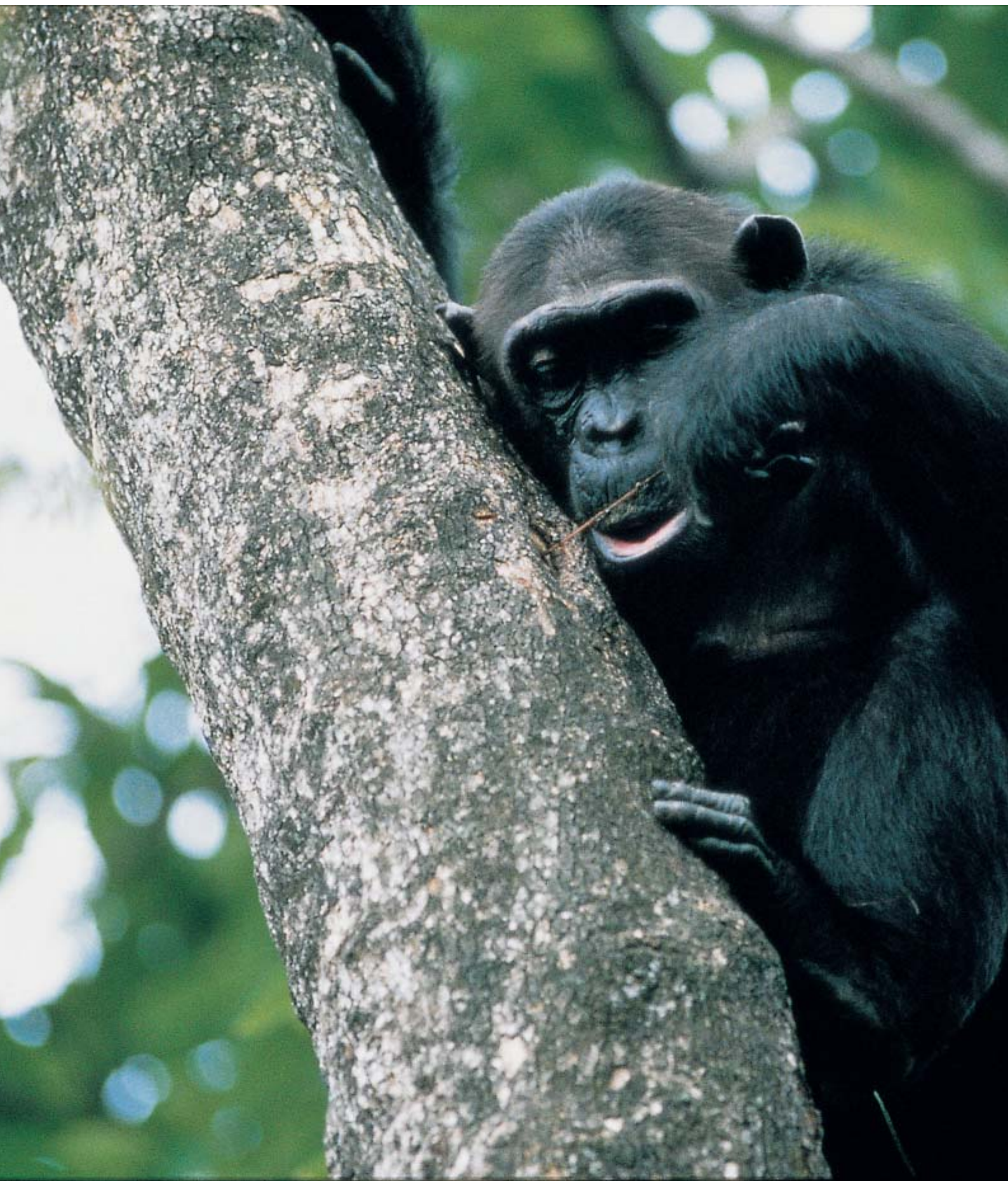
CE QUE DISENT LES PIERRES Maurice Mattauer

Ce livre vous convie à une promenade illustrée dans l'univers des pierres. À partir de l'image, Maurice Mattauer, professeur de géologie à l'Université de Montpellier, reconstitue l'histoire des roches et les grands événements dont elles sont les témoins, et invite à un «retour aux pierres», gage d'une nouvelle compréhension de la nature.

Code 075001 • 100 F
144 pages

Voir bon de commande
page 98

BELIN • POUR LA SCIENCE



Les cultures des chimpanzés

A. WHITEN • CH. BOESCH

Les chimpanzés sont encore plus proches de l'homme qu'on ne le pensait. Ils ont des comportements qui ne peuvent être interprétés qu'en termes de «traditions» et qu'ils se transmettent de génération en génération.

Des primatologues s'approchent sans bruit d'une clairière, dans la forêt de Taï, en Côte-d'Ivoire ; ils entendent des bruits sourds et des craquements répétés. Ils ont l'impression qu'un petit groupe d'hommes s'y affine, travaillant avec des outils rudimentaires à une tâche quotidienne. En entrant dans la clairière, ils découvrent plusieurs individus occupés à casser des noix de coula, presque aussi dures que de la pierre, mais très nourrissantes, avec des marteaux de bois et des enclumes. Par moments, ils délaissent leurs outils pour aller ramasser d'autres noix. Des jeunes s'initient à cette activité, soulevant maladroitement des morceaux de bois ou des pierres qui leur servent de marteaux. L'un d'eux, assis près de sa mère, ramasse des morceaux de coquilles de noix.

À bien des égards, ce groupe ressemble à une famille en quête de nourriture. Les marteaux et les enclumes qu'il laisse derrière lui, et dont certains sont en pierre, exciteraient l'imagination de tout anthropologue cherchant les signes d'une civilisation primitive. Pourtant, les habitants de cette forêt ne sont pas des hommes : ce sont des chimpanzés. On étudie depuis longtemps les ressemblances entre les chimpanzés et les hommes, mais, depuis dix ans, on a découvert qu'elles sont bien plus profondes qu'on ne le soupçonnait. Le comportement observé dans la forêt de Taï est une adaptation spécifique à ce groupe, et les biologistes le considèrent comme une expression de la culture des chimpanzés. Le terme «culture» désigne des comportements typiques d'une population, tels les «dialectes régionaux» de certaines populations d'oiseaux chanteurs,

1. LA PECHE AUX FOURMIS est l'un des moyens de subsistance de certains groupes de chimpanzés, notamment ceux du Parc national de Mahale, en Tanzanie. Celui-ci introduit une brindille dans un nid de fourmis situé au cœur d'un arbre. Dès que les fourmis grimpent sur la brindille, le chimpanzé la retire et attrape les fourmis avec ses lèvres.

Source : V. Kessler, P. H. R. A. M. J. J. J.

mais les traditions culturelles des chimpanzés, riches et variées, sont plus élaborées. Seules celles de l'homme le sont encore davantage.

Depuis deux ans, les principales équipes de primatologues ont décrit une multitude de comportements culturels qu'ils ont observés en Afrique, de l'utilisation d'outils à des formes de communication et à des coutumes sociales. Notre image des chimpanzés a beaucoup changé. La façon dont nous les considérons aujourd'hui nous conduit à repenser notre propre «singularité» et à admettre que nos capacités culturelles ont des bases très anciennes.

Homo sapiens et le chimpanzé *Pan troglodytes* ont coexisté pendant des centaines de milliers d'années et partagent plus de 98 pour cent de leur patrimoine génétique. Pourtant, il y a seulement 40 ans, nous ignorions presque tout du comportement des chimpanzés dans la nature. La situation commença à changer dans les années 1960, quand Toshisada Nishida, de l'Université de Kyoto au Japon, et Jane Goodall s'installèrent en Tanzanie, respectivement à Mahale et à Gombe.

Lors des premières études, alors que les chimpanzés s'habituèrent à être observés de près, les primatologues découvrirent de nombreux comportements insoupçonnés, tels que le façonnage et l'utilisation d'outils, la chasse, la consommation de

viande, le partage de la nourriture et des combats mortels entre membres de communautés voisines. Pendant les années suivantes, d'autres primatologues installèrent d'autres camps et, malgré les problèmes financiers, politiques et logistiques qui ne manquèrent pas de survenir, plusieurs missions d'observation ont duré longtemps. En conséquence, nous vivons aujourd'hui une époque sans précédent, où l'on dispose enfin de descriptions scientifiques précises et complètes de la vie des chimpanzés appartenant à plusieurs communautés réparties dans toute l'Afrique.

Dès 1973, J. Goodall recense 13 formes d'utilisation d'outils et huit activités sociales qui semblent différer, chez les chimpanzés de Gombe et les autres populations de chimpanzés. Selon elle, certaines différences ont ce qu'elle nomme une origine culturelle. Quel est le sens exact de cette expression? Par définition, la culture est l'ensemble des aspects intellectuels propres à une civilisation ou à une nation. La diversité des cultures humaines recouvre les rituels de mariage, les habitudes culinaires les mythes, les légendes, les techniques utilisées... Les animaux n'ont évidemment ni mythe ni légende, mais ils sont capables de se transmettre des comportements, de génération en génération, non pas par les gènes, mais par l'apprentissage. Pour les biologistes, c'est le critère fondamental

qui définit un trait culturel : il doit pouvoir être appris en observant comment font les autres et se transmettre ainsi de génération en génération.

Quand les singes singent les autres

L'idée que les grands singes (les chimpanzés, les gorilles, les orangs-outans et les gibbons) imitent leurs congénères n'a rien de surprenant pour quiconque a observé leurs jeux dans les zoos. Toutefois, peut-on en conclure que les singes s'imitent?

Ainsi, quand un jeune chimpanzé regarde sa mère casser des noix de coula, comme dans la forêt de Taï, il reproduit la technique, dans la plupart des cas. Toutefois, certains pensent qu'il n'imité pas sa mère. L'intérêt que sa mère porte aux noix l'encouragerait à s'y intéresser aussi. Une fois son attention dirigée sur l'aliment, le jeune chimpanzé apprendrait à l'ouvrir après plusieurs tentatives, mais pas en imitant sa mère.

Cette distinction a son importance dans les débats sur les cultures des chimpanzés. Certains primatologues définissent un comportement culturel comme étant transmis non pas par les gènes, mais lorsque le jeune copie l'adulte. Si les chimpanzés trouvent tout seuls comment ouvrir des noix de coula quand ils ont un percuteur en main, on ne peut considérer que cette activité est culturelle. En outre, s'ils apprennent uniquement en se livrant à des expériences, ils doivent tout réinventer à chaque fois qu'ils essaient une nouvelle technique, et leur culture ne s'enrichit pas au fil des générations.

Les expériences réalisées en laboratoire constituent le meilleur moyen de découvrir les modes d'apprentissage des chimpanzés. Avec Deborah Custance, du Collège Goldsmiths, à Londres, nous avons imaginé des fruits artificiels qui ressemblaient à ceux que trouvent les chimpanzés dans la nature. Dans une des expériences, un groupe de chimpanzés observait une méthode pour ouvrir un de ces fruits, tandis que le second groupe observait une toute autre méthode. Puis, nous avons évalué dans quelle mesure les chimpanzés avaient été influencés par la méthode qu'ils avaient observée. Nous avons également fait l'expérience avec des enfants de trois ans. Nous avons constaté que les chimpanzés de six ans



2. UNE MÈRE CHIMPANZÈ de Taï, en Côte-d'Ivoire, montre à son petit comment ouvrir une noix de coula avec un marteau de pierre. Ce comportement n'existe pas chez les autres chimpanzés de la région, qui vivent à quelques kilomètres, de l'autre côté de la rivière Saasandra-N'Zo, bien qu'ils aient aussi des noix et des pierres à leur disposition. La rivière est une «barrière culturelle».

imitent le comportement qu'ils ont observé exactement comme des enfants de trois ans, peut-être de façon un peu moins fidèle.

Au cours d'une autre série d'expériences, nous avons donné aux chimpanzés du zoo de Zurich des marteaux et des noix identiques à ceux qu'ils auraient pu trouver dans la nature. En répertoriant leurs comportements, nous avons constaté que les chimpanzés en captivité ont des activités plus variées que les chimpanzés sauvages. L'environnement culturel des chimpanzés sauvages semble «canaliser» les comportements des jeunes vers les activités les plus utiles. Au zoo, ne bénéficiant pas des «traditions», les chimpanzés s'essaient à des activités plus futiles.

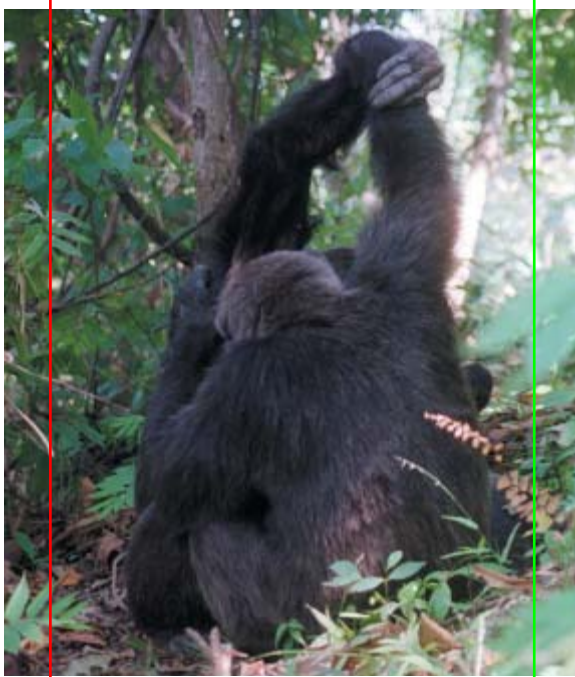
Les expériences réalisées avec les fruits artificiels étayaient cette hypothèse. Au cours de l'une d'elles, les chimpanzés ont imité une suite complète d'actions dont ils avaient été témoins, mais seulement après les avoir vues plusieurs fois et après avoir essayé d'autres méthodes. En d'autres termes, ils cherchaient à imiter ce que d'autres avaient réalisé devant eux, mais en progressant par approximations successives.

Ces expériences confirment que les chimpanzés apprennent par imitation, capacité qui autorise la transmission des comportements culturels. On imagine mal comment des chimpanzés pourraient acquérir des comportements spécifiques de certaines régions, telles la «pêche» des fourmis ou l'élimination des parasites du pelage. Ils les ont probablement appris en observant d'autres membres de leur groupe. Comme chez l'homme, certains comportements culturels sont sans doute acquis à la fois par imitation et par diverses formes d'apprentissage social : par exemple, le groupe attire l'attention d'un jeune sur les outils utiles. Quelle que soit la façon dont il est pratiqué, l'enseignement des aînés est indispensable pour que les jeunes deviennent autonomes. Dans les années 1990, parce que l'on avait découvert de nouvelles différences de comportement parmi les chimpanzés, on a commencé à dresser un panorama précis des variations culturelles de ces animaux. En 1992, William McGrew

recense 19 types d'utilisations d'outils dans des communautés distinctes. Michael Tomasello, de l'Institut Max Planck, et l'un d'entre nous (C. Boesch) identifient 25 activités – qui pourraient être des traits culturels – chez des populations de chimpanzés sauvages.

Un panorama culturel

Le panorama le plus récent des variations culturelles a été établi grâce à une collaboration unique de neuf spécialistes des chimpanzés, à laquelle nous avons participé : ils ont mis en commun leurs observations, ce qui représente 151 ans d'observations, si on additionne la durée de tous ces travaux. Les primatologues s'intéressent à la culture des chimpanzés depuis plusieurs décennies, mais ils ont trop souvent essayé d'étayer la diversité culturelle des chimpanzés avec des comportements observés sur un unique site de recherche. Cette approche a probablement masqué une partie de la diversité culturelle, pour trois raisons. Premièrement, les scientifiques ne publient pas la liste des activités qu'ils n'observent pas sur un site particulier.



3. LA POIGNEE DE MAIN au-dessus de la tête lors du toilettage est une attitude courante chez les chimpanzés de la forêt de Taï, de Mahale et de Kibale, mais n'a jamais été observée à Gombe. Ici, deux mâles se toilettent mutuellement tout en se tenant la main. On a observé que les deux communautés qui vivent à proximité de Mahale ont une façon différente de joindre les mains : contrairement à ses voisins, une des communautés évite le contact des paumes. En 40 ans d'observation à Gombe, la poignée de main n'a jamais été observée ; parfois un chimpanzé qui en toilette un autre attrape une branche située au-dessus de sa tête, mais jamais la main de son partenaire.

Pourtant, nous avons autant besoin de savoir les comportements qui ont été observés que ceux qui ne l'ont pas été. Deuxièmement, on décrit parfois des comportements des chimpanzés, mais sans préciser s'ils sont fréquents. Sans cette information, nous ignorons s'ils sont la règle ou l'exception. Enfin, les descriptions des comportements manquent souvent de précision, de sorte qu'on ne les reconnaît pas toujours.

