

LE VIRUS DE LA GRIPPE • LE BOGUE DE L'AN 2000 • ADN et évolution

■ POUR LA

Pour la Science

SCIENCE

Mars 1999

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

Cosmologie

Une nouvelle vision
de l'Univers

Canada : \$ 8,75



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

5

TRIBUNE DES LECTEURS

6



JEU-CONCOURS

Problème d'hôtelier

par Pierre Tougne

7



POINT DE VUE

L'eugénisme

par Pierre-Henri Gouyon

8

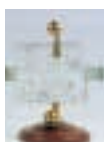


SCIENCE ET ÉCONOMIE

Chômage et flexibilité

par Bernard Guerrien et Sophie Jallais

10

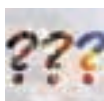


PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Les «appareils» de l'enseignement

par Francis Gires et Nicole Hulin

12

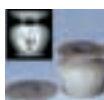


SCIENCE ET GASTRONOMIE

Questions...

par Hervé This

16



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

- La carte d'identité des émeraudes
- Le mildiou est une algue
- Le stress du réveil

24

- Le ciel se couvre...
- Le glioblastome
- Évanescences
- Symbiose de galaxies
- La cheville des baleines
- Lignes de billes
- Nouveau regard sur des fards
- Un ancêtre venu du froid

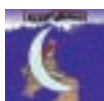


VISIONS MATHÉMATIQUES

Pliages et origami

par Ian Stewart

96



LOGIQUE ET CALCUL

Les découpages artistiques

par Jean-Paul Delahaye

100



L'IMAGE DU MOIS

Van Gogh, mauvais chimiste

106



SAVOIR TECHNIQUE

Les parachutes

par Dan Poynter

109



ANALYSES DE LIVRES

110

- Regards sur l'éthique des sciences, de G. Toulouse
- Le Muséum au premier siècle de son histoire, sous la direction de C. Blanckaert, C. Cohen, P. Corsi et J.-L. Fischer
- Arbres de pierre, la croissance fractale de la matière, de V. Fleury
- Réalisez votre télescope, de K. et J.-M. Lecleire

La révolution cosmologique

Des supernovae pour sonder l'espace-temps

par Craig Hogan, Robert
Kirshner et Nicholas Suntzeff

L'analyse des explosions d'étoiles très lointaines indique que l'expansion de l'Univers accélère. Une forme d'énergie étrange semble être la cause de cette accélération.

36

L'antigravité

par Lawrence Krauss

Certains cosmologistes expliquent les nouvelles observations des astronomes à l'aide d'équations qui comprennent un terme découvert par Einstein : la constante cosmologique.

42

L'inflation de l'Univers

par Martin Bucher
et David Spergel

L'Univers contiendrait moins de matière que ne le prévoit la théorie de l'inflation : il semble se dilater plus vite que prévu. Certains cosmologistes résolvent ce paradoxe avec une inflation en deux étapes.

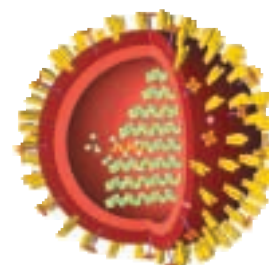
50

La lutte contre la grippe

par Graeme Laver,
Norbert Bischofberger
et Robert Webster

Bientôt commercialisés, les nouveaux médicaments antigrippaux empêchent le virus de la grippe de se multiplier dans les tissus humains. Ils devraient également prévenir l'infection.

60



De la voile à l'aile

70

par V. Radhakrishnan

Les progrès dans la conception des bateaux résultent de l'implantation des foils qui surélèvent la coque et de la structure des mâts ailes plus efficaces

**Les ordinateurs passeront l'an 2000**

78

par Peter de Jager

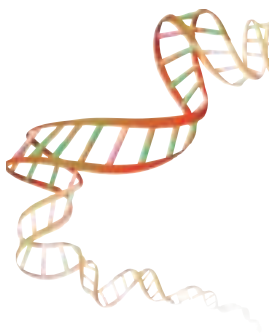
De nombreux informaticiens avaient négligé le changement prochain de millénaire : ils n'ont utilisé que les deux derniers chiffres pour indiquer les années.

**ADN et évolution**

84

par Richard Moxon et Christopher Wills

Des séquences répétées dans l'ADN interviennent dans l'adaptation des bactéries à leur environnement et, également, dans l'apparition de maladies humaines.

**La protection des jeunes chez les insectes**

90

par Douglas Tallamy

Les insectes de certaines espèces risquent leur vie pour protéger leur progéniture.

**ÉDITORIAL****La maîtrise de la cosmologie**

Si la matière de l'Univers n'obéissait à aucune loi, il nous faudrait un cerveau aussi grand que l'Univers pour prévoir son évolution. Heureusement, des lois synthétiques autorisent l'analyse : nous comprenons la nature parce qu'elle est régie par des lois qui simplifient l'entendement du petit nombre d'entités composant la matière. Les aristotéliens pensent que ces lois sont *sine qua non*, que sans elles la matière ne peut exister et qu'il n'y a rien d'autre que ce qui est sensible ; les idéalistes, croient qu'il y a plus dans l'Univers que le visible, et que l'invisible transcendantal nous restera toujours étranger.

Entre ces deux positions, la science ne tranche pas : même si nous découvrons un jour l'équation ultime qui régit tous les phénomènes, nous nous interrogerons toujours sur le pourquoi de l'existence de cette loi.

Le physicien s'est quelquefois étonné de l'universalité des lois physiques dans l'espace – les confins de l'Univers sont interprétables par les lois déterminées dans nos laboratoires terrestres. Leur immanence temporelle lui permet aussi de reconstruire les premiers moments de l'Univers (*voir les articles du dossier spécial de ce numéro sur la cosmologie nouvelle, pages 35 à 57*).

Y a-t-il vraiment lieu d'être surpris ? La matière, créée à partir d'une source unique, est contrainte par les lois qui permettent son existence ; aussi ces lois sont, par nature, intangibles. Plus les contraintes sont fortes, plus notre pouvoir est grand, car nous pouvons les analyser et prévoir le comportement des choses. Il semblerait que les contraintes soient tout juste suffisantes pour que nous puissions saisir le fonctionnement du monde. Selon les tenants du principe anthropique, qui expliquent que notre présence sur Terre impose des limitations à ce que peut être l'Univers, nous sommes comme *Boucle d'or* dans une maison cosmique ni trop mystérieuse ni trop simple.

PHILIPPE BOULANGER

Concision biologique

Nombreux sont les lecteurs qui abhorrent les descriptions. Nombreux sont les auteurs qui, sans pitié, les accumulent pages après pages. La technique va mettre tout le monde d'accord. Un romancier, peu porté sur les descriptions, a eu l'idée salvatrice : «Je rêve du jour où, la mise en fiches du génome humain enfin achevée, l'auteur donnera le signalement de ses personnages par une séquence d'ADN. Le lecteur n'aura qu'à taper le code sur son clavier d'ordinateur et, hey presto !, sur l'écran quinze pouces, il verra se dessiner l'exacte anatomie de la personne, ainsi qu'un menu : en cheveux, trois quarts, pleine peau, écorché...» (Fouad Laroui, *De quel amour blessé*, Julliard, 1998, p. 144.)

Marginale et fondamentale...