Pour y remédier, nous avons adopté une nouvelle approche : nous avons demandé aux primatologues de décrire, pour chaque site, tous les comportements qu'ils supposaient être culturels. Nous avons ainsi recensé 65 comportements culturels possibles. Nous avons distribué cette liste à toutes les équipes travaillant sur les différents sites. Chaque équipe a alors précisé si elle observait ou non le comportement recensé dans la communauté de chimpanzés étudiée. On distinguait les comportements usuels (observés chez la plupart ou chez la totalité des membres d'une classe d'âge ou de sexe en bonne santé, par exemple chez tous les mâles adultes), courants (moins fréquents que les comportements précédents, mais observés à plusieurs reprises chez de nombreux individus), rares (observés sur le site, mais rares), absents (jamais observés) ou inconnus.

Nous avons mené notre enquête sur sept sites où les chimpanzés avaient l'habitude d'être observés par l'homme. Nous nous sommes surtout intéressés aux comportements absents dans une ou plusieurs communautés, alors qu'ils étaient usuels ou courants dans une autre. Nous avons utilisé ce critère pour définir les comportements culturels (certains comportements, absents pour des raisons locales spécifiques, n'ont pas été pris en compte : c'est le cas, par exemple, des chimpanzés de Bossou, qui ramassent des algues dans les mares à l'aide d'un bâton, mais ces algues ne poussent pas sur les autres sites).

À l'issue de notre étude, nous avons retenu 39 comportements culturels chez les chimpanzés, principalement des utilisations particulières d'outils, des rites de toilettage et des parades

Un guide des cultures des chimpanzés

Afin de répertorier les comportements culturels des chimpanzés, nous avons demandé aux primatologues qui travaillaient dans six sites d'Afrique centrale de classer les comportements des chimpanzés de sept communautés distinctes en fonction de leur fréquence (il y a deux communautés sur le site de Mahale). On a classé les comportements dans plusieurs catégories : usuels, que l'on observe chez la plupart ou chez la totalité des membres d'une classe d'âge ou de

sexe en bonne santé, par exemple tous les mâles adultes, courants, qui sont moins fréquents que les comportements usuels, mais observés à plusieurs reprises chez de nombreux individus, rares, absents ou inconnus. Certains comportements, par exemple casser des noix de coula à Budongo, sont absents pour des raisons écologiques (il n'y a pas de noix de coula dans la région). Nous avons recensé 39 comportements culturels, dont 18 sont illustrés ici.

Casser des noix

Pour ouvrir les noix de coula, les chimpanzés utilisent des pierres comme marteau et comme enclumes.



Creuser à l'aide d'un pilon

Les chimpanzés creusent et approfondissent des trous dans les arbres avec les tiges de palmiers qui jouent le rôle de pilons.



La pêche aux termites

Les chimpanzés introduisent des morceaux d'écorce minces et flexibles dans une termitière et en extraient les termites qu'ils mangent.



Récupérer des fourmis sur une brindille

Une fois que les fourmis ont escaladé la brindille introduite dans leur nid sur la moitié de sa longueur, les chimpanzés la font coulisser dans leur poing fermé, poussant les fourmis dans leur bouche.



Manger des fourmis sur une brindille

Dès que quelques fourmis sont montées sur la brindille introduite dans leur nid, les chimpanzés portent directement la brindille à leur bouche et récupèrent les insectes avec leurs lèvres.



Récupérer de la moelle

À l'aide de brindilles, les chimpanzés extraient la moelle des os longs des singes qu'ils ont tués et dévorés.



Le coussin de feuilles

Quelques grandes feuilles semblent servir de protection aux chimpanzés qui s'assoient sur le sol humide.



L'éventail à mouches

Pour se débarrasser des mouches, les chimpanzés utilisent des rameaux feuillus en guise d'éventail.

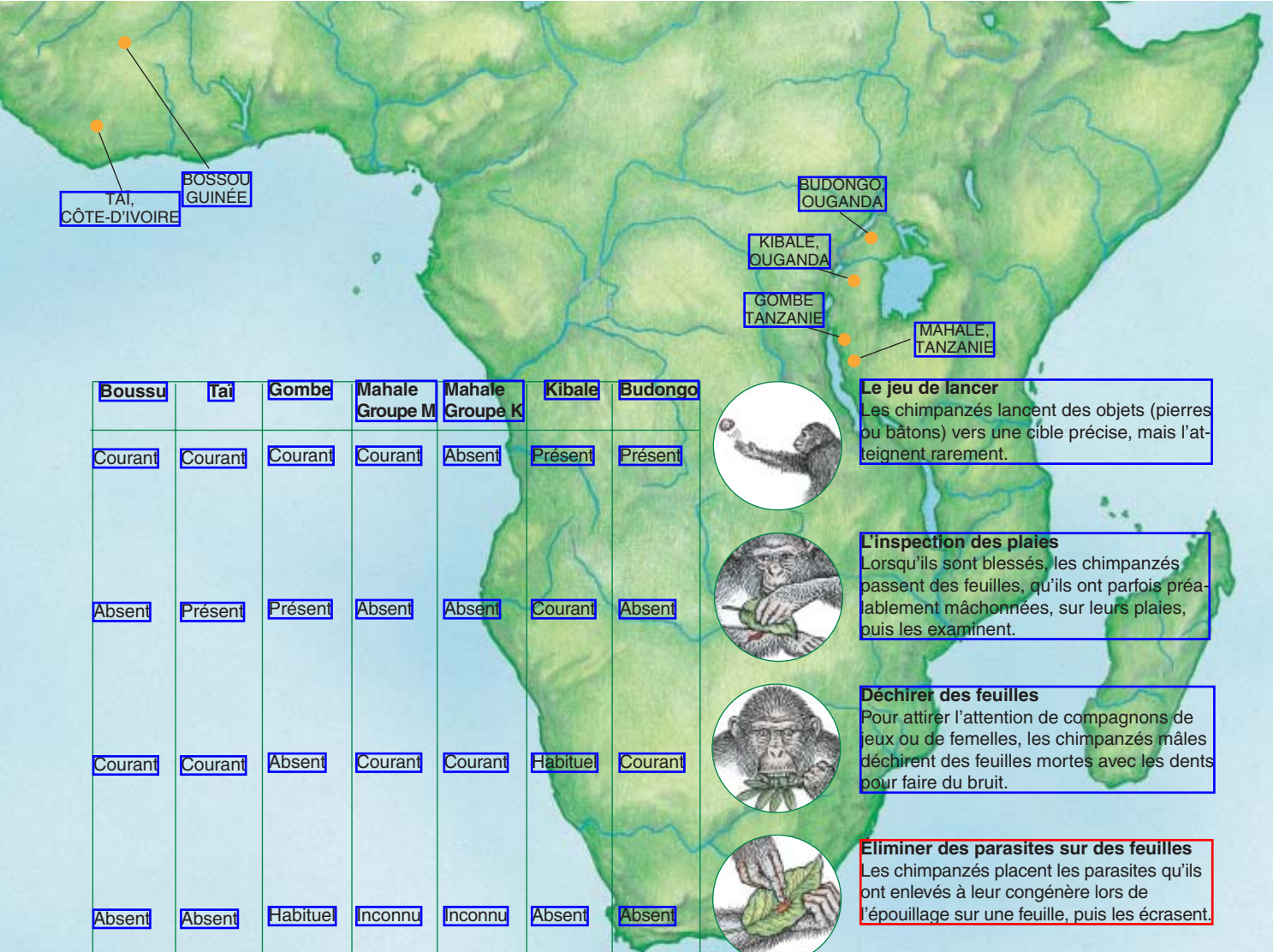


Se chatouiller

Les chimpanzés utilisent de grosses pierres ou des bâtons pour se chatouiller.



Boussu	Tai	Gombe	Mahale Groupe M	Mahale Groupe K	Kibale	Budongo
Usuel	Usuel	Absent	Absent	Absent	Absent (éco?)	Absent (éco?)
Usuel	Absent	Absent	Absent (éco?)	Absent (éco?)	Absent (éco?)	Absent (éco?)
Absent	Absent (éco)	Usuel	Absent	Usuel	Absent (éco?)	Absent
Rare	Absent	Usuel	Absent	Absent	Absent	Absent
Usuel	Usuel	Rare	Absent	Absent	Absent	Absent
Absent	Usuel	Absent	Absent	Absent	Absent	Absent
Rare	Courant	Absent	Absent	Absent	Rare	Absent
Absent	Courant	Rare	Absent	Absent	Absent	Courant
Absent	Absent	Courant	Absent	Absent	Absent	Absent



Boussu	Tai	Gombe	Mahale Groupe M	Mahale Groupe K	Kibale	Budongo
Courant	Courant	Courant	Courant	Absent	Présent	Présent
Absent	Présent	Présent	Absent	Absent	Courant	Absent
Courant	Courant	Absent	Courant	Courant	Habituel	Courant
Absent	Absent	Habituel	Inconnu	Inconnu	Absent	Absent
Absent	Absent	Présent	Inconnu	Inconnu	Absent	Courant
Absent	Courant	Présent	Absent	Absent	Absent	Absent
Absent	Habituel	Absent	Courant	Courant	Courant	Absent
Présent	Courant	Habituel	Courant	Courant	Absent	Absent
Absent	Courant	Courant	Courant	Courant	Courant	Habituel



Le jeu de lancer

Les chimpanzés lancent des objets (pierres ou bâtons) vers une cible précise, mais l'atteignent rarement.



L'inspection des plaies

Lorsqu'ils sont blessés, les chimpanzés passent des feuilles, qu'ils ont parfois préalablement mâchonnées, sur leurs plaies, puis les examinent.



Déchirer des feuilles

Pour attirer l'attention de compagnons de jeux ou de femelles, les chimpanzés mâles déchirent des feuilles mortes avec les dents pour faire du bruit.



Éliminer des parasites sur des feuilles

Les chimpanzés placent les parasites qu'ils ont enlevés à leur congénère lors de l'épouillage sur une feuille, puis les écrasent.



L'observation des parasites

Les chimpanzés placent les parasites enlevés à leur congénère sur une feuille dans la paume de leur main pour les examiner, puis ils les mangent ou les rejettent.



Ecraser les parasites avec le doigt

Les chimpanzés placent les parasites enlevés à leur congénère sur leur avant-bras, puis les écrasent à plusieurs reprises avant de les manger.



La poignée de main au-dessus de la tête

Les chimpanzés joignent leurs mains au-dessus de leur tête pendant qu'ils se toilettent mutuellement avec l'autre main.



Frapper, les doigts repliés

Les chimpanzés frappent les arbres ou d'autres surfaces dures avec leurs doigts repliés, pour attirer l'attention pendant la parade nuptiale.



Danser sous la pluie

Lorsqu'une forte averse commence, les mâles simulent une charge : ils traînent des branchages, martèlent le sol, frappent sur les racines saillantes et poussent des cris.

particulières. Certains utilisent des brindilles pour «pêcher» des fourmis, d'autres fabriquent des coussins de feuilles sèches pour s'asseoir. Aujourd'hui, ces 39 comportements placent les chimpanzés dans une classe à part, car ils ont des coutumes beaucoup plus élaborées que n'importe quel autre animal déjà étudié. Bien sûr, les chimpanzés se distinguent des hommes, dont les variations culturelles sont innombrables. Toutefois, notons que les scientifiques commencent seulement à découvrir la complexité des comportements des chimpanzés, et que le nombre de traits culturels des chimpanzés dépasse certainement les 39 que nous avons identifiés.

Des chimpanzés multiculturels

Lorsqu'ils décrivent les coutumes humaines, les anthropologues et les sociologues parlent souvent de «la culture européenne» ou de «la culture chinoise». Ces termes englobent un large spectre d'activités, tels le lan-

gage, les habitudes vestimentaires ou alimentaires, les rituels de mariage... Chez les animaux, on définit généralement une culture par un comportement spécifique, le chant d'un oiseau, par exemple. Les ornithologues n'ont pas identifié de variations de la parade nuptiale ou de l'alimentation, qui accompagneraient ces différences de chant.

En revanche, les chimpanzés ont plusieurs traits culturels : chaque communauté a tout un ensemble de comportements qui la différencie des autres groupes, au point que l'on peut parler de «culture Gombe» ou de «culture Taï». En observant le comportement d'un chimpanzé, on peut en déduire où il vit. Par exemple, un individu qui casse des noix, qui déchire des feuilles mortes avec ses dents pour attirer l'attention, qui pêche des fourmis avec un petit bâton et tape sur le sol ou sur un tronc d'arbre avec ses doigts repliés pour attirer les femelles vient de la forêt de Taï. Un chimpanzé qui utilise des feuilles pour le toilettage et qui tient la main de son partenaire

pendant cette activité vient soit de la forêt de Kibale, soit des monts Mahale. Si, en plus, il pêche des fourmis, il n'y a plus de doute : il vient de Mahale.

En plus des comportements particuliers, certains sont universels : les chimpanzés débarrassent leurs congénères des parasites qu'ils trouvent durant le toilettage, mais, dans la forêt de Taï, ils les écrasent avec le doigt sur l'avant-bras, sur une feuille à Gombe et, à Budongo, ils les posent sur une feuille pour les examiner avant de les manger ou de les jeter. Chaque communauté accomplit la même tâche, mais d'une façon qui lui est propre. Inversement, certains comportements semblent similaires, mais ont un sens différent : à Mahale, les mâles déchirent bruyamment des feuilles mortes avec leurs dents lorsqu'ils font la cour aux femelles, tandis qu'à Taï c'est pour attirer l'attention qu'ils déchirent des feuilles tout en martelant le sol ou un arbre.

La découverte de ces différents traits culturels des chimpanzés bouleverse nos idées reçues, tant sur eux



STEFAN MARSH • 31 ANDREW MITCHELL • GOMBE • OUGANDA

4. CE JEUNE CHIMPANZÉ (à gauche) s'exerce à «éplucher» le fruit artificiel qu'on lui a donné, après avoir regardé d'autres individus le faire. Grâce à ces expériences, les primatologues étudient comment les chimpanzés apprennent en imitant les autres. À droite, le toilettage mutuel est un comportement commun à tous les chimpanzés, mais la méthode pour se débarrasser des tiques et des poux diffère selon la communauté. Les chimpanzés d'Afrique de l'Est et de Gombe (tel celui qui est photographié ici) s'arrêtent par moments de toiletter un congénère pour toiletter des feuilles.



DET. • BIRCHALL • 1 • 2001 PATRICK

À Gombe, les chimpanzés posent les parasites qu'ils trouvent sur une pile de feuilles, puis les écrasent avec l'ongle du pouce avant de les manger. À Budongo, ils les mettent sur des feuilles pour les examiner avant de les manger ou de les jeter. Sur le site de Taï, ils n'utilisent pas de feuilles, mais placent les parasites sur leur avant-bras et les frappent à plusieurs reprises avec leur index pour les écraser. Toutes les communautés de chimpanzés d'Afrique de l'Est utilisent des feuilles lors de l'épouillage, ce qui suggère une origine commune à cette pratique.

que sur notre propre espèce. Nous sommes obligés de constater que la caractéristique qui semblait nous distinguer du monde animal, nos capacités culturelles, n'est plus si... caractéristique.

Pourtant, les coutumes et les traditions humaines, enrichies et véhiculées par le langage, sont beaucoup plus variées que celles que nous avons observées chez le chimpanzé. Nos connaissances nouvelles des comportements culturels des chimpanzés précisent la compréhension que nous avons de notre unicité, plutôt qu'elle ne la menace.

Au fil des générations, les civilisations humaines ont fait des progrès considérables en accumulant et en améliorant le savoir au fil des générations. Par exemple, le concept de marteau, d'abord un simple caillou, a été modifié et amélioré à plusieurs reprises jusqu'à aujourd'hui, où des marteaux robotisés à commande électronique fonctionnent dans les usines modernes. De même, les chimpanzés qui utilisaient des pierres comme enclumes ont progressé, à Bossou, en apprenant à les caler avec une autre pierre quand le sol n'est pas plan, mais ce comportement est peu répandu et semble bien rudimentaire à côté des progrès accomplis par l'homme.

Les capacités culturelles que nous partageons avec les chimpanzés indiquent aussi que la mentalité qui les sous-tend a une origine commune. Nos capacités ne sont pas apparues du jour au lendemain, mais ont évolué progressivement. Un apprentissage social semblable à celui des chimpanzés aurait probablement suffi pour véhiculer les cultures lithiques de nos ancêtres, qui vivaient il y a deux millions d'années.

On ignore encore si d'autres espèces ont des capacités culturelles proches de celles de l'homme. Les recherches n'ont pas encore été assez poussées pour le savoir, mais quelques indices semblent l'indiquer. Carel van Schaik et ses collègues de l'Université de Duke ont trouvé des orangs-outans à Sumatra qui ont l'habitude d'utiliser au moins deux types d'outils. On n'a jamais vu ce genre de comportement chez les orangs-outans observés pendant des années sur d'autres sites.