Certains objets de l'histoire des sciences sont devenus des vedettes de l'iconographie. Les hémisphères de Magdebourg, le baromètre de Torricelli, la machine à calculer de Pascal, l'ombre de Thalès au pied des Pyramides illustrent, avec une lassante persévérance, les livres d'enseignement ou les ouvrages de vulgarisation. Or l'objet le plus célèbre des mathématiques reste invisible. Jamais on ne voit reproduite la note portée à la main par Fermat dans la marge d'un livre, où il affirme avoir démontré son fameux «Grand Théorème». Il est vrai que la démonstration ne figure pas dans la note, Fermat ayant jugé la marge trop étroite. Il est vrai

que les commentateurs actuels sont convaincus qu'il n'avait pas de démonstration. N'empêche, cette marge a été à l'origine de 350 ans de travaux acharnés, ce qui l'a rendue légendaire. Elle mérite sans aucun doute de figurer en frontispice de tous les cours d'arithmétique. Pourquoi n'est-ce pas le cas ? La raison est aussi simple qu'imparable : le livre sur lequel Fermat a griffonné serait perdu – et sa marge avec. On n'en connaît l'existence que par l'intermédiaire d'un contemporain de Fermat. Les meilleurs mathématiciens ne peuvent montrer que ce qu'ils ont.

Toutes les disciplines ont leur Atlantide, leur objet perdu qui accède, par sa perte, à la dimension d'un mythe. Les plus belles tragédies grecques sont celles que nous n'avons plus, les livres de la bibliothèque d'Alexandrie étaient des chefs-d'œuvre comme nous ne savons plus en écrire, la musique n'a pas retrouvé le secret du vernis de Stradivarius, la sculpture a renoncé à connaître le visage de la Victoire de Samothrace... Il est révélateur de l'esprit des mathématiciens que leur objet perdu à eux soit non pas une démonstration, mais une absence de démonstration.

Une correction élémentaire

Le bon pédagogue est celui qui se trompe beaucoup devant les élèves – pourvu qu'il s'en rende compte et montre aux élèves où est l'erreur, comment elle se corrige et pourquoi il l'a faite. La presse, qui s'estime investie de la mission de nous familiariser avec l'euro, prend soin de donner l'équivalent en euros de toutes les

sommes en francs qu'elle mentionne. Se montre-t-elle bonne pédagogue ?

Assez bonne : elle fait des erreurs dans ce qu'elle nous enseigne, mais elle les corrige. Rapportant qu'un juge a estimé à «plus de 1 milliard de francs» les sommes ayant transité sur les comptes du financier Alfred Sirven, *Le Monde* du 5 janvier 1999 spécifie : 152 439 020 euros. Misère des calculettes ! Le chiffre avancé par le juge est un ordre de grandeur, et c'est une erreur de ne pas le manier comme tel.

Le journal aurait été plus pertinent s'il avait fourni comme équivalent (à son choix) 150 000 000 ou 160 000 000 d'euros.

Le lendemain, ce journal revient sur l'affaire, et cite le même chiffre en francs, donnant 152,5 millions d'euros pour équivalent. Cette fois, rien à objecter. Pour obtenir la médaille du parfait pédagogue, il aurait dû expliquer en quoi sa conversion de la veille était erronée. Mais l'essentiel n'est-il pas que le journal fasse des progrès et, dans son sillage, nous aussi ?

Un savant dîner... de leçons

Pour allécher le client, la quatrième de couverture d'*Un savant dîner* de John Casti (Flammarion, 1998) – ouvrage de vulgarisation censé se lire comme un roman – demande : «Quoi de plus délicieux que d'apprendre sans s'en rendre compte ?» La réponse est facile : il est encore plus délicieux de ne pas apprendre. Le principal plaisir d'un apprentissage – librement choisi, s'entend – réside dans l'effort qu'il exige. Comment parvenir au sentiment exaltant d'avoir vaincu une difficulté si on n'a eu aucun effort à faire ? L'idée d'un enseignement sous anesthésie – apprendre sans mal comme on se fait opérer sans douleur – est la plus fallacieuse qui soit. Pour paralyser toute aptitude à comprendre, rien de tel que de se présenter en roue libre devant l'obstacle, comme s'il allait se résorber tout seul. «Conférer au lecteur le droit d'accéder à l'intelligence des textes sans fatigue, voire avec de l'agrément, est d'une démagogie achevée.» (Georges Picard, *De la connerie*, éditions José Corti, 1994.)

Quant à *Un savant dîner*, qui expose sous forme dialoguée les pensées de Wittgenstein, de Turing, de Schrödinger, je l'ai feuilleté. Il n'a pas du tout l'air de se lire comme un roman. Alors, j'ai eu la flemme d'aller y voir de plus près. C'est donc sans aucune réserve que j'en recommande vivement la lecture.

Vers une extinction de l'informatique ?

Le bogue s'annonce terrible. Les ordinateurs, confondant 2000 avec 1900, sommeront les vieillards de 106 ans d'aller illico se faire inscrire à l'école ; les agios sur des impayés porteront sur une durée d'un siècle, ce qui fâchera à mort les débiteurs avec les propriétés de l'exponentielle ; les avions perdront à la fois leur sens de l'équilibre et celui de l'orientation, etc. Ces prévisions pèchent-elles par catastrophisme ? Non : par optimisme.

Car le problème est bien plus grave, et nous n'en parlons pas tant il fait peur. En 1900, les ordinateurs n'existaient pas. Donc si, arrivant à l'an 2000, ils se croient ramenés à 1900, ils cesseront aussitôt d'être : au douzième coup de minuit, ils retourneront au néant comme le carrosse de Cendrillon. Où ira la matière dont ils étaient faits ? Où s'envolera leur âme ? Belles questions théoriques dont disputeront les penseurs pendant tout le troisième millénaire – du moins ceux qui croiront aux ordinateurs ; les esprits forts, eux, nieront que ces machines magiques aient jamais pu exister. Ainsi, l'an 2000 verra l'espèce des ordinateurs s'éteindre brutalement, comme les dinosaures.

Retraites sonnantes

Qui va payer nos retraites? demandent Bernard Guerrien et Sophie Jallais (voir *Pour la Science*, janvier 1999). «Aujourd'hui, avec sept actifs pour trois inactifs, les actifs donnent 30 pour cent de ce qu'ils produisent aux inactifs» écrivent-ils. Or, actifs et inactifs ne sont pas les seuls intervenants dans la production et la consommation des richesses : n'oublie-t-on pas le rôle des machines et de leurs possesseurs? Ce n'est pas seulement le vieillissement de la population qui diminue le rapport entre actifs et inactifs, mais aussi (et principalement?) les machines qui remplacent l'homme. Le propriétaire d'une machine, qui produit des richesses, est-il un actif? Quand un actif, qui cotise pour sa retraite, est remplacé par une machine, celle-ci ne participe pas à sa place au paiement des retraites.

On peut toutefois noter que, à croissance économique nulle, la quantité de richesses produites chaque année reste constante et disponible pour la consommation par l'ensemble des actifs et des inactifs, indépendamment du rapport entre ces deux catégories. Tout est donc un problème de répartition de ces richesses.

Pierre PROVOST, Clamart

Je suis choqué par la présentation selon laquelle «les actifs» financent les retraites par répartition. Peut-être me répondrez-vous retenues salariales et patronales. Retenues sur quoi? Sur un salaire théorique.

Aujourd'hui, en arrondissant les chiffres, 1 franc de salaire net correspond à 1,25 franc de salaire brut et 1,78 franc de coût salarial (net plus charges salariales plus charges patronales). Pas un centime des cotisations correspondant aux charges salariales ne passe par la poche du salarié. Tout se passe comme si l'entreprise versait 1 franc de salaire net et 0,78 franc de cotisations sociales. C'est l'appareil économique, et lui seul, qui finance les retraites. Cela signifie que les salaires des actifs ne sont pas à l'origine du financement des retraites mais constituent simplement une «assiette» de cotisations, pour parler comme l'administration fiscale.

Le montant du salaire brut perçu assure au salarié un «droit de tirage» pour sa retraite. Les sommes nécessaires aux retraites futures pourraient être dégagées en changeant simplement l'assiette des prélèvements et le problème de financement des retraites ne se poserait qu'en cas de récession économique. La seule vraie difficulté sera alors de justifier la légitimité du prélèvement auprès des entreprises.

M.G. FENYÖ, Paris

Réponse de Bernard Guerrien et Sophie Jallais

La production est, par définition, le fait des seuls actifs. Elle a pour contrepartie des revenus, qui vont aux travailleurs (salariés) et aux propriétaires des machines. Celles-ci permettent d'augmenter la production, ou de la rendre possible avec moins d'hommes. Moins d'actifs font alors vivre la société. Dans l'article sur les retraites, nous n'avions pas abordé cet aspect des choses, en faisant l'hypothèse inactifs égaux retraités, car nous voulions attirer l'attention sur le fait que ce sont les actifs d'aujourd'hui qui font vivre les inactifs (retraités, en l'occurrence) d'aujourd'hui. Toutefois, l'article *Actifs et inactifs* (voir *Pour la Science*, février 1999) répond en bonne partie à cette question.

L'exemple de M. Fenyö est excellent. Le problème est de savoir ce qu'est le «salaire» : ce que reçoit le travailleur, ou ce qu'il coûte? En fait, dans le prix du produit, ce sera le coût salarial. Dans les 1,78 franc de ce coût il y a, disons, 0,40 franc de cotisations retraite (salariale ou patronale, peu importe). Ces cotisations vont, après passage dans l'«appareil économique», servir à payer les retraites «aujourd'hui» (les retraités achetant avec elles une partie du produit d'«aujourd'hui», celle qui correspond aux 0,40 franc). Et ainsi, la boucle est bouclée.

La question de la «légitimité» du prélèvement, auprès des salariés ou des entreprises, peut se poser effectivement. Mais cette légitimité est celle du droit à une retraite décente, et à un âge également «décent». Elle relève donc d'un choix de société.

Économie et échange

Dans *L'intelligence des robots* (voir *Pour la Science*, décembre 1998), Arab Ali Chérif évoque «l'économie», à propos des échanges entre les robots. Or, la théorie économique se heurte, dès le départ, à un problème essentiel : comment s'établissent les prix, base de l'échange? En effet, sans prix donnés, les échanges sont indéterminés. Dans l'exemple des robots, il semble qu'il y ait un gain d'utilité (ici, de l'énergie) pour que l'échange ait lieu. Rien n'étant dit sur la façon dont ce gain est partagé entre les robots concernés, on est en présence d'un processus complètement indéterminé, et l'allusion aux théories économiques est discutable, à moins de les réduire à la proposition triviale : «les gens font des échanges s'ils y trouvent un avantage».

Bernard GUERRIEN, Paris

Réponse d'Arab Ali Chérif

Dans ce modèle le prix de base des ressources est inscrit dans la constitution afin d'amorcer le processus collectif. Ce prix peut évoluer selon la rareté des biens ou des informations disponibles sur le marché. Les comportements d'économie de marché qui structurent notre groupe de robots sont le partage rémunéré de capacités sensorielles et la négociation pour l'achat et la vente d'information sur l'environnement. Par exemple, si un robot, après l'exploration d'une zone, découvre des voies sans issues, il peut mettre en vente cette information afin de faire économiser aux autres robots l'énergie nécessaire à la même exploration. En contrepartie, les robots acheteurs doivent rémunérer le robot offreur. Le paiement se fait par radio. À chaque transaction, le compteur crédits et débit de chaque robot est mis à jour, et la recharge des robots en énergie est proportionnelle à la valeur de ce compteur.

L'intelligence des machines

L'intelligence artificielle (voir *Pour la Science*, décembre 1998) permet de réaliser des machines qui tiennent tête aux champions d'échec, et parfois en triomphent. Les réalisations de certaines de ces prodigieuses machines à calculer sont si impressionnantes qu'elles peuvent engendrer admiration et espérances irrationnelles. Toutefois, quels que soient le nombre et la qualité des opérations que ces machines peuvent accomplir et la vitesse de ces exécutions, elles ne font que mettre en œuvre des recettes qu'on leur a apprises. Elles ne sont pas moins idiotes que ces personnes qui étonnent par leurs exceptionnels dons en calcul et sont malheureusement, mais légitimement déclarées idiotes au regard de leur comportement social. Les machines n'étonneront jamais leur concepteur par une invention personnelle. Elles savent mais n'imaginent pas. Descartes pensait à tort qu'un chien était une machine : une machine ne mord pas quand on l'énervé.

Gabriel BARRIÈRE, Nice.

Ecrivez 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* : tribune@pourlascience.fr. Indiquez Tribune des lecteurs dans la rubrique objet.

JEU-CONCOURS N° 57

PIERRE TOUGNE

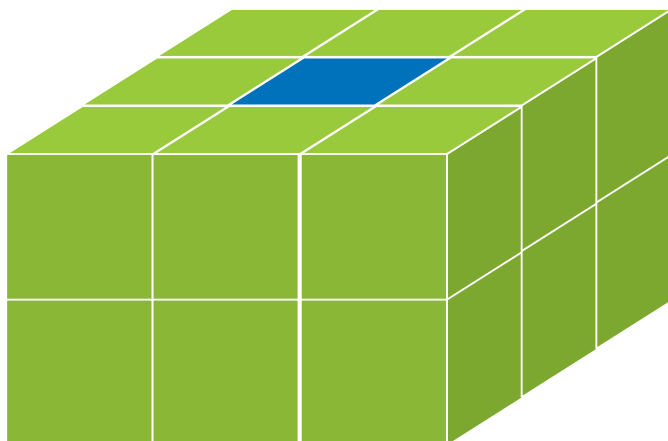
Problème d'hôtelier

Un hôtel parallélépipédique comporte 16 chambres (voir la figure ci-dessous). Les deux cubes intérieurs étant réservés au service et à l'accès aux chambres, nous n'épilouernerons pas sur le caractère réaliste de cet hôtel! Remarquons enfin que huit chambres sont communes à deux façades. N mathématiciens souhaitent s'y rendre pour un séminaire aux conditions suivantes :

1. Les 16 chambres doivent être occupées.
2. Aucune chambre ne peut recevoir plus de trois mathématiciens.
3. Les chambres de chaque façade doivent contenir 11 mathématiciens.
4. Au deuxième étage, il doit y avoir deux fois plus de mathématiciens qu'au

premier. Après quelques réflexions, l'hôtelier donne son accord. Malheureusement, le jour de l'arrivée, il manque trois mathématiciens. Cependant l'hôtelier réussit à les répartir en satisfaisant aux quatre conditions. Quel était le nombre de mathématiciens prévus initialement et comment avait-il prévu de les répartir? Enfin, comment a-t-il réparti ceux qui sont effectivement arrivés?

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à **Pour la Science**, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de mars 1999, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.



RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 55

À la grande surprise, il y a parmi les lecteurs un nombre non négligeable de technocrates bruxellois! Bien des méthodes pouvaient être utilisées pour sa résolution, en voici une algébrique. Désignons par r la ration journalière d'herbe consommée par une vache, x la quantité initiale d'herbe par are dans le pré et y la quantité d'herbe poussant par jour sur un are. V vaches consomment en J jours une quantité Vjr d'herbe. D'autre part, un pré de surface S ares produit en J jours une quantité d'herbe $S(x + Jy)$. Si le pré nourrit exactement V vaches en J jours, on a

$Vjr = S(x + Jy)$. En appliquant cette relation aux deux prés de 20 et 24 ares, on obtient les deux équations $100r = 20x + 80y$ et $135r = 24x + 120y$ dont on tire $x = 5r/2$ et $y = 5r/8$. Pour nourrir 100 vaches durant 16 jours, il faut que $1600r \leq S(x + 16y)$ soit $S \geq 1600r/(x + 16y)$. En remplaçant x et y par leurs valeurs trouvées précédemment, on obtient $S \geq 128$, soit 128 ares au minimum pour le pré. Comme quelques lecteurs l'ont remarqué ce jeu-concours n'est qu'une variante à peine déguisée d'un classique des récréations mathématiques : le problème des bœufs de Newton.