Hal Whitehead, de l'Université Dalhousie, et ses collègues commencent à décrire les comportements de certaines populations de baleines qui chantent en différents dialectes et

chassent également de diverses façons. Nous espérons que notre étude des cultures des chimpanzés servira de modèle pour l'étude de ces autres espèces.

Quelles sont les conséquences de nos recherches pour les chimpanzés eux-mêmes? Des populations entières de ces animaux sont en train de disparaître, alors que nous commençons tout juste à mieux les connaître. Depuis un siècle, leur nombre diminue de façon alarmante à cause du braconnage, de l'exploitation forestière, de la construction de routes dans la forêt et, plus récemment, du commerce de la «viande de brousse», c'est-à-dire de la viande d'animaux sauvages (dont celle de chimpanzé), consommée sur place ou exportée. Les animaux sont menacés et, avec eux, tous leurs fascinants comportements culturels.

La richesse culturelle des singes les sauvera peut-être. Des programmes de conservations ont déjà modifié l'attitude de certaines populations humaines locales. Quelques organisations ont commencé à montrer des cassettes vidéo présentant les prouesses cognitives des chimpanzés, et l'attitude de l'homme face au chimpanzé commence à évoluer.

Andrew WHITEN est professeur de psychologie de l'évolution à l'Université de Saint Andrews, en Écosse. Christophe BOESCH est codirecteur de l'Institut Max Planck d'anthropologie de l'évolution et professeur à l'Université de Leipzig.

William C. McGREW, *Chimpanzee Material Culture*, Cambridge University Press, 1992.

A. WHITEN, J. GOODALL, W. McGREW, T. NISHIDA, V. REYNOLDS, C. TUTIN, Y. SUGIYAMA, R.W. BRANGHAM et C. BOESCH, *Cultures in Chimpanzees*, in *Nature*, vol. 399, pp. 682-685, 1999.

Christophe BOESCH et Hedwige BOESCH-ASCHERMANN, *Chimpanzees of the Tai Forest : Behavioral Ecology and Evolution*, Oxford University Press, 2000.

Andrew WHITEN, *Primate Culture and Social Learning*, in *Cognitive Science*, Special issue on primate cognition, vol. 24, pp. 477-508, 2000.

Chimpanzee Cultures Web site: <http://chimp.st-and.ac.uk/cultures/WildChimpanzeeFoundationWeb> <http://www.wild-chimps.org>

Variations sur une grille

On observe d'énigmatiques effets d'extinction ou de scintillation en dehors du point de fixation du regard : le cerveau alterne entre des interprétations à faible et à forte résolution.

Dans l'illusion de la grille de Hermann, on distingue de petites taches grises aux intersections des allées blanches qui séparent les carrés noirs (1). Elles disparaissent au point de fixation du regard et reparaissent en périphérie du champ visuel. Les spécialistes de la perception ont repéré dans cette grille d'autres anomalies, moins flagrantes. Par exemple, le blanc des allées semble légèrement plus gris que celui qui borde l'image, et l'on voit parfois des lignes grises s'étendre au centre des allées. Le phénomène est plus fort – toujours en vision périphérique – là où les carrés portent des encoches. Quand on fait subir un quart de tour à la grille, on voit un réseau de lignes sombres, horizontales et verticales, traverser les carrés selon leurs diagonales. Tous ces phénomènes sont également observés en inversant le contraste (carrés blancs sur fond noir) ; les taches ou lignes illusoires présentent alors le contraste inverse de celui décrit plus haut. Ces phénomènes sont tenus pour révélateurs des mécanismes par lesquels les réseaux de neurones calculent le niveau de gris local, et le corrigent en fonction du contraste avec le pourtour.

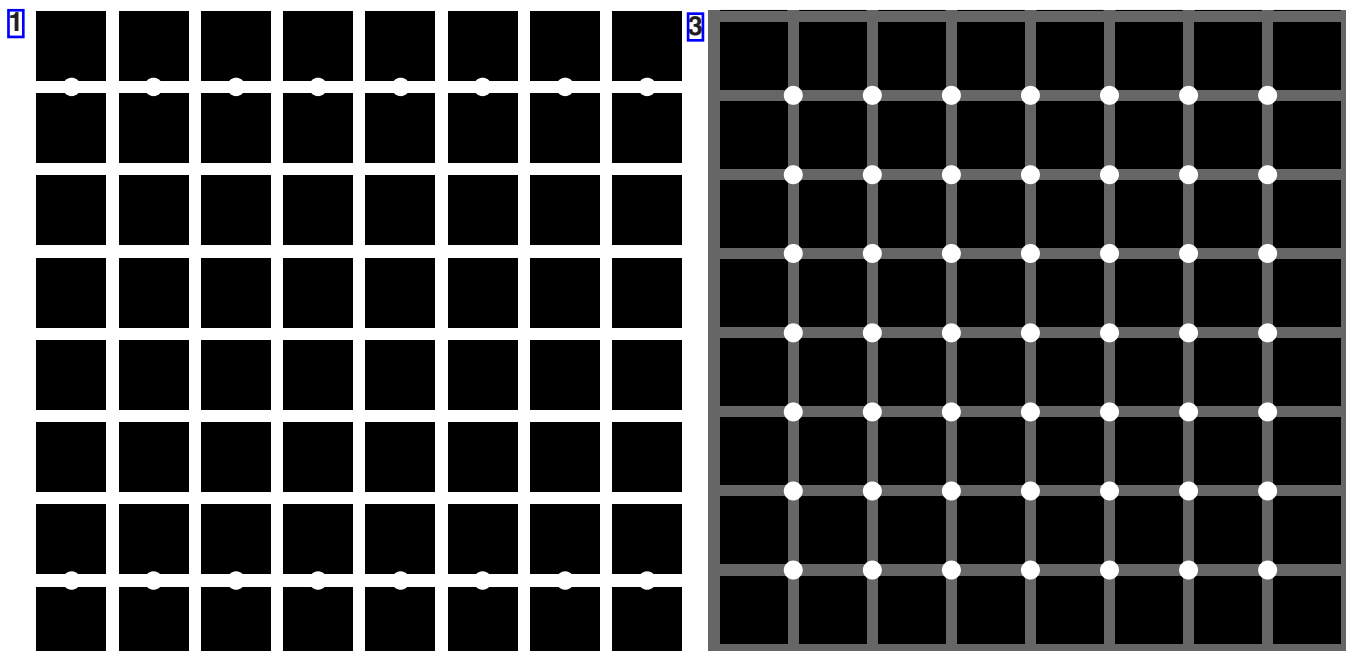
En faisant varier de manière systématique la géométrie de la grille de Hermann, de nouveaux effets se manifestent. En 1985, James Bergen, des Laboratoires RCA à Princeton, a observé une scintillation au croisement des allées, quand la grille est rendue floue (2). L'effet est spectaculaire sur écran, plus difficile à rendre sur papier. La scintillation se manifeste d'abord à l'occasion d'un saut du regard, d'un point à l'autre de l'image. Puis, avec l'habitude, on la voit sans mouvement volontaire. C'est comme si le cerveau oscillait entre deux estimations du niveau de gris aux intersections : l'estimation obtenue à forte résolution, quand on fixe une intersection, et qui la fait voir noire (pour l'image présentée ici), et celle, à faible résolution, de la vision périphérique, où les corrections de contraste local feraient apparaître du blanc, comme sur une grille de Hermann à carrés blancs sur fond noir.

Notons qu'en rendant floue la grille de Hermann, on a rendu grises les allées, et fait apparaître aux intersections des disques plus sombres que les allées. En supprimant le flou, et en réduisant à trois valeurs les niveaux de gris, Michael Schrauf, Bernd Lingelbach et Eugène Wist, de l'Uni-

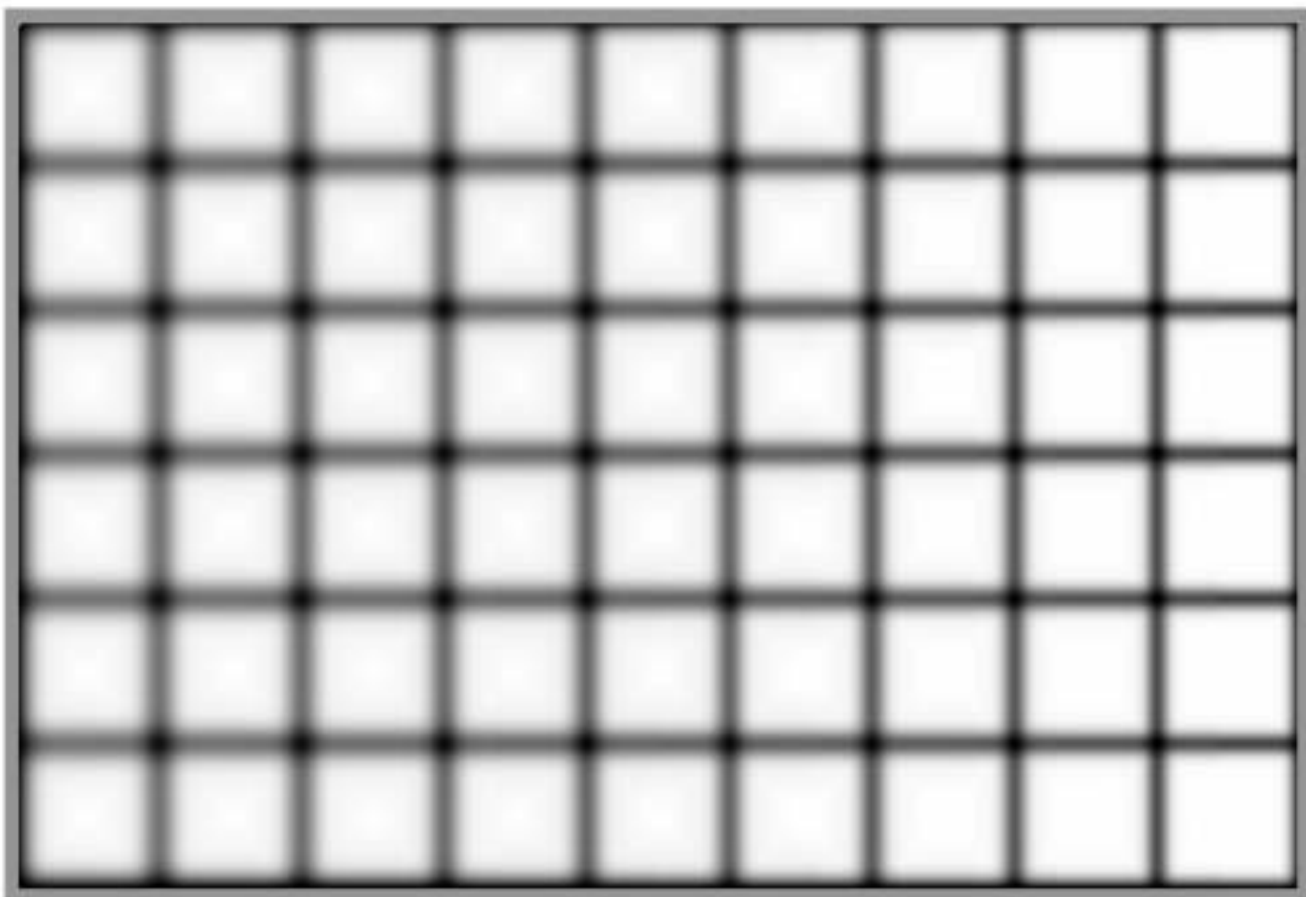
versité Heinrich Heine, à Düsseldorf, ont obtenu une grille de Hermann scintillante, moins spectaculaire, mais plus facile à réaliser que celle de Bergen (3). L'image a été reprise pour illustrer la difficulté d'interprétation des bulletins de vote de Floride! Prenant cette nouvelle grille pour point de départ et la faisant varier, nous avons mis en évidence avec Kent Stevens, de l'Université d'Oregon à Eugene, un nouvel effet, tout aussi spectaculaire que la scintillation, récemment publié dans la revue *Perception*. La modification essentielle est de cercler avec du blanc les disques noirs, et réduire leur taille. La plupart des disques disparaissent alors de la page. On voit quelques disques là où le regard se pose. Ailleurs, les allées paraissent continues et démunies de disques.

Ce phénomène de disparition – ou d'extinction – est encore plus fort quand les disques sont aux intersections d'un maillage triangulaire (4). L'illusion, dans cette figure, porte sur les grands disques, alors que les petits disques qui sont placés hors des intersections sont vus en totalité. L'illusion d'extinction serait un phénomène attentionnel. Le gris moyen d'un disque noir cerclé de blanc est peu différent de celui de son environnement, aux intersections de trois allées. Il se pourrait qu'à la périphérie du champ visuel, ne soient retenus comme significatifs que les accidents pour lesquels le contraste local dépasserait une certaine valeur. D'où la négligence vis-à-vis des grands disques et, en fin de compte, leur disparition.

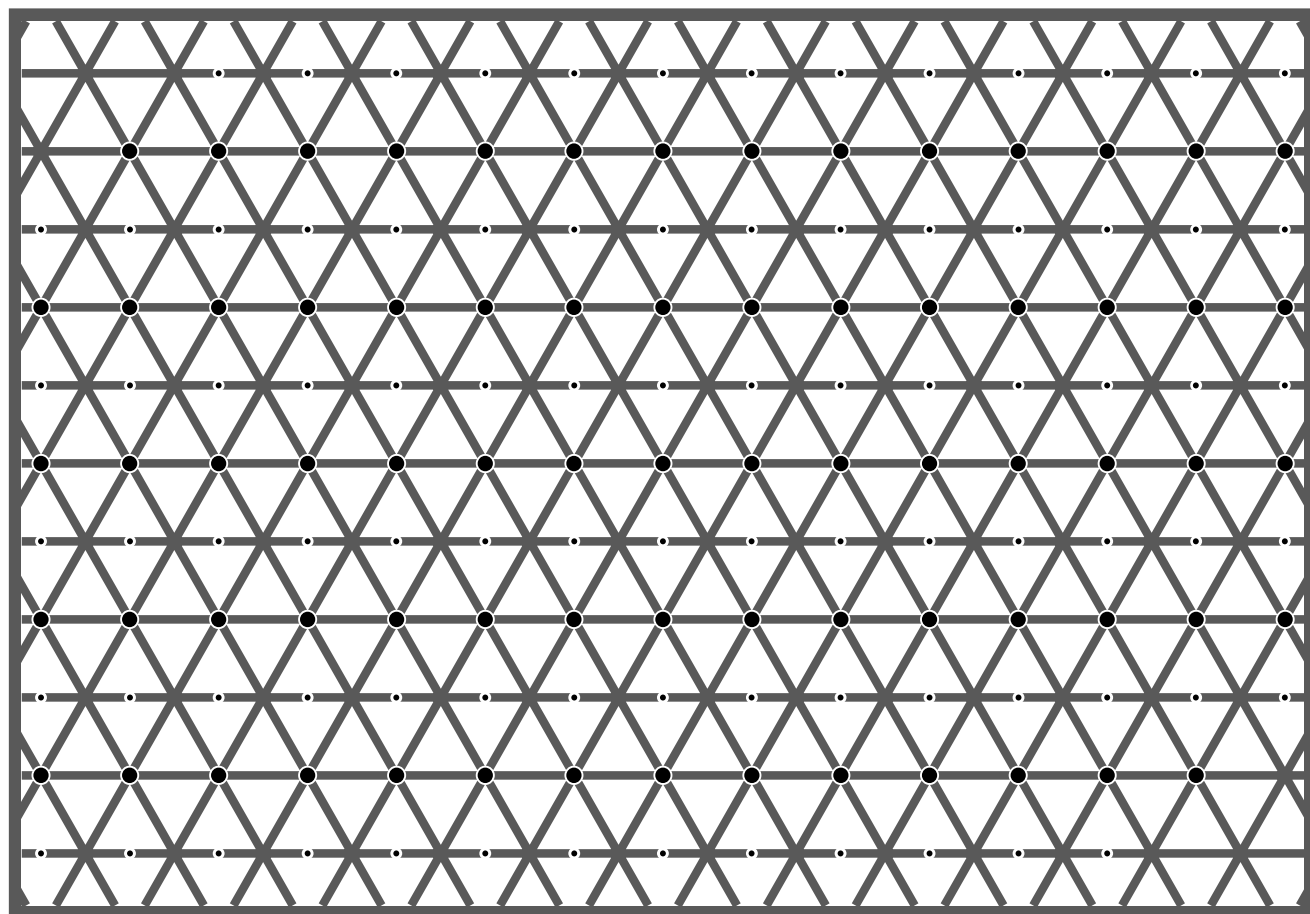
Jacques NINIO,
Laboratoire de physique statistique,
École normale supérieure



2



4



Le jeu des erreurs séduisantes

JEAN-PAUL DELAHAYE

De même qu'il y a de belles escroqueries, il y a aussi de magnifiques erreurs mathématiques : la beauté réside dans l'apparente vérité du faux.