L'eugénisme

PIERRE-HENRI GOUYON

Il existe des degrés de l'eugénisme, qui doivent faire l'objet de débats.

L'eugénisme? Cette pratique qui consiste à «épurer l'humanité» de ses faiblesses génétiques est tabou. Pourtant les avancées de la génétique reposent le problème. Même s'il évoque des pratiques éminemment répréhensibles, le mot doit être évoqué : des analyses insuffisantes laissent subsister des idées antihumanistes qu'il est utile de déloger.

Précisons ma position avant de la défendre. Des parents atteints d'une maladie décident de ne pas avoir d'enfants : c'est déjà de l'eugénisme, mais individuel, et je ne le crois pas condamnable, loin s'en faut. Un État décide d'interdire la reproduction aux individus porteurs d'un gène particulier, jugé nuisible par ce même État : c'est de l'eugénisme d'État, qui me semble condamnable parce qu'il est une perte d'humanisme. Cette pratique ne place plus le respect de l'être humain en haut de la hiérarchie des valeurs. Or l'histoire a amplement montré que les systèmes qui n'ont pas été humanistes ont conduit à des atrocités.

Laisser aux parents le soin de décider du sort réservé à leurs descendants, est une position humaniste. L'individu humain détermine ce qu'il veut faire, sans être soumis à quelque chose qui serait plus important que lui.

Les pratiques eugéniques sont diverses : il y a eugénisme chaque fois que l'on tente de favoriser ou de défavoriser des gènes dans les générations à venir. Cette acception englobe l'eugénisme individuel évoqué précédemment ; notons d'ailleurs que, même chez des individus sains, la décision d'avoir ou non des enfants relève de l'eugénisme.

L'eugénisme d'État peut s'exercer de plusieurs façons : par élimination des individus adultes porteurs de «tares», par élimination des fœtus qui portent des gènes jugés nuisibles, ou par interdiction (condamnation pénale, voire stérilisation) à des individus porteurs de «mauvais» gènes de procréer pour la raison qu'ils transmettraient ces «mauvais gènes».

La première pratique est vite jugée inacceptable. La deuxième, en revanche, mérite une analyse éclairée par la génétique et par la théorie darwinienne de l'évo-

lution : l'avortement thérapeutique est eugénique quand il touche des fœtus qui se seraient développés en individus viables, mais on doit reconnaître qu'il ne change la constitution génétique de la population que s'il concerne des fœtus qui auraient atteint l'âge de la reproduction.

Culliver raconte que, pour les habitants de Lilliput, «rien n'était plus injuste que de laisser les gens procréer des enfants pour satisfaire leurs instincts, en s'en remettant à la société du soin de les faire vivre». La position de Swift a le mérite de poser clairement le problème de la responsabilité de la reproduction, problème accru par les progrès de la médecine : on sait aujourd'hui faire vivre jusqu'à l'âge de la reproduction des personnes atteintes de mucoviscidose.

La collectivité a-t-elle le droit de s'opposer à des naissances qu'elle doit ensuite assumer? Par exemple, lorsque deux individus souffrant de mucoviscidose atteignent l'âge adulte (ce qui arrive aujourd'hui), les enfants seront à coup sûr atteints de mucoviscidose et probablement orphelins.

La question n'est pas simple et les situations ne sont pas toujours aussi tranchées : par exemple, les procréations médicalement assistées visent à assurer une descendance à des personnes qui, parfois en raison de leur bagage génétique, ne peuvent se reproduire. La collectivité assume cette reproduction, alors qu'elle fait naître des individus qui risquent d'avoir le même patrimoine génétique «déficient» que leurs parents. La stérilité devient héréditaire!

Sur ce point, une mise en perspective évolutive est utile : si nos ancêtres avaient éliminé les individus non conformes à l'idée qu'ils avaient de leur espèce, qui était alors velue, ils n'auraient sans doute pas laissé se développer ces créatures glabres que nous sommes, car le gène de la perte de poils semble un fléau économique : il nous oblige à nous habiller et à nous chauffer l'hiver. Comble d'ironie, si un enfant humain naissait aujourd'hui avec un pelage normal, on le déclarerait anormal. Ce même argument vaut pour la plupart des maladies

que l'eugénisme voudrait supprimer. Si l'humanité entière était galactosémique, personne ne penserait à éliminer le gène de la galactosémie.

Les exemples précédents montrent la nécessité du débat social. Comment l'organiser? Des cas précis doivent être examinés, et les biologistes ont le devoir d'y participer. Ils ne devront pas tomber dans les travers de leurs prédécesseurs : Alexis Carrel et les généticiens des années 1930 (rares dans la France lamarckienne de l'époque, mais puissants dans les pays anglo-saxons, ce qui a amené la stérilisation de plusieurs dizaines de milliers de personnes aux États-Unis dans les années 1930 et a cautionné certaines pratiques nazies) étaient majoritairement eugénistes. Selon ces zélotes, c'était même un devoir sacré d'éviter que le patrimoine de l'humanité se détériore. En plus d'être dangereuse, leur position était naïve, notamment parce qu'on ne peut jamais prouver qu'un gène n'a pas d'effet bénéfique. De l'anémie falciforme (qui «protège» contre le paludisme) au «gène des centenaires» (associé à des infarctus avant 40 ans) en passant par le diabète, il semble que de nombreux cas existent où un même gène combine des effets positifs et négatifs.

Comment fonder une politique de santé publique qui tienne compte des avancées de la génétique moderne? Tout d'abord, la collectivité peut s'interdire des pratiques eugéniques, mais s'autoriser des conseils génétiques. Avec ses traditions humanistes, la France aurait un rôle à jouer dans le débat sur l'eugénisme. Ne jetons pas un voile pudique et larmarkien sur la génétique en général et sur ses implications concernant le comportement humain. La génétique conduit moins nécessairement à l'eugénisme, que l'ignorance et l'absence de réflexion, à la barbarie.

Pierre Henri GOUYON est professeur de génétique à l'Université Paris-Sud, à Orsay.



Chômage et flexibilité

BERNARD GUERRIEN ET SOPHIE JALLAIS

Une baisse des salaires diminue la consommation et n'entraîne pas toujours une hausse de l'emploi.

Avec l'avènement de l'euro, la maîtrise de l'inflation et des déficits des administrations publiques, les sages économistes, de la nouvelle Banque centrale européenne notamment, insistent sur les «réformes structurelles» du marché du travail, lequel ne serait pas aussi «flexible» que les autres marchés. Il ne manquerait plus que cette flexibilité pour assurer la croissance et la disparition progressive du chômage.

Qui peut être contre la flexibilité, et favorable à son opposé, la «rigidité»? Comme toujours, le choix des mots n'est pas innocent. Dans le cas présent, l'idée qu'ils véhiculent est plus que discutable.

FLEXIBILITÉ ET RÉGLEMENTATION

En économie, la «flexibilité», évoque plusieurs choses. Par exemple, au démantèlement de la réglementation existante. Un tel démantèlement contribuera-t-il nécessairement à l'emploi? Prenons l'exemple de l'ouverture des grands magasins le dimanche. Tout le monde a en tête l'exemple des «mégastores» qui l'ont exigée et pratiquée, même en payant de lourdes amendes. L'accent était alors mis sur l'afflux de la foule, qui profite du temps libre du dimanche, l'importance du chiffre d'affaires pour une seule journée et, incidemment, sur les quelques emplois créés. Cette activité dominante a une contrepartie : la diminution des achats en semaine. Les éventuels emplois créés dans les mégastores entraînent des pertes d'emplois ailleurs, notamment dans les magasins de moindre taille qui n'ouvrent pas le dimanche.