L'art de bien raisonner et l'art de reconnaître les raisonnements fautifs sont deux facettes d'une même médaille : pour raisonner juste, il faut savoir identifier les erreurs et inversement. Certaines démonstrations erronées sont des pièges où on se laisse entraîner, à moins d'être particulièrement attentif ou averti.

Dans la rubrique du mois dernier, nous avons examiné des erreurs mathématiques commises par les meilleurs savants et montré que les mathématiciens, plus peut-être que les autres hommes de sciences, commettent d'énormes bourdes, aux conséquences ennuyeuses ou bénéfiques. L'abstraction, la variété, la complication et la longueur des argumentations mathématiques sont l'explication la plus simple de ce phénomène attesté par les volumineux errata des manuels de mathématiques.

Ce mois-ci, nous allons examiner une série de raisonnements pièges conduisant, par des cheminements d'une rigueur en apparence irréprochable, à d'évidentes absurdités. Les exemples que nous citerons ne proviennent pas d'études historiques, mais sont des pièges conçus dans des buts didactiques ou tout simplement des erreurs commises par des élèves.

SOPHISMES ANTIQUES

L'étude des raisonnements fautifs est antique : Aristote, dans son traité des Réfutations des arguments sophistiques conçut, le premier, l'art d'identifier et de démontrer les arguments erronés que les philosophes sophistes professaient pour ridiculiser leurs adversaires. Voici un exemple des raisonnements qu'analyse Aristote :

Est-ce que le malade qui est guéri se trouve en bonne santé? Oui? Donc le malade est en bonne santé!

Qu'est-ce qui cloche?

Solution : Aristote explique que l'absurdité vient d'une ambiguïté dans le sens

d'un mot. Le mot malade signifie, selon les contextes, personne qui est malade en ce moment (exemple : le malade souffre) ou personne qui a été malade (exemple : quand le traitement a fait son effet, le malade rentre chez lui). La conclusion du sophisme semble paradoxale, car on y utilise le mot malade pour désigner une personne malade (premier sens de malade), alors que, dans la question initiale, qui appelle un oui, c'est le second sens qui est utilisé.

Voici d'autres exemples de sophismes proposés par Aristote que je vous laisse décortiquer vous-même.

Est-ce qu'il faut décider en faveur de celui qui dit des choses justes ou des choses injustes? En faveur de celui qui dit des choses justes. Pourtant il est juste que celui qui a subi une injustice dise d'une manière complète ce dont il a souffert ; or il a souffert de choses injustes. Il nous faut donc décider en faveur de celui qui dit des choses injustes.

Et encore : Si le non-être est objet d'opinion, le non-être est.

La classification des erreurs proposée par Aristote expose l'art de la déduction et la manière de ridiculiser un adversaire en l'amenant à se contredire, ce qui est utile dans les débats politiques. Il s'agit toutefois essentiellement de jeux linguistiques, le plus souvent élémentaires. Dès qu'on entre dans le domaine mathématique, des pièges de natures bien différentes surgissent.

EVIDENT... MAIS FAUX

Parfois les pièges mentaux sont si simples qu'un petit effort permet à chacun de se corriger. Les exemples suivants, destinés aux enfants, sont dus à E. Northrop.

Une horloge sonne 6 heures en 5 secondes. Combien de temps lui faut-il pour sonner midi?

Non, la réponse n'est pas 10 secondes. Une bouteille et son bouchon coûtent

ensemble 110 F. La bouteille coûte 100 F de plus que le bouchon. Combien coûte la bouteille?

Non, la réponse n'est pas 100 F. Une grenouille est au fond d'un puits de 30 mètres. En une heure, elle gravit 3 mètres, puis glisse de 2 mètres. Combien d'heures lui faut-il pour sortir?

Non, la réponse n'est pas 30 heures. Un TGV part de Paris pour Orléans en même temps qu'un omnibus part d'Orléans pour Paris. Le TGV roule à 250 km à l'heure, l'omnibus roule à 120 km à l'heure. Lequel sera le plus loin de Paris quand ils se croiseront?

Non, la réponse n'est pas le TGV. L'exemple suivant est très classique, mais n'a pas piégé que des enfants : Le père de Toto a trois fils : Pim, Pam et ...? Non, la réponse n'est pas Poup.

RETOUR VERS LE PASSÉ

Dans le numéro de l'été 1997 d'Adobe Magazine, Apple faisait la publicité pour son ordinateur Power Mac en indiquant : En fait, Adobe Photoshop fonctionne 50 pour cent plus rapidement avec un Power Mac. Cela se traduit par un gain de 50 pour cent sur le temps que vous passez devant votre écran à attendre que votre machine retouche les photos, transforme les images ou applique des filtres.

Fonctionner 50 pour cent plus rapidement signifie que, pendant un temps donné, par exemple 10 secondes, le Power Mac traitera 50 pour cent de segments ou de surface d'image en plus que le modèle d'ordinateur précédent. Si ce que dit la publicité est vrai, alors se pose le problème suivant : avec un

1. Dans son autoportrait, Chagall, pour attirer l'attention, dessine plusieurs doigts à ses mains. L'erreur, voulue, illustre l'habileté du peintre polydactyle. En mathématiques, les erreurs ne sont pas destinées à attirer l'attention sur les qualités du mathématicien.

2. CLASSIFICATION DES ERREURS

Tout le monde commet des erreurs, et tout auteur de livre de mathématiques est étonné quand, malgré le soin qu'il prend à relire les épreuves, il découvre, quelques mois après la parution, une multitude d'imperfections dans les exemplaires mis en vente. Les longs *errata* étonnent les non-mathématiciens et ont parfois donné l'impression que les auteurs des livres de mathématiques ne sont pas sérieux ! La difficulté d'écrire un texte mathématique sans erreur provient de ce que celles-ci peuvent être de natures très différentes et qu'en effectuant une relecture il est impossible de penser simultanément à tout. Outre les fautes de « typo », d'orthographe et de grammaire qui sévissent en mathématiques comme partout, un document de mathématiques peut contenir une grande variété d'erreurs de gravité variée. Par ordre, de gravité voici quelques erreurs typiques.

– L'erreur d'inattention faite au dernier moment, qui conduit à écrire une formule fausse ou un énoncé faux, car on recopie mal son brouillon (qui, lui, était correct) : avec un peu de chance le lecteur attentif « rectifiera de lui-même ». Dès qu'on s'en aperçoit, l'erreur peut être corrigée.

– Plus ennuyeuse, l'erreur vraie de calcul ou de raisonnement conduit à une affirmation fausse dont on n'utilise qu'une partie, elle, vérifiée. Par exemple, on sait que $x \leq 0$ et l'on démontre que $A = 2x$, ce qu'on utilise ensuite pour conclure que $A \leq 0$. Le calcul exact devait conduire à $A = x$ qui, lui aussi, a pour conséquence que $A \leq 0$; l'erreur s'est effacée d'elle-même et n'a pas laissé de trace. Un célèbre cas de deux erreurs s'annulant l'une l'autre est dû à l'astronome anglais Edmond Halley lorsqu'il calcula l'orbite de la comète de 1682 qui porte son nom. Sa double erreur fut notée lorsque Alexis Clairaut, Joseph Lalande et Nicole Lepaute reprirent ses calculs en 1757 pour obtenir une plus grande précision (ce qui leur permit finalement de prédire le retour de la comète avec une exactitude prouvant que la mécanique newtonienne « voit l'avenir » et que la loi d'attraction universelle en $1/r^2$ ne nécessite pas de terme correcteur).

– Plus grave est l'erreur provenant d'un oubli qui conduit à une démonstration trouée : un cas n'a pas été traité. S'il l'avait été, on aurait pu conclure comme dans les autres cas, et donc l'oubli est à nouveau sans gravité. Le raisonnement est faux, mais se complète sans trop de mal. Bien sûr, le mathématicien qui commet souvent cette faute risque un jour de laisser un trou qui ne se rebouchera pas !

– Plus grave encore est l'erreur réparable, mais qui demande un effort important pour être effacée. C'est ce type d'erreur que commit Andrew Wiles quand il proposa sa première démonstration du théorème de Fermat en 1993 (annoncée en première page du *New York Times* du 24 juin). L'effort pour réparer exigera plus d'un an de travail et la participation de certains des collègues de Wiles. Dans le film réalisé par Simon Singh sur cette démonstration, on voit Wiles sur le point de pleurer à l'évocation de la pénible période d'incertitude qu'il vécut à la recherche du contournement de son erreur.

– Une autre catégorie d'erreurs plus graves est celle qui conduit à un énoncé irrémédiablement faux, mais qu'on peut modifier un peu pour en tirer un énoncé vrai. C'est ce type d'erreur qui fut commis par Cauchy quand il crut que toute limite de fonctions continues est continue. Ce type d'erreur est généralement très instructif, car il permet d'isoler une condition oubliée qui n'allait pas de soi et qui parfois fait découvrir un concept important.

– Le dernier cas d'erreur est bien sûr celui qui met tout définitivement par terre, sans qu'aucune leçon puisse en être tirée.

baisse de 33,33 pour cent (qui fait passer de 150 à 100). La publicité aurait dû dire que le temps économisé était de 33,33 pour cent. Avec un ordinateur procurant un gain de 150 pour cent, le gain est 60 pour cent, et non pas un voyage dans le temps passé.

Une erreur analogue à celle d'Apple a été commise dans les années 1990 par *France Télécom*, qui utilisait un slogan stupide : « Après 18 heures, le téléphone est 30 pour cent moins cher, soit 30 pour cent de temps en plus. » Ce slogan était pourtant moins favorable que la réalité, car si, après 18h, le téléphone est 30 pour cent moins cher, alors le temps en plus est de 42,8 pour cent (ce qui vous coûtait 100 F vous coûte maintenant 70 F, et donc, si vous utilisez les 30 F gagnés pour prolonger votre coup de téléphone, vous disposez d'une durée supplémentaire de 30/70 de votre coup de téléphone initial, soit 42,85 pour cent). Reconnaissons toutefois que le slogan juste aurait été incongru et incompréhensible pour la majorité des gens.

Venons-en maintenant à des erreurs de raisonnement faites dans le cours d'une démonstration, si possible brève.

EXISTENCE DANGEREUSE

Théorème : 1 est le plus grand entier.

Démonstration. Soit A le plus grand entier. Pour tout entier A supérieur à 1, le carré (entier) A^2 de cet entier A, est plus grand que A, donc A n'est pas le plus grand entier. Sauf si A est égal à 1, le carré de 1 étant égal à 1. Donc 1 est le plus grand entier.

Où est l'erreur ?

Solution : Supposer l'existence d'objets qui n'existent pas conduit à la catastrophe, et c'est ce qu'illustre l'exemple. Dans le raisonnement, nous faisons l'hypothèse qu'il existe un plus grand entier, ce qui est faux. Puisque, à part cela, le raisonnement est entièrement correct et aboutit à une contradiction, il montre rigoureusement qu'il n'existe pas de plus grand entier.

MAIS QU'AI-JE FAIT D'INTERDIT ?

Considérons l'équation :

$$(x + 5)/(x - 7) - 5 = (4x - 40)/(13 - x).$$

Elle peut s'écrire :

$$[x + 5 - 5(x - 7)]/(x - 7) = (4x - 40)/(13 - x),$$

ou encore :

$$(4x - 40)/(7 - x) = (4x - 40)/(13 - x).$$

Les numérateurs étant égaux, les dénominateurs le sont aussi : donc $7 - x$ est égal à $13 - x$, et donc $7 = 13$.

Où est l'erreur ?

Solution : Le piège est subtil. L'affirmation : « les numérateurs étant égaux,

ordinateur procurant un gain de 150 pour cent (ce qui est largement atteint par les machines actuelles), est-ce que vous gagnez 150 pour cent du temps ? Auquel cas, lorsque vous utilisez votre ordinateur, vous retournez dans le passé !

Où est l'erreur du texte publicitaire ?
Solution : Il s'agit là d'un piège classique dans lequel tout le monde tombe un jour : une hausse de X pour cent n'est pas l'inverse d'une baisse de X pour cent et réciproquement. Cette erreur est à rapprocher de celle, tout aussi courante, qui

consiste à croire qu'une hausse de Y pour cent suivie d'une hausse de Z pour cent est équivalente à une hausse de $(Y + Z)$ pour cent.

En réalité, une hausse de X pour cent fait passer de A à $A(1 + X/100)$ et donc, pour la compenser, il faut passer de $A(1 + X/100)$ à A, ce qui correspond à une multiplication par $1/(1 + X/100)$ et non pas à une multiplication par $(1 - X/100)$. Dans notre exemple, une hausse de 50 pour cent (qui fait passer de 100 à 150) est compensée par une

les dénominateurs le sont aussi» n'est vraie que si les numérateurs ne sont pas nuls : par exemple, $0/12 = 0/7$, et 12 n'est pas égal à 7!

Dans notre exemple, $4x - 40$ est nul, car x n'est pas n'importe quel nombre, mais la solution de l'équation de départ, qui justement est 10, ce que l'on vérifie par les calculs suivants.

L'équation de départ donne :

$(13 - x)(4x - 40) = (7 - x)(4x - 40)$, ce qui, après regroupement dans le premier membre, conduit à $24(x - 10) = 0$, c'est-à-dire $x = 10$.

PLUS QUE LUI-MÊME?

Prouvons que tout nombre est plus grand que lui-même! Soit a et b deux nombres positifs tels que : $a > b$.

On multiplie les deux nombres par b : $ab > b^2$, on soustrait a^2 de chaque côté et l'on factorise : $a(b-a) > (b-a)(b+a)$.

On divise maintenant par $(b-a)$, qui n'est pas nul, et l'on obtient : $a > b+a$. Puisque b est positif, a est donc plus grand que lui-même et même plus grand que tout nombre plus grand que lui-même. Où est l'erreur?

Solution : Simplement dans le fait (à ne jamais oublier) que, lorsqu'on multiplie ou divise les deux membres d'une inégalité, celle-ci n'est préservée que si ce par quoi on multiplie ou divise est positif. Si ce par quoi on multiplie ou divise est négatif, l'inégalité est inversée. Ici, en divisant par $(b-a)$, qui est négatif, on obtient : $a < b+a$, ce qui n'est nullement paradoxal.

TROIS FOIS RIEN

L'exemple suivant est encore élémentaire, mais, à la fin d'un cours, il ne manquera pas de faire son petit effet.

On démontre que $1+2+3+\dots+n = n(n+1)/2$ par la méthode que l'on veut (par exemple en écrivant $1+2+3+\dots+n$, et juste en dessous $n+ \dots+3+2+1$).

L'égalité étant vraie pour tout n , écrivons-la pour $n-1$:

$$1 + 2 + 3 + \dots + (n-1) = (n-1) n/2.$$

Ajoutons 1 de chaque côté de cette égalité :

$$1 + 2 + 3 + \dots + (n-1) + 1 = (n-1) n/2 + 1.$$

Arrangeons tout cela en sachant que $(n-1) + 1 = 0n$ on obtient :

$$1 + 2 + 3 + \dots + n = (n-1) n/2 + 1.$$

On a donc : $n(n+1)/2 = (n-1) n/2 + 1$ ce qui donne : $n^2 + n = n^2 - n + 2$, et finalement $n=1$. Tout entier est égal à 1!

Que doivent vous dire les élèves endormis que la conclusion étrange a peut-être sortis de leur torpeur?

Solution : Si $(n-1) + 1 = n$ est vrai, il n'est pas exact que $1 + 2 + 3 + \dots + (n-1) + 1 = 1 + 2 + 3 + \dots + n$, car, l'avant-dernier

3. LES PAGES D'ERRATA DES LIVRES DE MATHÉMATIQUES

Les livres de mathématiques ont une particularité remarquable : ils sont bourrés de fautes. Les auteurs consciencieux collectent les erreurs que leur signalent les lecteurs et publient alors des «errata» qui sont parfois étonnants.

Chaque chapitre du traité général de mathématiques de Bourbaki était lu et relu par les membres du collectif qui se cachait sous le nom de Bourbaki (voir *Bourbaki*, par Maurice Mashaal, collection *Les génies de la science*). Après un tel passage au crible, on s'attend à ce qu'aucune erreur ne subsiste. Les fascicules d'*errata* publiés par le vrai-faux Général Bourbaki montrent que c'est loin d'être le cas. On a reproduit ci-dessous les premières pages du fascicule d'*errata* numéro 13 (il y en a donc déjà eu 12 auparavant!), qui comporte 7 pages.