Certaines personnes, il est vrai, feront des achats le dimanche qu'ils n'auraient pas fait pendant la semaine, le mégastore devenant un lieu de promenade, où on se laisse tenter, mais ce qui est en jeu alors, c'est le fait que la «consommation est stimulée» (aux dépens de

l'épargne et de certains types d'investissement comme le logement).

FLEXIBILITÉ DES SALAIRES ET EMPLOI

Un autre volet de la flexibilité, c'est celle des salaires, à la baisse, bien sûr ! Cette baisse est directe – diminution de la somme versée, à temps de travail inchangé, ou indirecte – contrats à durée déterminée remplaçant des emplois stables, temps partiel imposé et travail intérimaire. Ces formes indirectes peuvent être assimilées à des baisses de salaire : là où, auparavant, quelqu'un travaillait 39 heures par semaine, avec des moments creux, quelqu'un n'en travaille, par exemple, que 30, sans creux, avec une rémunération diminuée en proportion.

On peut toutefois avancer que la baisse des salaires devrait augmenter l'emploi, et donc diminuer le chômage. L'argument est apparemment irréfutable : n'est-il pas évident que si le prix d'une marchandise diminue, sa demande augmente? Méfions nous de ce genre de constatation, où un seul aspect des choses est pris en compte. En effet, à un salaire plus faible correspond un revenu plus faible des salariés, dont la demande de biens risque de se ressentir : les économistes qualifient ce phénomène d'effet revenu de la baisse du salaire. Or, quand la demande baisse, les entreprises diminuent leur production et donc l'emploi. L'effet de la baisse de salaire est finalement incertain, car le salaire est à la fois un coût pour l'entreprise et un revenu pour le salarié. Afin d'évaluer ces deux effets, certains économistes ont construit des modèles mathématiques simples qui montrent que l'effet revenu peut être prépondérant. C'est là une des conséquences de la complexité d'un système formé de plusieurs personnes en interaction (un vendeur est aussi un acheteur), comme l'est toute économie.

RÔLE DES ANTICIPATIONS

Les idées que se font les entrepreneurs sur leurs ventes futures (ce que les économistes appellent les «anticipations») déterminent le niveau final de l'emploi, puisque ce sont eux qui embauchent ou débauchent, en fonction des débouchés et des profits qu'ils prévoient. Or les décisions des entrepreneurs ne sont pas sans conséquence sur le phénomène attendu puisqu'elles le provoquent ; ainsi, lorsque les entrepreneurs mettent en œuvre une production donnée – et embauchent en conséquence –, ils distribuent des revenus qui serviront à acheter leurs produits. Dans le cas où ceux-ci sont écoulés complètement, on dit qu'il y a équilibre, les entrepreneurs constatant que la demande est telle qu'ils l'avaient prévue au moment où ils avaient décidé de se lancer dans la production.

À l'équilibre, les croyances sont réalisées. À la différence de la physique, de la chimie ou de la biologie, l'équilibre économique n'est donc pas un phénomène objectif – qui dépendrait par exemple de caractéristiques intrinsèques, tels les goûts des consommateurs ou les techniques dont disposent les entreprises – puisqu'il fait intervenir de façon décisive la subjectivité des acteurs économiques. D'où les références constantes, dans les médias, au «climat des affaires» et aux humeurs des consommateurs ; d'où les enquêtes faites régulièrement par le très sérieux INSEE (Institut National des Statistiques et des Études Économiques) sur la façon dont les chefs d'entreprises voient l'avenir – vision qui détermine le niveau de production et d'emploi.

Les entreprises ne devraient donc pas se réjouir d'une baisse des salaires. Si, au niveau individuel, celle-ci peut leur paraître favorable, au niveau collectif, elle risque d'être accompagnée d'une baisse de la demande et, en conséquence, de leur être néfaste. La constatation est habituelle en économie : ce qui peut être bon au niveau individuel ne l'est pas toujours au niveau collectif.



Les «appareils» de l'enseignement

FRANCIS GIRES • NICOLE HULIN

Au XIX^e siècle, l'expérience était «le principe et le nerf de la science».

La physique expérimentale se développe en France, au milieu du XVIII^e siècle, sous l'influence de l'abbé Nollet, entraînant l'essor des cabinets de physique et du métier de constructeur d'instruments. Des «démonstrateurs de physique», vendant des appareils, montrent dans les collèges des phénomènes électriques ou magnétiques, des expériences dans le vide ou des objets au microscope.

Au XIX^e siècle, l'enseignement secondaire, quasi exclusivement réservé à la bourgeoisie, concerne moins de cinq pour cent des enfants (et seulement les garçons jusqu'à la loi Sée de 1880). Si l'étude de la physique est d'abord repoussée en fin de cursus, les progrès des sciences et des techniques imposent au système éducatif d'évoluer. Au début des années 1850, le baccalauréat ès sciences devient indépendant du baccalauréat ès lettres, et l'enseignement des disciplines scientifiques commence dès la troisième. Les instructions officielles recommandent aux professeurs de physique de «partir de l'expérience fondamentale toutes les fois que le sujet le permet», sans «décrire les instruments dans tous leurs détails». Des crédits sont prévus pour l'équipement des laboratoires, et les professeurs sont encouragés à construire eux-mêmes des instruments. Des épreuves pratiques sont introduites au concours d'agrégation. Au tout début du XX^e siècle, une réforme marquante est adoptée ; on y insiste sur le caractère expé-

mental de l'enseignement de la physique et l'on instaure des manipulations pour les élèves, mais nombre d'appareils des lycées sont jugés «surannés, mal conçus ou même absurdes» ; ils doivent être éliminés.

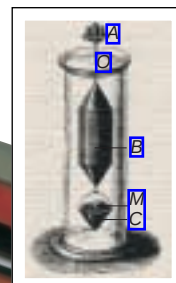
Récemment, 59 de ces objets, abandonnés dans les greniers des lycées, ont été rassemblés. On en trouve de trois types : les appareils à visée didactique (27) conçus pour vérifier les lois de physique, les instruments utiles (28), élaborés à partir d'un ou de plusieurs principes de physique, mais qui sont souvent des dispositifs de mesure (13), enfin, les objets récréatifs (3). Soulignons que certains instruments semblent ne pas fonctionner, et l'on s'interroge : les enseignants du XIX^e siècle faisaient-ils réellement des démonstrations ou se contentaient-ils de présenter l'instrument et de décrire une expérience dont les élèves devaient admettre le résultat ?