Aujourd'hui l'Internet rend le travail plus simple. Outre qu'il permet à l'auteur d'être rapidement informé de ses erreurs par courrier électronique, il permet aussi la publication de volumineux textes d'*errata* qu'aucun éditeur n'aurait accepté d'imprimer, de peur d'y perdre tout crédit. À titre d'exemple, les *errata* de l'*Encyclopédie concise des mathématiques* d'Éric Weisstein (*Concise Encyclopedia of Mathematics*, CRC Press, 1999) comportent 69 pages bien serrées (on n'ose pas penser ce qu'auraient été les errata si l'*Encyclopédie* n'avait pas été «concise»). Son adresse est : www.treasure-troves.com/buy/math/book/errata/

Donald Knuth, le mathématicien créateur du traitement de texte *Tex* (utilisé par la communauté mathématique) et auteur du *Traité de référence sur les mathématiques de la programmation* (*The Art of Computer Programming*) a lui aussi mis à la disposition des lecteurs une série de fascicules d'*errata* qui comportent 80 pages pour le volume 1, 142 pages pour le volume 2, 109 pour le volume 3. Adresse internet : www-cs-faculty.stanford.edu/~knuth/taocp.html

Bon joueur, D. Knuth offre 2,56 dollars pour chaque nouvelle erreur qu'on lui signalera. (Il n'explique pas pourquoi 2,56, mais, n'en doutons pas cela résulte d'un savant calcul – exact espérons-le – rattaché à ses droits d'auteur).



Théorie des ensembles

CHAPITRE III

Ensembles ordonnés. Cardinaux. Nombres entiers

ÉLÉMENTS DE MATHÉMATIQUE, FASCICULE XX TROISIÈME ÉDITION

- P. 40, ligne 9 du haut, au lieu de : $r \in E$, lire : $r \in E$.
P. 77, ligne 15 du haut, au lieu de : $(E_n)_{n \in \mathbb{N}}$, lire : $(E_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Ligne 3 du bas, au lieu de : *ordonné*, lire : *préordonné*.
P. 82, ligne 9 du haut, au lieu de : de E_n dans E_2 , lire : de F_n dans F_2 .
P. 83, ligne 6 du haut, au lieu de : prop. 2, lire : prop. 1. Ligne 15 du bas, au lieu de : $\lambda \geq \mu$, lire : $\lambda \leq \mu$.
P. 86, ligne 13 du haut, au lieu de (ii), lire (ii').
P. 90, ligne 6 du haut, au lieu de : $f_{\alpha\beta}(u)$, lire : $f_{\beta\alpha}(u)$.
P. 95, ligne 7 du haut, au lieu de : $f_{\beta\alpha}(u_\alpha(x_\alpha))$, lire : $f_{\beta\alpha}(u_\alpha(x_\alpha))$. Ligne 8 du haut, au lieu de : $u_\alpha(f_{\beta\alpha}(x_\alpha))$, lire : $u_\beta(f_{\beta\alpha}(x_\alpha))$.
P. 96, ligne 8 du bas, au lieu de : $\lim_{\alpha} E_n^1$, lire : $\lim_{\alpha} E_n^1$. Ligne 1 du bas, au lieu de F_n^1 , lire F_n^1 .
P. 97, ligne 14 du haut, au lieu de g^n , lire g_n^1 (deux fois). Ligne 5 du bas, au lieu de : $\lim_{\alpha} (\lim_{\beta} u_\alpha^1)$, lire : $\lim_{\alpha} (\lim_{\beta} u_\alpha^1)$.
P. 103, ligne 14 du bas, au lieu de A, lire X; au lieu de B, lire Y.

terme (non écrit) à gauche est $n-2$, alors qu'à droite c'est $n-1$. Les trois petits points, selon les contextes, ne désignent pas la même chose.

PEUT-ON ÉCRIRE $\sqrt{-1}$?

Les nombres complexes sont définis à partir de l'idée que -1 possède une racine carrée que l'on considère comme un nombre nouveau et que l'on note souvent par la lettre i . Par définition, $i^2 = -1$. Pour plus de commodité on peut noter ce nombre supplémentaire par $\sqrt{-1}$.

On obtient alors de drôles de choses, comme cette suite d'égalités :

$$\begin{aligned} -1 &= \sqrt{-1} \sqrt{-1} = \sqrt{(-1) \cdot (-1)} = \sqrt{1} = 1, \\ \text{ou ce raisonnement :} \\ \sqrt{-1} &= \sqrt{-1}, \text{ donc } \sqrt{1/(-1)} = \sqrt{(-1)/(1)}, \text{ donc} \\ \sqrt{1x/1} &= \sqrt{-1x/-1}, \text{ donc } 1 = -1. \end{aligned}$$

Comment expliquer cela? Les nombres complexes sont-ils contradictoires, et les mathématiciens qui les utilisent sont-ils nécessairement conduits à écrire des choses absurdes?

Solution : Les nombres complexes ne sont pas plus contradictoires que les nombres réels (cela se démontre en faisant la

construction des premiers à partir des seconds). L'explication des contradictions obtenues tient en quelques mots :

– la formule $\sqrt{a \times b} = \sqrt{a \cdot b}$ est vraie si a et b sont des nombres positifs, mais personne n'a jamais dit qu'elle était vraie pour tout nombre complexe a et b . L'erreur provient donc de l'utilisation d'une formule que personne ne démontre jamais.

Essayons d'approfondir un peu l'explication. Rappelons d'abord que :

– tout nombre réel positif possède deux racines carrées, de même que tout nombre complexe non nul.

– la notation $\sqrt{a}$, lorsque a est un nombre réel positif, désigne la racine carrée positive de a , l'autre racine étant $-\sqrt{a}$, et c'est seulement lorsque a est un nombre réel positif qu'on utilise la notation $\sqrt{a}$.

Lorsqu'on passe aux nombres complexes, la difficulté pour étendre la notation est qu'il n'est pas facile de choisir une fois pour toutes l'une des deux racines de a et de lui attribuer la notation $\sqrt{a}$. En fait, il n'existe aucune façon de choisir une convention qui permette de maintenir la formule $\sqrt{a \times b} = \sqrt{ab}$. S'il existait une telle convention, on aurait justement : $-1 = \sqrt{-1} \times \sqrt{-1} = \sqrt{(-1) \times (-1)} = \sqrt{1} = 1$, ce qui est absurde.

Notre petit jeu a au moins une utilité : correctement interprété, il établit qu'il est impossible de définir $\sqrt{a}$ pour tout nombre complexe de manière à préserver la formule $\sqrt{a \times b} = \sqrt{ab}$, ce qui n'est pas un résultat si évident que cela. La démonstration absurde une fois

remise sur ses pieds fournit une démonstration intéressante. Comme il est difficile de se discipliner pour ne pas utiliser $\sqrt{a \times b} = \sqrt{ab}$ pour les nombres négatifs et les nombres complexes, il est préférable d'éviter totalement l'utilisation de la notation $\sqrt{a}$ en dehors des nombres réels positifs.

LE MONDE MATHÉMATIQUE EST IMMOBILE

Le principe de récurrence, l'un des outils les plus puissants du raisonnement arithmétique, consiste, pour établir une propriété générale du type «pour tout n , $P(n)$ », à montrer que :

(i) $P(0)$ est vrai

(ii) si $P(n)$ est vrai, pour $n = 0, 1, \dots, k$,

alors $P(k+1)$.

Une variante consiste à remplacer (ii) par :

(iii) si $P(n)$ est vrai pour $n = k$, alors

$P(k+1)$.

Malheureusement, l'intuition est un peu perdue dans la récurrence, aussi de nombreuses erreurs sont-elles possibles. Voici quelques exemples de faux raisonnements par récurrence, dont le premier est dû à Alex Kuperman.

Nous allons démontrer qu'en mathématiques rien ne bouge ; plus précisément, nous établirons que toutes les fonctions x^n sont des fonctions constantes.

(i) C'est vrai pour $n = 0$, car $x^0 = 1$.

(ii) Supposons que c'est vrai pour $n = 0, 1, \dots, k$, c'est-à-dire que la dérivée de x^n est nulle : $(x^n)' = 0$ pour $n = 0, 1, \dots, k$. Utilisons maintenant la formule de déri-

vation d'un produit $(uv)' = u'v + uv'$. On a : $(x^{k+1})' = (x \cdot x^k)' = x' \cdot x^k + x \cdot (x^k)'$. On obtient 0, car $x' = (x^1)' = (x^k)' = 0$ d'après l'hypothèse de récurrence. Nous avons donc $(x^{k+1})' = 0$, ce que nous souhaitons.

Qu'est-ce qui cloche ?

Solution : Lorsque $k = 0$ on a l'hypothèse que $(x^0)' = 0$ et non pas, comme le raisonnement l'utilise, que $(x^0)' = (x^1)' = 0$. Le passage de k à $k+1$ ne marche donc pas pour aller de 0 à 1. La confusion provient de la notation $n = 0, 1, 2, \dots, k$, qui laisse croire qu'à chaque étape on a au moins $P(0)$ et $P(1)$ vrais, alors qu'en fait lorsque $k = 0$, on a seulement $P(0)$.

EN MATHÉMATIQUES, TOUT S'ANNULE

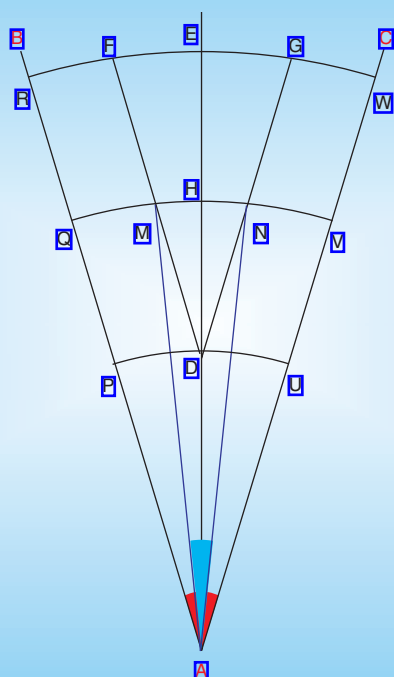
Voici un autre raisonnement faux (mais intéressant!) dû à Richard Johnsonbaugh. *Nous allons établir que tous les entiers sont nuls. Démontrons d'abord par récurrence, que si deux entiers positifs ou nuls, a et b , ont un maximum inférieur ou égal à n , alors ils sont égaux. C'est vrai pour les deux entiers a et b si leur maximum est inférieur ou égal à 0, car alors nécessairement $a = 0$ et $b = 0$. Supposons que la propriété soit vraie pour tout couple d'entiers a et b dont le maximum est inférieur ou égal à k et montrons que c'est vrai pour $k+1$. Soit a et b deux entiers positifs ou nuls dont le maximum est inférieur ou égal à $k+1$. Le maximum de $a-1$ et $b-1$ est inférieur ou égal à k , donc l'hypothèse de récurrence s'applique, donnant $a-1 =$*

4. LA TRISECTION DE L'ANGLE

En 1837, Pierre-Laurent Wantzel, répétiteur à l'École polytechnique publiait un mémoire où il démontrait que la trisection de l'angle était impossible en général. Il réglait en même temps le problème de la duplication du cube (tracer à la règle et au compas un segment de longueur $\sqrt[3]{2}$ [racine cubique de 2]), mais laissait non résolu le problème de la quadrature du cercle (construire à la règle et au compas un segment de longueur $\sqrt{\pi}$), construction dont on ne démontra l'impossibilité que 45 années plus tard.

Le problème de la trisection de l'angle, vieux de plus de deux mille ans, consiste à se donner un angle quelconque et à dessiner un angle trois fois plus petit, en n'utilisant que des constructions faites avec une règle et un compas. Une solution de Tom Cunniffham semble contredire le résultat de Wantzel.

Soit l'angle BAC à trisquer. En prenant pour centre A, on construit des arcs



de cercle de rayons 2, 3 et 4 unités qui donnent les points P, U, Q, V, R, W. Traçons D, E, F et G, les milieux des arcs PU, RW, RE et EW (c'est faisable à la règle et au compas). Soit M et N les intersections respectives des segments FD et GD avec l'arc QV. L'angle MAN trisèque l'angle BAC.

En effet, puisque par construction $\text{arc}(RW) = 2 \text{ arc}(PU)$, on déduit que $\text{arc}(PD) = \text{arc}(RF)$, et donc que FD est parallèle à RP, d'où il suit que $\text{arc}(QM) = \text{arc}(RF)$. De même $\text{arc}(NV) = \text{arc}(GW) = \text{arc}(RF)$. Puisque par construction $3 \text{ arc}(RW) = 4 \text{ arc}(QV)$ et que $4 \text{ arc}(RF) = \text{arc}(RW)$, on a $\text{arc}(QV) = 3 \text{ arc}(RF)$. QV est triséqué par M et N. Wantzel s'est-il trompé ?

Solution. Non. La longueur des deux arcs $\text{arc}(PD)$ et $\text{arc}(RF)$ est bien la même, mais cela ne signifie pas que FD est parallèle à RP, car les cercles supports n'ont pas le même rayon.

$b - 1$, d'où l'on déduit que $a = b$, ce que nous souhaitons.

Maintenant, soit un entier positif ou nul quelconque b . Soit n le maximum de 0 et b (bien sûr $n = b$). Le raisonnement précédent a montré que 0 et b étaient égaux, donc $b = 0$. En conclusion, tous les entiers positifs ou nuls sont nuls.

Si tel était le cas, là aussi les entiers seraient majorés par 0! Où est l'erreur? Solution : Simplement dans le fait que, même si a et b sont des entiers positifs ou nuls, $a - 1$ et $b - 1$ ne le sont pas nécessairement (car $0 - 1 = -1$). On ne peut donc pas appliquer l'hypothèse de récurrence au couple $a - 1, b - 1$.

DÉSOLANTES DÉRIVÉES

Calculons la dérivée de x^3 de deux façons différentes :

(a) Par la formule habituelle $(x^n)' = nx^{n-1}$. Pour tout x , on a donc $(x^3)' = 3x^2$

(b) Par le raisonnement suivant. Pour x entier, on écrit :

$x^3 = x^2 + x^2 + x^2 + \dots + x^2$ (la somme comporte x fois le terme x^2)

On dérive de chaque côté :

$(x^3)' = (x^2)' + (x^2)' + (x^2)' + \dots + (x^2)'$ (la dérivée d'une somme est la somme des dérivées).

$(x^3)' = 2x + 2x + 2x + \dots + 2x$ (application de la formule générale rappelée plus haut).

$(x^3)' = 2x^2$ (car, sur la ligne précédente il y a x fois le terme $2x$, ce qui permet de remplacer le second membre par $2x^2$).

Pour tout x entier, on a donc :

$(x^3)' = 3x^2 = 2x^2$.

En prenant pour x un entier non nul et en simplifiant par x^2 , on a : $2 = 3$.

Où est l'erreur?

Solution : Le raisonnement (b) suppose que x est entier (sinon, on ne pourrait pas écrire : $x^3 = x^2 + x^2 + x^2 + \dots + x^2$). Appelons n l'entier auquel on s'intéresse.

Les fonctions $x \rightarrow x^3$ et $x \rightarrow x^2 + x^2 + x^2 + \dots + x^2$ (n fois le terme x^2) ont effectivement la même valeur au point $x = n$, et cette valeur est n^3 . Mais, autour de la valeur n , ces deux fonctions n'ont plus les mêmes valeurs, car : $(n+\epsilon)^3 \neq (n+\epsilon)^2 + (n+\epsilon)^2 + \dots + (n+\epsilon)^2 = n(n+\epsilon)^2$. Puisque les deux fonctions sont différentes, il est sans surprise que leur dérivée le soit.

L'endroit où se produit l'erreur est lorsqu'on écrit «on dérive de chaque côté» car, l'égalité $x^3 = x^2 + x^2 + x^2 + \dots + x^2$ désigne une égalité valable entre deux fonctions différentes en un point précis, et non pas une égalité entre deux fonctions sur tout leur ensemble de définition. L'erreur est en fait la même que celle qu'on commettrait en disant :

$\sin 45^\circ = \cos 45^\circ = \sqrt{2}/2$, et donc que $(\sin 45^\circ)' = (\cos 45^\circ)'$, ce qui est absurde car en utilisant que $\sin x' = \cos x$ et que $\cos x' = -\sin x$, on en déduirait que $\cos 45^\circ = -\sin 45^\circ$, soit $\sqrt{2}/2 = -\sqrt{2}/2$.

5. LA PLUS BELLE PROPRIÉTÉ DE π

L'importance mathématique du nombre π n'est plus à démontrer. Pourtant la propriété suivante de π ne manquera pas de vous étonner : toute série converge vers π .

En effet, soit une série quelconque (par prudence, vous pouvez considérer une série absolument convergente) :

$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + \dots$

Les égalités (finies) suivantes sont immédiates :

$a_1 = \pi + (a_1 - \pi)$

$a_2 = -(a_1 - \pi) + (a_1 + a_2 - \pi)$

$a_3 = -(a_1 + a_2 - \pi) + (a_1 + a_2 + a_3 - \pi)$

$a_4 = -(a_1 + a_2 + a_3 - \pi) + (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 - \pi)$. Etc.

En ajoutant toutes ces égalités, nous obtenons :

$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + \dots = \pi + (a_1 - \pi) - (a_1 - \pi) + (a_1 + a_2 - \pi) - (a_1 + a_2 - \pi) + (a_1 + a_2 + a_3 - \pi) - (a_1 + a_2 + a_3 - \pi) + (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 - \pi) - \dots$

Toutes les parenthèses se simplifient deux à deux et disparaissent. Donc :

$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + \dots = \pi$.