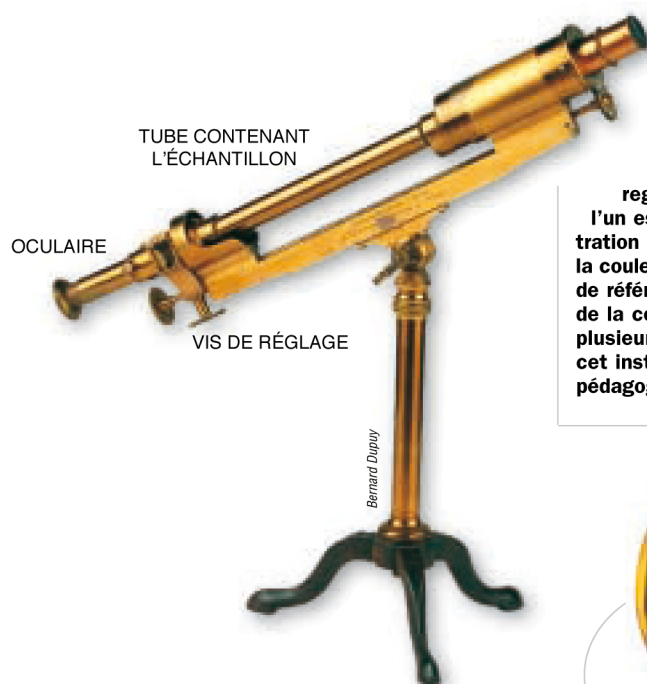
Dans cette collection, 11 instruments sont consacrés à l'électricité statique, 10 à l'optique, 9 à la chaleur, 6 à l'hydrostatique, 6 aux propriétés des gaz, 5 à l'électricité dynamique, 5 à la pesanteur, 4 à l'acoustique, 4 au magnétisme et 1 à l'astronomie. La collection de ces instruments et l'étude des textes explicatifs qui les accompagnent, réinterprétés à la lumière des connaissances du XX^e siècle, sont riches d'informations à l'heure de la nouvelle réforme des programmes de la physique enseignée dans les lycées.



LE MOUVEMENT PARABOLIQUE des objets en chute libre était mis en évidence sur cet appareil, décrit par l'abbé Nollet dans ses *Leçons de physique expérimentale*. Une bille, placée en haut de la gouttière (en haut à gauche) et abandonnée à elle-même, suit, à sa sortie de la gouttière, une trajectoire parabolique : elle passe par les deux anneaux, situés sur une parabole. En fait, cet instrument est trop sensible aux conditions initiales et aux frottements dans la gouttière : la bille ne passe pas toujours par les deux anneaux. Cet instrument semble être de ceux que l'on présentait en expliquant le résultat attendu, mais en se gardant bien de tenter l'expérience.

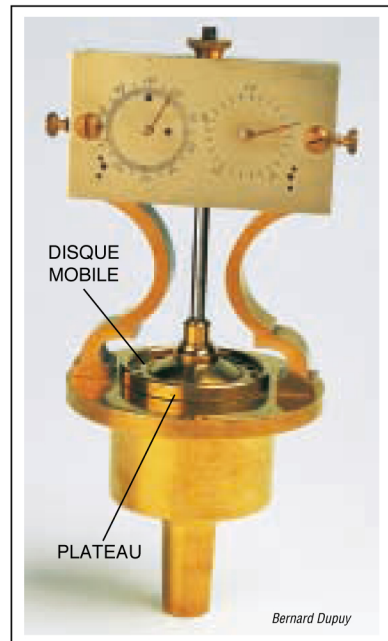
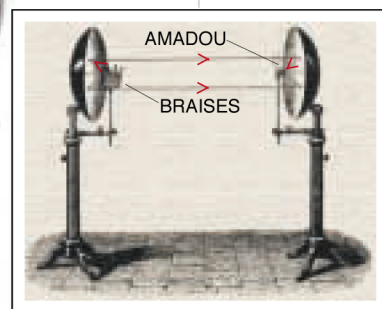
AREOMETRE DE NICHOLSON : l'instrument est constitué d'un cylindre creux (B), lesté d'un cône rempli de plomb (C) et surmonté d'une tige terminée par un plateau (A). Il sert à déterminer la densité d'un corps. On immerge l'aréomètre dans l'eau. On place le corps dont on veut déterminer la densité sur le plateau supérieur. On ajoute une tare pour que le repère (O) affleure à la surface de l'eau. Puis on enlève le corps et l'on ajoute, à sa place, des masses jusqu'à obtenir le même affleurement. Ces masses ajoutées représentent la masse du corps. Dans une troisième étape, sans toucher à la tare, on place le corps sur le plateau inférieur (M) et l'on ajoute des masses sur le plateau supérieur pour obtenir l'affleurement du repère. Ces masses équilibrent la poussée d'Archimède exercée par l'objet et représentent la masse d'eau qu'il déplace. La densité est égale au rapport entre la masse de l'objet et la masse d'eau déplacée.



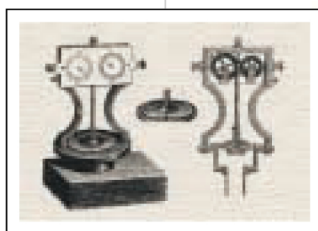


LE SACCHARIMÈTRE DE SOLEIL, du nom de son constructeur, servait à mesurer la concentration en sucre dans une solution, notamment dans l'urine des diabétiques. Une source de lumière est placée en haut à droite et la solution dans le tube central amovible ; l'observateur regarde dans l'oculaire en bas, à gauche. Il voit deux demi-cercles colorés : l'un est une référence, et la couleur de l'autre change en fonction de la concentration en sucre. En tournant la vis micrométrique proche de l'oculaire, on modifie la couleur de ce demi-cercle jusqu'à ce qu'elle soit identique à celle du demi-cercle de référence. Un index donne, sur une réglette préalablement étalonnée, la valeur de la concentration en sucre. Très facile à utiliser, cet instrument était fondé sur plusieurs polarisations et dépolarisations successives de la lumière incidente. Si cet instrument était utile sur le plan pratique, il n'avait aucun intérêt sur le plan pédagogique, tant son principe est compliqué.

MIROIRS CONJUGUÉS OU MIROIRS ARDENTS. Les axes de ces miroirs métalliques concaves coïncident. Au foyer de ces miroirs, on place deux corbeilles métalliques. Quand on dépose, dans l'une, des charbons ardents et, dans l'autre, de l'amadou, ce dernier s'enflamme, car la chaleur (des infrarouges) émise par les charbons ardents se réfléchit sur le miroir tout proche, puis sur le miroir opposé, pour, finalement, se focaliser au deuxième foyer, où l'amadou est placé.



LA SIRÈNE DE CAGNIARD-LATOIR est l'ancêtre des sirènes ; elle servait aussi à mesurer la fréquence des sons. Le plateau fixe de la boîte est percé de 16 trous inclinés à 45 degrés et supporte un disque mobile percé de 16 trous également, mais inclinés à 45 degrés en sens inverse. Grâce à une soufflerie actionnée par une pédale, de l'air est insufflé dans la boîte, ce qui met le disque mobile en rotation. L'air s'écoule chaque fois que les trous du disque et du plateau sont en regard. Cette succession d'écoulements d'air entraîne des variations de pression ; l'air entre en vibration et un son est émis. La rotation du disque étant plus ou moins rapide, la fréquence du son change. On peut la mesurer : le disque mobile est fixé sur un axe qui se termine par une vis sans fin, laquelle entraîne deux cadrans ; ces derniers enregistrent le nombre de tours du disque mobile. La fréquence du son (le nombre de vibrations par seconde) est égale au produit du nombre de trous percés dans le plateau par le nombre de tours que fait le disque en une seconde.



LE COUPE-POMMES était un instrument récréatif avec lequel on illustrait les effets de la pression atmosphérique. L'extrémité supérieure d'un vase en verre est terminée par un col recouvert d'une garniture métallique à bord tranchant. La base inférieure, ouverte, repose sur le plateau d'une pompe à vide. On place une pomme sur l'extrémité supérieure. Quand on fait le vide dans le vase, la pomme est « attirée » vers le bas : un cylindre de pomme, découpé par le couteau, finit par s'engouffrer dans le vase.