Pensez-vous vraiment que cela soit normal?

Solution

Non, bien sûr, et d'ailleurs le même raisonnement, s'il était juste, s'appliquerait à n'importe quelle constante. Le raisonnement est faux, car l'expression obtenue au second membre après l'addition infinie est une série qui n'est pas même convergente (ni les parenthèses, ni leurs composants ne tendent vers zéro en général). Or avec une série de nombres réels qui n'est pas convergente, toute manipulation, même les simplifications les plus simples, est dangereuse et susceptible de nous entraîner dans l'absurde. Si vous en doutez, considérez l'exemple classique suivant :

$1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + \dots = (1 - 1) + (1 - 1) + (1 - 1) + (1 - 1) + (1 - 1) + \dots = 0$
 $1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + \dots = 1 + (-1 + 1) + (-1 + 1) + (-1 + 1) + \dots = 1$

SOMMES INFINIES

En analyse, on démontre que la série :

$\ln(2) = 1 - 1/2 + 1/3 - 1/4 + 1/5 - 1/6 + \dots$ est une série convergente, c'est-à-dire qu'en prenant 1, puis 2, puis 3, ... termes de la série, on obtient des nombres qui s'approchent de plus en plus d'une constante, qui est ici le logarithme népérien de 2 : $\ln 2 = 0,6931\dots$

Groupons les termes positifs d'une part et les termes négatifs de l'autre :

$\ln 2 = (1 + 1/3 + 1/5 + \dots) - (1/2 + 1/4 + 1/6 + \dots)$.

Par ailleurs nous avons certainement :

$0 = (1/2 + 1/4 + 1/6 + \dots) - (1/2 + 1/4 + 1/6 + \dots)$.

ce qui, en ajoutant membre à membre avec l'égalité au-dessus, donne :

$\ln 2 \stackrel{!}{=} (1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5 + 1/6 + \dots) - 2(1/2 + 1/4 + 1/6 + \dots)$,

c'est-à-dire :

$\ln 2 = (1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5 + 1/6 + \dots) - (1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5 + 1/6 + \dots) = 0$,

Donc, $\ln 2 = 0$.

D'où vient cette absurdité?

Solution : L'absurdité provient du fait général qu'on ne peut manipuler les séries sans précaution et qu'en particulier on ne peut changer l'ordre des termes sans risque. Il existe deux sortes de séries convergentes :

- celles (dénommées «absolument convergentes») dont la série des valeurs absolues est convergente,
- celles (dénommées «semi-convergentes») dont la série des valeurs absolues est infinie. C'est le cas de :

$\ln(2) = 1 - 1/2 + 1/3 - 1/4 + 1/5 - 1/6 + \dots$

Pour les premières, on peut changer l'ordre des termes, additionner termes à termes, etc, comme nous l'avons fait ici. Pour les autres, Riemann a démontré au contraire que changer l'ordre des termes pouvait conduire à n'importe quelle valeur entre $-\infty$ et $+\infty$, et en fait toutes sortes d'absurdités peuvent être déduites de la manipulation sans précaution de séries semi-convergentes. L'exemple proposé est l'un des plus brefs qui le montre.

ARISTOTE, *Organon VI, Réfutation des arguments sophistiques*. Traduction J. Tricot. Librairie philosophique J. Vrin, Paris, 1987.

Edward BARREAU, *Mathematical Fallacies, Flaws, and Flimflam*, édité par The Mathematical Association of America, 2000, (ISBN 0-88385-529-1).

E.P. NORTHROP, *Fantaisies et paradoxes mathématiques*, Dunod, Paris, 1956, (tra-

duction de : *Riddles in Mathematics*, D. Van Nostrand Company Inc., New York, 1944).

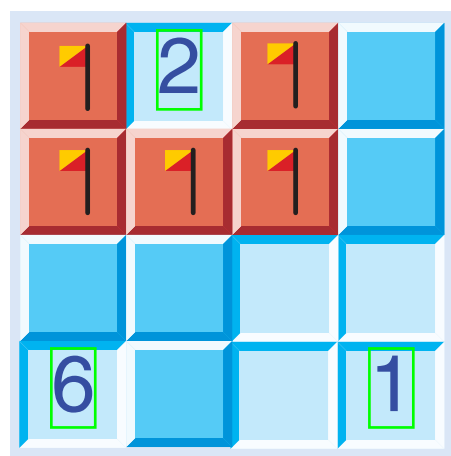
Sylviane GASQUET-MORE, *Plus vite que son nombre. Déchiffrer l'information*. Éditions du Seuil, Paris 1999.

Massimo PIATELLI-PALMARINI, *Inevitable Illusions : How Mistake of Reason Rule our Minds*, John Wiley and Sons, New York, 1994 (ISBN 0-471-58126-7).



Ou comment un jeu informatique peut faire de vous un homme riche.

À l'inverse des problèmes de classe P , les problèmes de classe non- P ne sont pas efficacement traités par les ordinateurs : tout algorithme mis au point pour les résoudre requiert un temps trop long. On peut prouver qu'un problème est de classe P en trouvant un algorithme qui le résolve en un temps polynomial, par exemple, ordonner par ordre croissant un ensemble d'entiers est un problème de classe P que des programmes peuvent traiter sur des banques de données commerciales, même très importantes. En revanche, trouver les facteurs premiers



1. Une position typique du démineur (à gauche). Après les premiers coups, le joueur a localisé deux mines (sous les drapeaux). L'examen des chiffres montre que les carrés violets dissimulent d'autres mines tandis que les verts sont sans danger. L'état du carré jaune est encore inconnu, mais peut être déterminé après un coup judicieux. En revanche, la position à droite n'est pas consistante : aucune disposition de mines dans la grille ne peut respecter les chiffres indiqués.

d'un entier et le problème du voyageur de commerce, qui consiste à déterminer le plus court chemin reliant plusieurs villes données, sont des problèmes de classe non- P (bien que cela n'ait pas encore été démontré).

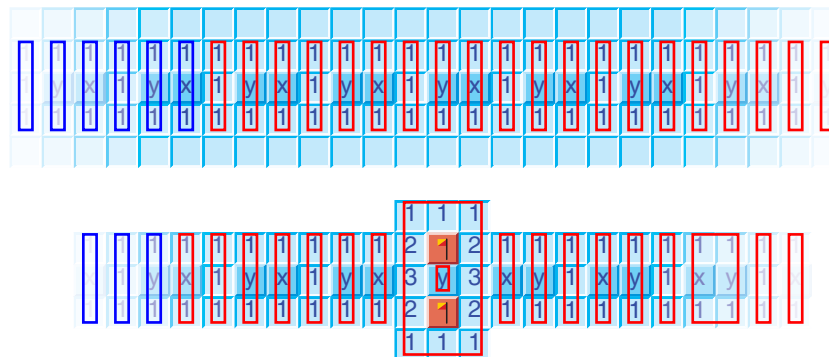
Pourquoi prouver qu'un problème est de classe non- P est-il si difficile ? Parce qu'il faut traiter tous les algorithmes possibles – et non pas un seul – et montrer qu'aucun ne résout le problème en un temps polynomial. Aujourd'hui, on sait qu'une vaste catégorie de problèmes candidats à la classe non- P sont sur un pied d'égalité : si l'un d'eux peut être résolu en un temps polynomial, alors tous peuvent l'être. Ces problèmes ont un comportement polynomial non déterministe, c'est-à-dire qu'avec de la chance – l'algorithme inclut une étape aléatoire –, on peut les résoudre en un temps polynomial ; ils sont de la classe NP .

NON- P , NP ET NP -COMPLET

Les classes non- P et NP sont différentes : un problème est NP dès qu'une solution proposée est bien en temps polynomial. Il est plus facile de vérifier qu'une solution proposée est bien en temps polynomial que de trouver la solution elle-même. Mon exemple favori qui illustre cette différence est le puzzle : en venir à bout peut être difficile, mais vérifier une solution proposée ne requiert souvent que quelques secondes ; le temps d'examiner que chaque pièce s'ajuste aux pièces voisines. Ce temps, environ proportionnel au nombre de pièces, est polynomial. En revanche, on ne peut effectuer un puzzle en un temps polynomial : le nombre de solutions croît plus vite que toute puissance donnée du nombre de pièces.

Beaucoup de problèmes NP ont des temps de traitement équivalents. Un problème NP est dit NP -complet quand l'existence d'une solution en un temps polynomial déterministe, c'est-à-dire sans processus aléatoire, entraîne que tout problème NP a une solution en un temps polynomial. Ainsi, si on peut résoudre un problème NP -complet en un temps polynomial, on peut résoudre tous les problèmes NP en un temps polynomial. Et la question « $P = NP$?» ? Bien que les apparences soient contraires, on peut s'interroger sur l'égalité des classes P et NP . La réponse attendue est négative, cependant, au cas où tous les problèmes NP -complets ont une solution en temps polynomial, alors les deux classes P et NP sont égales.

Nombre de problèmes sont NP -complets : un des plus simples est le problème SAT, qui inclut des circuits booléens.



2. L'électronique du démineur convertit des circuits booléens en position de jeu. Un seul type de carrés (x ou y) cache des mines. Des connexions propagent un signal (y suivi de x) le long de la grille (en haut). Un opérateur *non* inverse l'ordre des x et des y (en bas).

Ces circuits sont construits avec des opérateurs logiques, tel «*et*», «*ou*» et «*non*», qui s'appliquent à des valeurs soit vraies (V), soit fausses (F). Chaque opérateur fournit à partir de valeurs d'entrée une valeur de sortie : par exemple, l'opérateur *non* transforme la valeur V en la valeur F . Le problème SAT s'intéresse à l'existence pour un circuit booléen donné de valeurs d'entrée tel que la valeur de sortie soit V . Pour des circuits simples, le problème est un jeu d'enfants ; il devient ardu lorsque le circuit a un grand nombre d'opérateurs et d'entrées.

LA CONSISTANCE DU DÉMINEUR

Le lien avec le démineur apparaît quand on s'intéresse à la consistance du jeu, c'est-à-dire à la vraisemblance d'une position du jeu. Par exemple, la figure 1 montre une position inconsistante : aucune répartition des mines ne peut mener aux nombres affichés dans les carrés de la grille.

R. Kaye a montré que le problème SAT pour un circuit booléen donné peut-être transformé en un problème de consistance pour une certaine grille du jeu du démineur. En outre, il montre que la conversion des circuits booléens en positions du démineur s'exécute en un temps polynomial. Dans cette conversion, les entrées et les sorties du circuit deviennent une répartition des mines sur la grille : à un carré miné correspond une valeur V , et à un carré sans mine, une valeur F . Les connexions des opérateurs du circuit sont représentées sur la figure 2 : les carrés marqués y ont des valeurs opposées de celles des carrés marqués x . Notons que les chiffres des autres carrés sont corrects que x soit V ou F . Tels des «câbles électroniques», les connexions propagent chaque valeur (V ou F) sur la longueur de la grille.

On représente les opérateurs logiques par le même type de procédé. Par

exemple, la position du démineur de la figure 2 illustre l'opérateur *non* : le bloc du milieu échange les positions de x et de y ; x suit y avant le bloc et précède y après le bloc. Les valeurs des carrés sont inversées, que x soit V ou F , comme après un opérateur *non* dans un circuit booléen.

L'électronique du démineur est plus complexe : elle requiert par exemple de plier ou de scinder des «fils». R. Kaye franchit tous ces obstacles et conclut que quiconque prouve la consistance d'une position donnée du démineur en un temps polynomial, résout aussi le problème SAT du circuit équivalent en un temps polynomial. En d'autres termes, le démineur est un problème NP -complet : une solution en un temps polynomial à la consistance du démineur entraîne que tous les problèmes NP -complets ont des solutions en un temps polynomial : les classes P et NP sont égales. À l'inverse, si l'on montre qu'il n'existe pas de telle solution au problème du démineur, alors les classes P et NP sont différentes. Dans les deux cas, la question serait résolue.

Avant de vous lancer sur votre ordinateur, rappelez-vous que le problème de la consistance du démineur n'est pas une mince affaire : déterminer si une position de jeu est consistante devient vite difficile quand la taille de la grille augmente et la plupart des mathématiciens et des informaticiens pensent qu'il n'y a pas de solution générale traitable en un temps polynomial. De surcroît, l'Institut Clay a imposé des règles strictes au concours : avant d'accepter une solution, elle doit être publiée dans un journal important et être «généralement acceptée» par la communauté mathématique dans les deux années de sa publication.

Richard Kaye, *Minesweeper is NP-Complete*, in *Mathematical Intelligencer*, vol. 22, n° 2, 2000.



Chaleur en perdition

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-MICHEL COURTY

La chaleur quitte la maison par 1 000 chemins, mais 5 sont plus fréquents.

Avant tout, les murs d'une habitation sont faits pour être solides. Toutefois, quiconque paie des factures de chauffage sait qu'ils doivent être aussi isolants, et déplore que cela ne suffise pas à garder la chaleur dans la maison. Un peu de bon sens physique explique pourquoi, et identifie les cinq déperditions thermiques fréquentes dans une maison.

« Ferme la porte : Il fait froid dehors ! » Mille fois entendue, cette exclamation démontre que tout le monde connaît la plus banale des pertes thermiques de la maison : le remplacement de l'air chaud intérieur par de l'air extérieur froid. Un calfeutrage soigneux règle-t-il le problème ? Oui, mais il en crée un autre. Pour que l'habitation soit saine, l'air intérieur chargé en dioxyde de carbone doit souvent être remplacé par de l'air extérieur, riche en oxygène. Selon les normes actuelles pour les habitations, le volume d'air des pièces principales doit être renouvelé une fois par heure. Ainsi 10 kilowattheures par jour sont nécessaires pour réchauffer de 15 °C l'air d'un appartement de 50 mètres carrés si l'on renouvelle l'air une fois par heure.

C'est pour restreindre cette perte, que les bureaux et autres grands ensembles sont souvent équipés d'une ventilation mécanique assortie d'un échangeur de chaleur. Avant d'être intro-

duit dans les pièces, l'air entrant est réchauffé par l'air chaud qui circule dans des tuyaux. Dans certains échangeurs, l'air chaud est évacué par un tuyau qui chemine à l'intérieur du circuit par lequel est introduit l'air froid. De telles « géométries à contre-courant » sont si efficaces que l'air entrant y atteint presque la température de l'air intérieur.

Une fois les portes closes, et les enfants assez disciplinés pour les fermer dès qu'elles sont ouvertes, c'est par les parois que fuit la chaleur. La conduction thermique à travers les murs, le toit, les portes, les fenêtres ou encore le sol, est la deuxième des principales formes de déperdition de chaleur. Expression macroscopique de l'agitation microscopique désordonnée des atomes et des molécules qui constituent la matière, la chaleur se propage de proche en proche par l'intermédiaire des particules qui s'entrechoquent.

Ainsi, quand un milieu plus ou moins conducteur relie deux corps, il transmet la chaleur du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Les températures des deux corps ainsi reliés s'uniformisent en un temps inversement proportionnel à la conductivité thermique du milieu de transmission. Notons toutefois que la géométrie du milieu de transmission influe aussi sur la durée d'uniformisation thermique : quand son épaisseur double ou que sa surface de contact avec l'un des deux corps est réduite de moitié, cette durée double.

La conductivité thermique d'un matériau dépend de sa densité, car plus les particules par unité de volume sont nombreuses, plus les chocs sont fréquents.

De fait, les métaux sont de bien meilleurs conducteurs thermiques que le béton, qui lui-même conduit mieux que le bois. L'acier transmet 52 watts par mètre et par degré, le béton 1,75 et le bois, un bon isolant, seulement 0,06. Les gaz arrêtent aussi très bien la chaleur. L'air, par exemple, a une conductivité de 0,025 watt par mètre et par degré. Toutefois le meilleur de tous les isolants est tout simplement le vide. La raison en est simple : dans une région sans matière, il ne peut pas y avoir de chocs entre particules. C'est pourquoi les bouteilles *Ther-*



Les parois en contact avec l'extérieur, notamment les vitrages, sont une source importante de déperdition de chaleur.

mos, où l'on fait le vide entre les doubles parois, retiennent si bien la chaleur. En fait, le vide serait un isolant parfait, s'il ne laissait pas passer une autre forme d'énergie thermique : le rayonnement infrarouge qu'émet tout corps chaud.

LIMITER LES PERTES PAR CONDUCTION

Que faire pour limiter les pertes par conduction ? Isoler ! Le mieux n'est-il pas de construire sa maison en matériaux isolants ? C'est difficile, car les matériaux isolants sont rarement assez solides pour cela, sauf à prévoir une épaisseur de mur digne d'un château fort. Seul le bois est un isolant à la fois léger et solide, raison pour laquelle il est très utilisé dans les pays nordiques, où abondent les forêts. Très employé, le béton conduit malheureusement bien la chaleur. S'il est massivement utilisé dans une maison, les couches d'isolants sont indispensables. Les isolants courants sont tous à base d'air, le meilleur isolant après le vide.