Bernard Dupuy

CARREAU MAGIQUE. Une étroite bande d'étain est repliée plusieurs fois, parallèlement à elle-même, et collée sur une plaque de verre. Des coupures sont pratiquées sur cette bande de façon à représenter un objet. Lorsque les deux extrémités de la bande sont reliées à une machine électrostatique capable d'engendrer des différences de potentiel de plusieurs milliers de volts, des étincelles jaillissent à chaque coupure du circuit. Dans le noir, on observe alors l'«image électrique» de l'objet dessiné par les coupures.

L'APPAREIL DE VAN HOPE met en évidence les variations de la densité de l'eau avec la température. On remplit l'éprouvette d'eau et l'on met de la glace dans le manchon métallique qui l'entoure. L'eau au contact de la glace se contracte, sa densité augmente et elle tend à s'accumuler au fond de l'éprouvette. Le thermomètre inférieur se stabilise à 4 °C. L'eau de la partie supérieure est moins dense : la température de cette zone descend à 0 °C. On en déduit que la densité de l'eau passe par un maximum à 4 °C.



Bernard Dupuy



Bernard Dupuy

APPAREIL À GRÊLE DE VOLTA. Une cloche en verre repose sur un plateau métallique en contact avec la terre. Une tige métallique centrale se termine à l'intérieur de la cloche par un plateau métallique et à l'extérieur par une boule. Des petites balles en moelle de sureau sont placées sur le fond. On relie la tige centrale à une source d'électricité (négative par exemple). Les balles de sureau se chargent par influence : les charges négatives sont repoussées du côté opposé au plateau, et la face en regard de celui-ci présente un défaut de charges négatives et apparaît donc positive (l'ensemble restant neutre). De ce fait, les balles de sureau sont attirées par le plateau, montent et s'y collent. Par contact, elles acquièrent une charge réelle de même signe que celle du plateau (ici négative), de sorte qu'elles sont repoussées par lui. Elles retombent sur le fond, qui est relié à la terre, et s'y déchargent. Puis le cycle recommence.



LA PILE THERMOÉLECTRIQUE DE MELLONI (à gauche) détecte des différences de

température de quelques centièmes de degré. Des barreaux de bismuth et d'antimoine sont soudés alternativement, en zigzag, et placés dans la partie centrale du dispositif. Les deux extrémités libres sont reliées par un fil de cuivre. Il ne se propage aucun courant tant que les diverses parties sont à la même température. Quand on chauffe les soudures d'un même côté, un courant prend naissance ; quand on les refroidit, un courant de sens opposé apparaît. Le courant est d'autant plus intense que l'échauffement ou le refroidissement sont importants. Ce courant électrique alimente un galvanomètre de Nobili (à droite). Un fil électrique gainé de soie (pour isoler les fils) est enroulé plusieurs fois dans le cadre central. Une aiguille aimantée est placée au centre de l'enroulement et une autre, dont l'aimantation est légèrement supérieure, au-dessus. Le pôle Nord de l'une est en regard du pôle Sud de l'autre. Quand on relie la pile au galvanomètre, un courant circule dans le fil, ce qui engendre un champ magnétique induit, lequel dévie les aiguilles. On mesure la déviation sur l'anneau gradué. Si l'on n'utilisait qu'une seule aiguille, placée au centre de l'enroulement, sa déviation serait freinée par l'action du champ magnétique terrestre qui tendrait à la ramener dans sa position initiale. La présence de la seconde aiguille a deux avantages : le champ magnétique de l'ensemble des deux aiguilles est très faible, de sorte que l'action du champ magnétique terrestre est négligeable. En outre, l'action du champ électrique sur l'aiguille intérieure s'ajoute à celle que subit l'aiguille extérieure. La déviation et donc la précision sont meilleures.

Bernard Dupuy

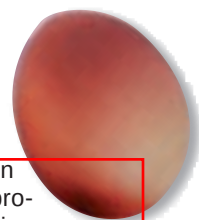
Francis GIRES, professeur de physique à Périgueux, a rassemblé ces instruments. L'exposition *Physique côté cours* qu'il a réalisée avec le musée du Périgord, à Périgueux, vient de recevoir le Prix exposition de la culture scientifique et technique 1998, décerné par le ministère de l'Éducation nationale, de la recherche et de la technologie. Nicole HULIN (Université Paris 6) est historienne des sciences au Centre Alexandre Koyré.



Questions...

HERVE THIS

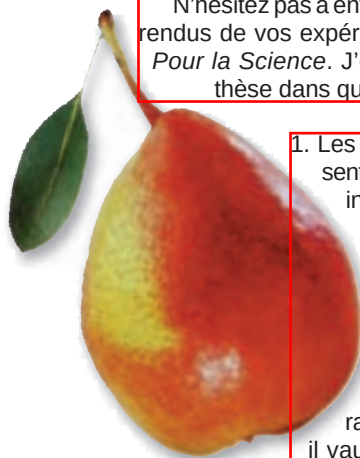
Des expériences simples suffisent-elles pour résoudre des on-dit culinaires ?



Dans cette rubrique, nous avons toujours présenté des résultats d'explorations de tours de main culinaires. Certaines questions ne seront résolues qu'au prix d'analyses fines, mais d'autres sont à la portée d'un expérimentateur équipé d'un matériel simple : une balance précise, un thermocouple, afin de mesurer la température, des éprouvettes graduées, du papier pH... Nous vous livrons quelques questions glanées dans les livres de cuisine, anciens ou modernes. Dans tous les cas, ne vous lancez pas trop vite dans l'interprétation : avant d'examiner les causes, vérifiez les effets. D'autre part, privilégiez les conditions opératoires de cuisine : un dicton peut devenir faux quand on le sort de son contexte.



N'hésitez pas à envoyer les comptes rendus de vos expériences à la revue *Pour la Science*. J'en ferai une synthèse dans quelques mois.



1. Les poires qui rougissent : dans un ouvrage intitulé *Le Cuisinier parisien*, publié en 1838, le chef Bernard Albert écrit à propos de compote de poires : « Comme les poires restent rarement blanches, il vaut mieux les avoir

rouges tout à fait ; il suffit pour

cela de mettre dans le sirop où elles cuisent un petit morceau d'étain fin ; ce morceau d'étain peut servir indéfiniment et son emploi n'a rien de malsain. Une casserole étamée produirait le même effet, mais si elle avait servi à d'autres usages, il faudrait auparavant y faire bouillir de la cendre pour en enlever tout ce qui peut être resté attaché à sa surface ».

L'expérience n'est pas difficile à faire ; si vous n'avez pas d'étain fin, vous pouvez utiliser du fil à soudure ou cuire votre compote dans une casserole étamée. Le chef ne donne pas les proportions

de sucre, d'eau et de fruit, mais sont-elles importantes ? Je vous laisse juger, et vous signale seulement qu'à ce jour, je n'ai jamais observé l'effet décrit.

2. Dans *La bonne cuisine de Madame Saint Ange*, l'auteur écrit que les oiseaux préparés en salmis ne doivent être que tièdes quand on les découpe : « S'ils sont découpés au sortir du rôti, tout leur jus s'écoulera des chairs. » Est-ce vrai et pourquoi ? Pour interpréter les phénomènes, n'oublions pas que la partie externe de la chair perd davantage son jus à la cuisson que la partie interne. C'est pour cette raison que les cuisiniers préconisent un repos des viandes rôties. Notons aussi que certains cuisiniers conseillent de laisser reposer les poulets rôtis en les plaçant en hauteur, sur une assiette, les suprêmes en dessous et le croupion en l'air, « afin de faire couler les jus dans les chairs les plus asséchées ».