Ainsi même si le verre est un bon conducteur thermique, la laine de verre est un meilleur isolant, car elle contient 99 pour cent d'air ! Autre exemple, le polystyrène expansé, lui aussi une excellente barrière thermique, renferme une



L'intrusion d'air froid dans les habitations est le principal facteur de déperdition thermique.

multitude de micro-bulles d'air. C'est aussi le cas de la neige gelée dont les Esquimaux construisent leurs igloos.

Malgré sa très faible conductivité thermique, l'air est la troisième cause importante de déperdition thermique dans une maison. Comment est-ce possible, alors que ce gaz est un si bon isolant ? Les apparences sont trompeuses : l'air n'isole que s'il est strictement immobile. Nous savons tous que la sensation de froid est moins forte par un matin calme à -10°C que par un matin venteux où il fait 0°C . En effet, l'air en mouvement transporte la chaleur avec une redoutable efficacité, un phénomène désigné par le terme de convection.

À l'intérieur d'une maison, la convection est soit précieuse, soit gênante. Elle est précieuse quand elle aide à homogénéiser la température des pièces habitées. Ainsi, elle peut être forcée à l'aide d'un ventilateur placé devant une source d'air chaud. D'emploi fréquent dans les hôtels, les ventilo-convecteurs sont bâtis sur ce principe ; la convection qu'ils créent uniformise vite la température, ce qui augmente la sensation de confort. En revanche, dans les convecteurs sans ventilateurs, la convection est naturelle : l'air chaud produit au contact de résistances électriques quitte le radiateur par le haut (ce qui crée un mouvement d'aspiration de l'air froid situé en dessous), s'élève et crée une circulation d'air dans la pièce. À mesure qu'il s'élève, il échange de la chaleur avec l'air ambiant plus froid et se refroidit. Sa densité augmente et il finit par redescendre. En revanche, la convection est gênante quand elle se crée dans les combles. Le phénomène a souvent une ampleur insoupçonnée. Pour le minimiser, il faut limiter les mouvements de l'air, par exemple en déposant une couche épaisse de laine de verre sous le toit.



En l'absence de laine de verre, l'air circule sous les toits et se refroidit. La laine de verre évite les déperditions de chaleur par le toit et limite les pertes par le plafond.

Une fois les murs et le toit isolés, restent les ouvertures. Elles représentent la quatrième grande cause de déperdition thermique. Ainsi, la perte d'énergie à travers une seule fenêtre de 2 mètres carrés est la même qu'à travers une façade de 100 mètres carrés. Les fenêtres créent de grandes fuites thermiques à cause de leurs carreaux en verre. À épaisseur égale, le verre conduit à peu près aussi bien la chaleur que le béton. Or, les carreaux de verre sont au moins 50 fois moins épais que les murs de béton. Une fois de plus, l'une des meilleures protections est à base d'air : les doubles vitrages. L'intervalle entre les carreaux y est si étroit que l'air se trouve immobilisé ; sa conductivité thermique 100 fois plus faible que celle du verre joue alors à plein son rôle d'isolant. Pour augmenter encore les économies d'énergie, on peut aussi utiliser des vitrages particuliers, dont l'une des parois a été revêtue d'une couche d'oxyde métallique qui bloque le rayonnement thermique.

EFFETS D'AILETTES

Non moins sournoise, la cinquième grande forme de déperdition thermique est la conduction à travers les structures du bâti. Outre son enveloppe, une maison comprend aussi des dalles et des murs porteurs, éventuellement prolongés dans le sol par des fondations ou vers l'extérieur par des balcons. Tous ces éléments structurels sont à la fois en contact avec l'air chaud intérieur et avec l'extérieur. Quand une bonne partie de leur surface est exposée à l'extérieur, ils se comportent comme de véritables ailettes de radiateur.

Ces structures sont des lames métalliques ajoutées sur un radiateur pour augmenter la surface de contact entre le corps chaud et l'air froid. Les ailettes contournées des radiateurs de microprocesseurs illustrent bien le phénomène ; leur surface de contact avec l'air est si grande que leur taille excède celle de la puce qu'elles refroidissent ! Or, un mur de soutènement perpendiculaire à la façade ou à la dalle qui soutient un balcon a le même effet qu'une ailette. Pour le constater, placez-vous à l'intérieur d'une pièce et passez votre main sur un tel mur en la rapprochant de la façade ; vous constaterez qu'à environ 70 centimètres de la façade, la température du mur diminue. C'est là que commence la portion du mur qui diffuse au maximum. Le mur se comporte comme une « ailette » de la maison.

Dans une maison, les pertes dues à la conduction à travers les structures reliant l'intérieur à l'extérieur représentent souvent jusqu'à cinq pour cent des pertes totales. Comment les réduire ? Le mieux est de recourir à une isolation



Les structures, tels les balcons qui sont en contact à la fois avec l'air chaud intérieur et l'air froid extérieur se comportent comme des ailettes de radiateur : elles favorisent les échanges de chaleur et, par conséquent, les pertes thermiques.

extérieure de la façade. Ainsi, les habitants des pays du Nord habillent de bois, d'ardoises, de plaques goudronnées les murs de pierre ou de béton de leurs maisons, et introduisent de la paille dans les interstices.

Suivant la configuration de la maison, certains mécanismes de déperdition de chaleur prédomineront. Les mesures prises pour les réduire devront être adaptées à ces mécanismes particuliers. Une fois les fuites d'air et les pertes de chaleur par conduction maîtrisées, il importe de contrecarrer les effets sournois de la convection. Faire poser des doubles vitrages sera peu utile si des échanges d'air excessifs avec l'extérieur subsistent. La recherche d'un bon équilibre thermique est affaire de compromis.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. **Jean-Michel COURT** est chargé de recherche au CNRS et travaille au Laboratoire Kastler-Brossel (CNRS, ENS, IPMC)

J. TAINE et **J.-P. PETIT**, *Transferts thermiques*, Dunod.

<http://www.ac-amiens.fr/academie/pedagogie/Seconddegrepofessionnel/sti/Batiment/Confort-thermique/THERMO.html>

http://www.ideesmaison.com/construction/ame/ame_isol1.htm

Biologie

Copain des petites bêtes

Léon Rogez.
Éditions Milan, 2000
(257 pages, 148 francs).

Voilà un bel ouvrage qui se présente comme «Le guide du petit entomologiste», mais qui en fait doit intéresser un large public. D'abord, que sont «les petites bêtes»? Essentiellement, les arthropodes et surtout les insectes, qui représentent huit espèces sur dix, parmi toutes les espèces vivantes connues. Où les trouver? Partout : dans les prairies, les bois, au bord ou dans l'eau, dans les jardins, dans les maisons et dans des lieux plus insolites, tels les grottes, les nids de vertébrés, les déserts...

Quel est leur rôle? Il est multiple : ils servent de nourriture et s'entre-dévorent ; ce sont aussi d'infatigables nettoyeurs et recycleurs, des végétariens insatiables qui détruisent parfois nos cultures, des pollinisateurs très utiles ou alors de redoutables carnassiers qui, à l'occasion, nous agressent. Comment les capturer et les élever? On détaille ici toute la panoplie du chasseur d'insectes : filets, parapluie japonais, pièges (assiettes, miel, bière, lumière...). Comment vivent-ils? Parade nuptiale, accouplement, ponte, première naissance, vie larvaire, seconde naissance, puis le stade adulte, sont quelques aspects de leur vie étonnante.

Et si nous les regardions de plus près? Ils sont constitués d'une série d'«anneaux» qui forment un squelette externe, et d'accessoires extraordinaires, tels des pattes, des antennes, des ailes, des yeux... Ils ont aussi la capacité de communiquer entre eux par des messages sonores, odorants ou lumineux.

Et si on les collectionnait? Cet ouvrage présente tout le matériel (épingles entomologiques, étaloirs, paillettes, ramollissoir...) et la bonne façon de s'en servir. Comment les grouper et les classer? Des mollusques au corps mou, aux longs annélides (des vers), aux mille-pattes qui ont souvent plus de dix paires de pattes, aux arachnides (scorpions, araignées ou encore acariens), on arrive aux insectes, depuis les plus primitifs jusqu'aux coléoptères, sans omettre les libellules, les blattes, les criquets, les sauterelles et les grillons, les poux et les puces, les papillons, les mouches et les moustiques, les abeilles... Un catalogue ordonné nous permet de reconnaître les diverses formes de ce microcosme. On ne peut quitter ce monde sans évoquer leurs extraordinaires prouesses comportementales : vol, saut, nage, chants, construction (ruche, termitière, fourmilière), mimétisme, migrations sont quelques-uns des exploits que ces petits surdoués réalisent pour assurer leur survie. Écrit par un passionné, ce livre, richement illustré, sera le plus beau cadeau à faire à un naturaliste en herbe et pourrait être une référence pour nos professeurs des écoles.

Jacques d'aguiar



La punaise *Percillus bioculatus* vide de sa substance une larve d'un doryphore, qui, de son Amérique natale, s'est largement répandue dans le monde, en ravageant nos champs de pommes de terre.

Histoire des sciences

Le mètre du monde

Denis Guedj. Éditions du Seuil, 2000
(338 pages, 120 francs).

Dans toutes les civilisations, les hommes ont compté, pesé, mesuré, pour des besoins de commerce et d'échanges. Les unités de longueur se rapportaient souvent aux dimensions du corps humain – le pouce, la coudée, le pied, le pas – ou à la mesure de ses activités : une lieue (une heure de marche), un journal (l'aire du terrain labourable en une journée). Les systèmes traditionnels d'unités étaient complexes et surtout, multiples : les unités avaient des définitions locales et, très souvent, le même nom pour des valeurs différentes.

Dès 789, Charlemagne décrétait l'emploi de mesures identiques dans tout le royaume, mais en vain. Louis xi, François i^{er} ou Louis xiv ne feront pas mieux. Pour les longueurs, les étalons employés au xviii^e siècle étaient le pied de roi (0,325 mètre) et la toise du Châtelet, valant six pieds (1,95 mètre). Le mot «toise» vient du latin *tensa brachia*, les bras étendus ; un pied vaut 12 pouces, et un pouce est égal à 12 lignes. Pour les poids, l'étalon datait du xive siècle : la pile de Charlemagne, constituée d'une série de 13 poids en cuivre emboîtés, vaut 25 livres (poids de 0,49 kilogramme chacune).

En 1788, la devise «Un roi, une loi, un poids, une mesure» est souvent citée dans les cahiers de doléances. L'idée directrice de l'uniformisation attendue est de définir des étalons pris dans la nature, donc universels. En outre, la simplicité et la cohérence devraient supprimer les vestiges de la féodalité. En reliant physiquement longueur et durée, un pendule simple aurait convenu : celui qui «bat la seconde» mesure environ 99 centimètres à Paris, mais l'astronome Jean Richer avait découvert en 1672 que sa longueur dépend du lieu de l'expérience. Cet objet ne sera pas l'étalon de longueur.

Toutefois la réforme se met progressivement en place, grâce à une volonté «révolutionnaire». Le 27 octobre 1790, l'Académie des sciences adopte l'échelle décimale pour tous les poids et mesures, et une commission composée de Charles de Borda, Joseph-Louis de Lagrange, Gaspard Monge, Pierre-Simon Laplace

Géographie

Guyane, Guyanes, une géographie «sauvage» de l'Orénoque à l'Amazone

Emmanuel Lézy.
Éditions Belin, 2000
(348 pages, 130 francs).

Le géographe Emmanuel Lézy s'approprie les deux millions de kilomètres carrés de «la planète Guyane» : quelle témérité et quelle passion ! Peu lui importe que les frontières politiques partagent cette planète entre le Venezuela, le Brésil et les Guyanes côtières (le Guyana, le Suriname et la Guyane française). Son espace est le «pays des mille eaux», délimité par les gigantesques fleuves que sont l'Orénoque, le Rio Negro et l'Amazone. Pays mythique de l'El Dorado et des Amazones guerrières, pays imaginaire – de Jules Verne à Conan Doyle, en passant par Jean Galmot ou Alejo Carpentier... – mais aussi pays bien réel : passer de l'un à l'autre semble naturel pour l'auteur. Ce marcheur n'est jamais aussi heureux qu'en suivant les capricieux sentiers (les trails) qui sillonnent la forêt tropicale : «autant un cheminement dans la pensée des gens que dans leurs

et Marie-Jean de Condorcet est chargée de fixer la base des unités. Ces savants proposent la longueur du méridien terrestre. C'est la même partout sur la Terre. L'Assemblée vote cette loi du 30 mars 1791 et ordonne la mesure de l'arc de méridien, entre Dunkerque et Barcelone : environ 1 100 kilomètres. C'est la première définition du mètre : la dix-millionième partie du quart du méridien. Ainsi, la circonférence polaire de la Terre mesure exactement 40 millions de mètres. Dunkerque et Barcelone ont été choisies pour plusieurs raisons : toutes les deux sont proches du 45e parallèle, mais aussi du méridien de Paris (celui de l'Observatoire). Et voilà Jean-Baptiste Delambre et Pierre Méchain qui partent à l'aventure, parcourant la France du Nord au Sud (juste qu'en Espagne, alors en guerre contre la France). Il ne leur sera guère facile de faire des mesures par triangulation au milieu des vicissitudes de la France révolutionnaire. Pourtant, ils achèveront consciencieusement leur mission, en sept ans (de juin 1792 à novembre 1798) au lieu d'un seul initialement prévu. Cette même commission charge également les chimistes Antoine Laurent de Lavoisier et René Haüy de déterminer le poids (la masse) d'un volume connu d'eau pure pour en déduire l'unité de masse.

Avant de disposer des résultats des mesures, la Convention nationale adopte, le 7 avril 1795, la loi organique du système métrique décimal qui fixe les nouvelles mesures républicaines, constituées en système à partir d'une seule unité (le mètre, l'are, le stère, le litre, le gramme). Des préfixes décimaux à utiliser dans la nomenclature sont également définis : milli, centi, déci, déca, hecto, kilo.

Après les mesures de Delambre, de Méchain, de Lavoisier et d'Haüy, vérifiées par une commission de savants européens, la loi du 19 frimaire an VIII (10 décembre 1799) fixe la valeur définitive du mètre, qui vaut 3 pieds 11,296 lignes, et du kilogramme (masse du décimètre cube d'eau pure à la température de 4 °C), qui vaut 18 827,15 grains, le grain étant la fraction 1/9 216 de la livre poids. Ces unités avaient été matérialisées par des étalons en platine aggloméré : une règle pour le mètre, et un cylindre de diamètre égal à sa hauteur (39 millimètres) pour le kilogramme. Ces étalons sont déposés aux Archives de la République le 4 messidor an VII (22 juin 1799).

La population (souvent illettrée) n'était guère favorable au système métrique, y voyant plus d'inconvénients avec les noms nouveaux et les habitudes à modifier, que d'avantages, telle la décimalisation. Le 12 février 1812, un décret impérial autorisera, à côté du système légal, l'emploi de mesures «usuelles» à

subdivision non décimale et portant des noms anciens. L'arrêté du 21 février 1816, sous Louis XVIII, abandonna même la décimalisation, compromettant gravement la réforme. Heureusement la loi du 4 juillet 1837 abrogea le décret de 1812 et rendit obligatoire l'usage du système métrique décimal à partir du 1er janvier 1840. L'école en assura la diffusion. Quelques expressions nous rappellent les anciennes unités : «passer sous la toise», «ne pas reculer d'un pouce»... Seul le mot «livre» (500 grammes) résiste encore sur les marchés.

Progressivement, mais avec parfois des réticences, tous les pays adoptèrent notre système par la suite. Les expositions universelles en favoriseront l'expansion, et le Bureau international des poids et mesures sera créé en 1875, lors de la Convention du mètre. Depuis, les progrès de la physique ont modifié les définitions des unités (sauf celle du kilogramme, qui est encore la masse d'un cylindre de platine iridié) : aujourd'hui, la lumière fournit l'étalon du mètre et les atomes celui de la seconde.

Le livre de Denis Guedj, essai-récit ni vraiment historique ni vraiment scientifique, retrace cette longue aventure de la création du système métrique décimal. En 1999, cette grande œuvre de la France révolutionnaire a eu 200 ans. Condorcet l'avait dédiée «à tous les temps et à tous les peuples pour leur plus grand avantage».

Michel Toulmonde



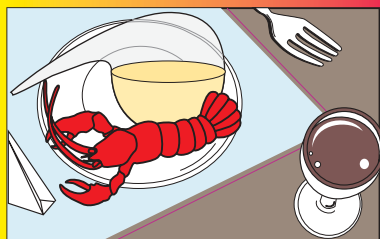
Les mangroves, un des nombreux paysages de Guyane.

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 27 mars 2001.



empreintes». En remontant les fleuves entrecoupés de sauts, lieux de pêche et de chasse, où, quand la fatigue se fait sentir, l'on installe un «carbet» (un abri pour les hommes et les embarcations), puis un village.

Au cours de ses périples, le chercheur éprouve à la fois la fascination du navigateur et écrivain anglais Walter Raleigh (1552-1618), décapité pour avoir rêvé la Guyane au lieu de la conquérir, et la modestie de celui qui sait que «nulle part, je ne me suis arrêté assez longtemps pour m'en réclamer connaisseur». Lucide, il évoque Claude Lévi-Strauss et «l'intense concentration rendue nécessaire par le moment bref dont on dispose».

Pourtant E. Lézy voudrait restituer une Guyane aussi exhaustive que possible, s'attardant sur les multiples contrastes de ce vaste territoire : forêt tropicale humide aux arbres géants et aux sols fragiles, pauvres, lessivés, à l'horizon humifère réduit, alternant avec les savanes issues de la civilisation. En revanche, le sous-sol renferme toutes les richesses de la terre : or, diamants, fer, pétrole, bauxite, manganèse... C'est «l'argent qui s'envole» et enrichit les investisseurs étrangers. Le peuplement (quatre millions d'individus) est pluriethnique, avec des communautés «cassées» qui se mélangent peu et occupent des emplois séparés. La répartition est essentiellement périphérique et le centre de la Guyane demeure presque vide. À côté des Amérindiens, des migrants «noirs marrons» (les descendants des esclaves rebelles) se sont implantés, suivis des créoles métissés (issus des esclaves affranchis), puis de populations asiatiques (Hindoustaniens, Javanais, Chinois, Laotiens). La population blanche est très minoritaire. La culture amérindienne, dont le nombre de représentants est difficile à estimer, est aujourd'hui reconnue, depuis la mise en cause de nos échecs environnementaux.

Pour ceux dont la connaissance de la Guyane se résume aux lancements réussis des fusées Ariane à Kourou, en Guyane française, E. Lézy propose une masse d'informations géographiques, historiques, économiques, sociologiques, toponymiques... sans escamoter pour autant la part du rêve.

Un seul reproche : pourquoi, alors que les illustrations sont abondantes et les cartes sont magnifiques, a-t-on renoncé à dresser des index (matières, lieux géographiques, noms propres), un glossaire et une liste de sigles ? La lecture et les recherches en seraient facilitées, mais on peut imaginer que ces éléments feront partie de la prochaine édition de cet ouvrage universitaire qui fera date.

Michèle Febvre

Histoire des sciences

Histoire des grand scientifiques français, d'Ambroise Paré à Pierre et Marie Curie

Éric Sartori et Pierre-Gilles
de Gennes.

Éditions Plon, 1999

(428 pages, 169 francs).

J'ai lu ce livre, qui présente les biographies de 22 scientifiques français, avec intérêt... mais aussi agacement. Dans la préface, Éric Sartori décrit la méthode qu'il a utilisée pour la rédaction de son livre, reprenant à son compte les propos de l'historien de la biologie Ernst Mayr : «Je préfère être franchement subjectif et vous avertir à l'avance que mon compte-rendu sera fragmentaire, et portera surtout sur des aspects conciliables avec mes propres vues... Ma tactique consiste souvent à émettre des jugements définitifs. Que cela soit bien ou mal, cela mérite d'être discuté dans l'univers libre-échangiste des idées scientifiques. [...] Toute histoire devrait être polémique.»

Cette conception a le mérite de la franchise : elle stimule la discussion et empêche tout «consensus mou» fondé sur une documentation des biographies qui serait incomplète. Le reproche d'une mauvaise documentation ne peut être fait à l'auteur, autant que j'en ai jugé dans le domaine que je connais le moins mal, celui de l'histoire de la chimie. Je recommande donc la lecture de ce livre à tous les amateurs de vulgarisation historique de bon niveau.

Cependant, ce livre peut aussi agacer, et l'auteur ne devrait pas s'en étonner puisqu'il prône une histoire polémique. En premier lieu, l'auteur affirme ses opinions personnelles, morales et politiques, qu'il plaque sur l'histoire des scientifiques. Comme j'ai conscience de ne pas partager nombre de ces opinions, je prends le droit de le dire ici, d'autant que je ne suis pas convaincu que la forme que l'auteur utilise pour exprimer ses opinions enrichisse beaucoup l'ouvrage. Par exemple, après avoir énuméré les «savants victimes de la Révolution», l'auteur termine le chapitre consacré à Antoine Laurent Lavoisier ainsi : «il est essentiellement mort... de la démagogie, de

l'envie et de la bêtise qui s'expriment si bien dans les périodes révolutionnaires». É. Sartori a le droit de ne pas aimer les périodes révolutionnaires, mais d'autres, qui déploreront avec lui la décapitation de Lavoisier, lui feront remarquer que la Révolution a aussi été l'époque d'un développement scientifique sans précédent. De surcroît, «la démagogie, l'envie et la bêtise» s'expriment également fort bien hors des périodes révolutionnaires.

Autre exemple : l'auteur défend Louis Pasteur contre ceux qui lui reprochent d'avoir envisagé de tester l'innocuité de son vaccin sur des condamnés à mort. Il en profite pour donner son opinion sur les lois de bioéthique actuelles qui, selon lui, disposent assez légèrement du sort des embryons «surnuméraires» des fécondations in vitro. Le problème posé est grave, mais l'opinion de l'auteur sur ce sujet, donnée au détour d'un commentaire sur Pasteur, ne contribue que très peu à la réflexion sur la question.

E. Sartori a visiblement une grande admiration pour le chirurgien et physiologiste français Alexis Carrel, l'homme et le savant. Il décrit ainsi son comportement «très contesté» pendant l'Occupation : «Carrel faisait indiscutablement partie de ces Français qui estimaient que le maréchal Pétain avait été un bouclier pour la France contre l'occupation allemande». Est-ce une explication ? Une justification ? Dans l'un ou l'autre cas, l'argumentation semble bien courte.

Le second sujet d'agacement tient au caractère cocardier de certaines interprétations de l'auteur, qui semble avoir oublié que, dans sa préface, il avait très justement écrit : «Certes, les controverses, les conflits d'attribution entre nations de telle ou telle découverte ont parfois tourné au ridicule.» On peut regretter que «Pierre Simon de Laplace ne soit pas aussi mondialement célèbre qu'Isaac Newton» ; toutefois le chauvinisme scientifique de l'auteur le conduit aussi à des affirmations plus discutables. La loi d'Avogadro-Ampère, une des bases de la chimie, stipule que, dans des conditions identiques de volume et de pression, des volumes égaux de corps gazeux différents, renferment le même nombre de molécules. Il est difficilement soutenable qu'André-Marie Ampère ait, en 1814, «démontré mathématiquement le fait» et qu'il ait ainsi transformé en loi «physico-chimique» l'«intuition» de l'Italien Alessandro Avogadro qui datait de 1811. Les mérites d'Ampère sont si incontestables qu'il ne semble pas nécessaire d'en rajouter en faisant de lui le précurseur de la théorie atomique de la valence et du tableau périodique des éléments !

En plusieurs occasions, É. Sartori reprend l'adage de Laplace : «Une vérité

scientifique n'appartient qu'à celui qui, le premier, la démontre». S'en suit une utile discussion des relations entre expériences, théories et «vérités scientifiques» (qu'est-ce qu'une «vérité scientifique», en 2001 ?). Toutefois, cet adage ne peut se substituer à un rappel chronologique du développement de la théorie atomique au XIX^e siècle, qu'on ne trouvera pas dans ce livre : Dès 1805, le physicien et chimiste britannique John Dalton énonce la loi des proportions multiples qui porte son nom : «Quand deux éléments se combinent pour donner plusieurs composés, les différents poids de l'un des éléments qui entrent en combinaison avec un poids donné de l'autre sont dans des rapports entiers petits». En 1808, Louis-Joseph Gay-Lussac établit la loi qui porte son nom : «Les volumes de deux gaz qui se combinent entre eux sont dans un rapport simple». Avogadro, en 1811, puis Ampère, en 1814, établissent indépendamment la loi qui porte leurs deux noms. L'histoire de l'atomisme «moderne» se complique alors et devient un sujet polémique durant tout le siècle : la loi de Gay-Lussac, qui est en parfait accord avec la loi de Dalton, ne fut pas acceptée par celui-ci, et Gay-Lussac lui-même, eut envers l'atomisme une attitude très circonspecte. Avogadro et Ampère ont le même point de départ : la loi de Gay-Lussac. Ils établissent la distinction entre ce que nous nommons aujourd'hui atome et molécule. La «théorie atomique» (Dalton, Gay-Lussac, Avogadro, Ampère...) mettra plus d'un siècle à s'imposer.

Georges Bram

SCIENCES NATURELLES

PHOTO-GUIDE DES CHAMPIGNONS D'EUROPE

Régis Courtecuisse.
Éditions Delachaux et Niestlé, 2000
(960 pages, 195 francs)

Le gourmand qui rencontre un champignon inconnu n'a évidemment qu'une envie : savoir s'il est comestible ou toxique. Le pharmacien était naguère la référence, mais la population (générale, comme celle des pharmaciens) s'est urbanisée et, au retour des promenades dominicales, on hésite à chercher, puis à déranger l'homme de l'art, lequel n'a plus

toujours la compétence nécessaire (l'avait-il toujours ?). Or la reconnaissance n'attend pas longtemps : quand les limaces n'ont pas dégradé la récolte, c'est le champignon qui, pourri ou séché, est devenu difficile à reconnaître. Dans le doute, le mycophage rejette parfois d'excellents comestibles à côté des vénéneux sans appel.

D'où l'intérêt des livres consacrés aux champignons. Ils sortent tous les ans, généralement à l'automne, rivalisant de couleurs et de promesses : «dictionnaire complet», «guide complet», la «quasi totalité des espèces»... Généralement, ils promettent une reconnaissance aisée et rapide d'un nombre considérable d'espèces... mais à l'usage, l'on rencontre des difficultés nombreuses, voire rédhibitoires.

Premièrement, une bonne reconnaissance impose souvent l'usage d'un microscope, qui montrera les spores. Pourquoi pas, après tout : la mycophilie demande quelques sacrifices.

Deuxièmement, la difficulté de reconnaissance (et l'attrait ?) des champignons résulte de leur merveilleuse et remarquable diversité : même leur reproduction par des photographies ou par des dessins (un ou deux, dans la plupart des livres), à divers stades de croissance, n'épuise pas la variété des états ou des formes que l'on rencontre sur le terrain. De ce fait, en pratique, on trouve rarement, dans les guides, dictionnaires, livres, manuels ou abrégés, le type exact du champignon que l'on a récolté. En corollaire, un guide qui permettrait une réelle reconnaissance serait déjà une belle satisfaction.

Troisièmement, nombre de guides simples sont trop pauvres en espèces représentées. Par exemple, bien des guides ne présentent pas le bolet de Le Gal (*Boletus legaliae*), champignon au pied ventru, rougeâtre, avec un réseau, au chapeau plus sombre et à l'odeur agréable. Toxique ou comestible ?



Comestible ou toxique ? Tout mycophage qui se respecte doit s'équiper d'un «bon» guide.

SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-05
www.pourlascience.com
Commande de dossiers ou de magazines :
01-55-42-84-05

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Françoise Cinotti (Rédactrice en chef), Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulenec, François Savatier, Emmanuel Leclerc, Laurence Plévert, Marie-Neige Cordonnier (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot, Céline Lapert, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Nathalie Choplain. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet. Conseiller scientifique : Hervé This.

Ont également collaboré à ce numéro : Francis Bernardeau, Jean-Michel Courty, Paul Decaix, Évelyne Host-Platret, Anne Le Noël, Valérie Martin-Rolland, Claude Olivier, Christophe Pichon, Bernard Thierry, Jean-Philippe Uzan.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Griesebach. President and Chief Executive Officer : Gretchen Teichgraber. Vice-President : Chuck McCullagh and Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin

(f.guillotin@pourlascience.fr), assisté d'Irène Limon

8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06

Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97

Télécopieur : 01 43 25 18 25

Etranger : 415 Madison Avenue, New York.
N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Anne-Claire Ternois : 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 : Servidis : Chemin des châlets, 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).

Sa chair blanchâtre à jaunâtre qui bleuit n'est pas un signe de toxicité, car le bolet bai bleuit également (cette coloration disparaît toutefois à la cuisson). Alors ? Alors il appartient malheureusement à cette classe non taxonomique des champignons toxiques, à côté du bolet satan, du bolet rouge sang ou du bolet rouge et jaune. Pourtant, on le rencontre en abondance certaines années.

Quatrièmement, les clés sont rébarbatives ou difficiles d'emploi, même quand elles sont bien faites ; au minimum, pour les utiliser, on doit répondre à des questions telles que : les lamelles sous le chapeau sont-elles égales ou inégales ? les spores sont-elles blanches ou vertes ? les lamelles sont-elles libres ou adnées ? se résolvent-elles en encre ou non ? On le voit, qui veut reconnaître un champignon qu'il ne connaît pas doit l'étudier longuement, de sorte que le «guide de poche d'usage simple» est un mythe, au même titre que le «guide complet». Résolvons-nous donc à un apprentissage lent, patient, méthodique, et privilégions des livres un peu austères et sérieux.

Le Guide des champignons de France ou d'Europe, de Régis Courtecuisse et Bernard Duhem (paru en 1994 aux éditions Delachaux et Niestlé) est un «classique» de ce type. Ses superbes dessins en couleur (pas toujours suffisants, hélas) se trouvent en face de descriptions complètes et macroscopiques, mais sans concessions terminologiques : pour découvrir les 1751 espèces présentées (le bolet de Le Gal s'y trouve, par exemple), le lecteur doit se familiariser avec les termes consacrés que sont hyménophores, stroma, ascoma, péri-thèces, stipe... Le mycophage est mis sur la bonne voie de la mycologie, certes, mais avait-il tant d'ambition, lui qui jugeait le monde à l'aune de sa gourmandise ?

Aujourd'hui, R. Courtecuisse publie, chez le même éditeur, le Photo-guide des champignons d'Europe. Photo-guide : les dessins sont remplacés par 200 pages de photographies numérotées, appelées par les silhouettes de 15 groupes ; les photographies numérotées renvoient à leur tour vers les descriptions macroscopiques et microscopiques, accompagnées des divers noms latins et français, d'indications sur la saison de rencontre, l'habitat, la répartition, la comestibilité.

Ce nouveau photo-guide promet une «reconnaissance facile» de 930 espèces (je n'y ai pas trouvé le bolet de Le Gal, et je n'ai pas non plus trouvé l'explication de son absence). J'ai fait l'esai pour plusieurs champignons, et, notamment le bolet rougeâtre (*Xerocomus rubellus* Quélet). Tout d'abord, je dois

admettre que la photographie (bien choisie) guide bien vers la description, laquelle corrobore l'identification. Si l'on juge un livre à la capacité de reconnaissance qu'il donne, ce photo-guide est un progrès.

Toutefois, il reste perfectible. Le bolet rougeâtre, par exemple, est décrit avec un «chapeau cinabre à framboise. Caractères de *X. chrysenteron*, mais une couleur rouge sang, rouge vif, cinabre à framboise, parfois décolorant ou rose orangé avec l'âge. Pores jaune vif. Stipe jaune vif à rouge vif. Saison : août-novembre. Habitat : sous-bois clairs, herbeux, lisières. Distribution : inégale. Espèce assez courante ou rare.» On n'a pas de description microscopique et on n'est pas renseigné sur son éventuelle comestibilité ! La mention «caractères de *X. chrysenteron*» renvoie vers ce dernier, mais elle impose un détour vers l'index des noms latins qui fera revenir au bolet à chair jaune, dans la même page (n'aurait-on pu faire plutôt un renvoi vers ce bolet à chair jaune, en indiquant même «voir ci-dessus»?).

Dans la note consacrée à *X. chrysenteron*, les «Remarques», où figurent généralement les mentions de toxicité ou de comestibilité, indiquent seulement : «*X. pruinatus* (Fr.) Quélet au chapeau brun pourpre foncé, très prunieux et souvent ridé cérébriforme, à le stipe jaune vif, bleuisant au toucher et la chair jaune vif. *X. porosporus* Immler, facile à identifier au microscope par ses spores subporées, à un chapeau souvent très fissuré, mastic olivâtre, à chair sous-jacente blanche et un stipe pratiquement sans rouge, noircissant en bas».

Alors, finalement, ce bolet rougeâtre que nous avons bien reconnu grâce aux superbes photographies du photo-guide, est-il comestible ou toxique ? C'est seulement par hasard, lors de la consultation de la note relative au bolet bai (*X. badius*) qu'on lira : «comestible (les autres *Xerocomus* sont très médiocres) à l'état jeune. Mais cette espèce accumule les radioéléments», et qu'on comprendra que ce remarquable photo-guide a été fait plus pour les mycophiles que pour les mycophages. Le livre idéal reste à faire.

Hervé This

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de **Pour la Science** est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>