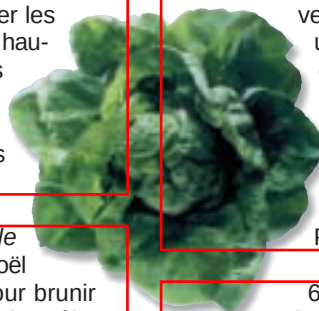
3. Dans *Le meilleur et le plus simple*, le chef parisien Joël Robuchon indique que « pour brunir des oignons que l'on passe à la poêle, ne pas les saler. » Pourquoi cet effet ? Pour étudier le phénomène, il est utile de se souvenir que les oignons sont composés de cellules, lesquelles contiennent de l'eau. Or un cristal de sel approché d'une cellule d'oignon provoque la sortie de l'eau contenue dans l'intérieur de la cellule, par osmose. Avant d'étudier la question, nous vous proposons de tester l'effet du sel sur des oignons qu'on laisse reposer sans les cuire. Qu'observe-t-on ?

4. Madame Saint Ange, encore elle, écrit que : « Dans une omelette, le lait ajouté doit toujours être cru ; bouilli, il se mélange mal à l'œuf. »

Pour interpréter le phénomène, si vous le vérifiez, pensez que le lait est une solu-

tion de divers sels, d'un sucre, le lactose, et de protéines solubles ; y sont dispersées des gouttelettes de matière grasse et des micelles d'une protéine nommée caséine. L'omelette, elle, est faite d'œufs, c'est-à-dire d'une solution aqueuse de protéines.

5. Des feuilles de salade mises à tremper dans de l'eau légèrement sucrée retrouvent du croquant, dit-on. Est-ce exact ? D'autres dictons mentionnent que les salades reprennent du croquant quand on les plonge dans l'eau glacée. Quel procédé est le meilleur ? Pour interpréter, on se souviendra que les salades sont composées de cellules qui contiennent de l'eau et divers sels. L'osmose est un phénomène qui pourrait intervenir. Question subsidiaire : un dicton japonais dit que des feuilles de salade flétrissent en présence de sel. Qu'observez-vous si vous recouvrez des feuilles de salade bien sèches avec du sel ? Pourquoi ?



6. Une expérience à faire en famille ou entre amis : on dit qu'une soupe trop salée peut être sauvée si l'on y plonge une pomme de terre pelée et cuite à l'eau. Est-ce efficace ? Pour ce test, il est utile d'avoir sous la main quelques dégustateurs et de pratiquer des tests « triangulaires ». On soumettra à chaque dégustateur un lot de trois bols, dont deux sont identiques. On aura tiré au hasard, pour chaque lot, le type de soupe qui sera dans un seul bol, ou bien dans deux bols : la soupe trop salée, et la soupe trop salée où l'on aura trempé la pomme de terre. Ne pas hésiter à soumettre plusieurs lots différents à la même personne : en notant la cohérence de ses réponses, on détermine sa fiabilité de dégustateur.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 25 mars 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

La carte d'identité des émeraudes

La composition en oxygène des émeraudes précise l'origine tant géologique que géographique de ces pierres précieuses.

Comme l'aigue-marine, bleue, la morganite, rose, ou l'héliodore, jaune, l'émeraude est une variété de béryl, constituée de béryllium, d'aluminium, de silicium et d'oxygène. La couleur verte, caractéristique de l'émeraude, est due à des traces de chrome et de vanadium. Leur proportion varie selon le contexte géologique des différents gisements et détermine la palette des tonalités de cette pierre précieuse. Comment peut-on retrouver l'origine géographique d'émeraude en apparence identiques ? Une méthode mise au point par les géologues de l'Institut de recherches pour le développement (IRD) et du Centre de

recherches pétrographiques et géochimiques (CRPG-CNRS), à Vandœuvre-lès-Nancy, complète les informations déjà disponibles.

Les gisements d'émeraude les plus anciens ont près de trois milliards d'années, les plus jeunes neuf millions d'années. Le béryllium entre dans la composition des granites provenant de la fusion de la croûte continentale, tandis que le chrome et le vanadium proviennent de roches du manteau. La réunion du béryllium, du chrome et du vanadium résulte de la rencontre fortuite de roches de la croûte et de roches du manteau, plus anciennes, remontées lors d'épisodes volcaniques ou de phénomènes tectoniques.

Ainsi, des fluides magmatiques, chauds et salés, riches en éléments volatils, et notamment en béryllium, se sont parfois infiltrés en suivant des fractures qui, par endroits, traversent les roches du manteau. Ils en ont extrait du fer, du magnésium, du chrome et du vanadium. Tous les éléments spécifiques de l'émeraude étaient réunis : la pierre a cristallisé. La majorité des gisements d'émeraude du Brésil, de Zambie ou d'Oural sont de ce type.

Au contraire, en Colombie, les gisements se sont formés lors de collisions de plaques tectoniques : sous l'effet des pressions exercées par ces bouleversements, les roches sédimentaires du bassin de la Cordillère orientale se sont fracturées, tandis que les eaux de bassins souterrains, chauffées à plus de 300 °C, ont dissous des couches de sel et formé des saumures, lesquelles ont réagi avec des schistes noirs contenant du chrome, du béryllium et du vanadium. Des veines de calcite se sont formées et ont servi de gangue aux émeraudes.

En cristallisant, les émeraudes ont piégé des éléments solides et des éléments liquides, témoins du contexte géologique et de leur mode de formation. Ces inclusions représentent la carte d'identité des pierres. Ainsi, les éme-

raudes d'un vert intense de la mine de Sandawana, au Zimbabwe, renferment une multitude de petits cristaux en forme d'aiguilles (des cristaux d'actinote). Celles de l'État du Minas Gerais, au Brésil, sont ornées d'inclusions solides de micas, et d'inclusions de gaz et de liquide ; quant aux émeraudes colombiennes des mines de Muzo et de Coscuez (d'un vert profond) ou de Chivor (d'un vert bleuté pâle), elles renferment des cristaux de calcite et des inclusions fluides triphasées de liquide, de gaz et de cristaux de sel.

Si les inclusions fournissent des informations, elles n'apportent pas de certitudes sur l'origine géographique des pierres et l'on s'est aperçu, par exemple, que des émeraudes d'Afghanistan contiennent des inclusions fluides identiques à celles des pierres de Colombie.

En revanche, le principal constituant des émeraudes, l'oxygène, livre de précieuses données : les géologues ont constaté que, pour un gisement donné, le rapport de deux des isotopes de l'oxygène (l'oxygène 18, ^{18}O , et l'oxygène 16, ^{16}O), est quasi constant et reflète le type de roches où les émeraudes se sont formées (deux isotopes ont des propriétés chimiques identiques, mais les masses de leur noyau diffèrent de sorte qu'on les distingue par certaines méthodes d'analyse physique, notamment par spectroscopie de masse). Ainsi, en Colombie, les rapports $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ sont supérieurs à ceux que l'on trouve au Brésil.

Toutefois, la méthode classique altère la pierre, et une nouvelle méthode d'analyse par sonde ionique a été utilisée : un faisceau d'ions pulvérise quelques centaines d'atomes, creusant un cratère de quelques micromètres de diamètre et de moins d'un nanomètre de profondeur, invisible à l'œil nu. Les atomes arrachés servent à la détermination du rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

En collaboration avec l'Association française de gemmologie, les équipes de l'IRD et du CRPG-CNRS ont établi une carte des rapports isotopiques des principaux gisements d'émeraude du monde (les valeurs se regroupent en trois familles, les rapports les plus élevés correspondant aux mines de Colombie et d'Afghanistan). Cette carte isotopique, qui reflète les conditions de formation des gisements, devrait aider les géologues à authentifier les pierres et à déterminer l'origine des émeraudes anciennes.

Marie-Thérèse LANDOUSY



Cristal d'émeraude (en bas) dans sa gangue de carbonates : il mesure environ deux centimètres de longueur et provient d'une mine de Colombie. Les inclusions formées lors de la cristallisation des émeraudes reflètent leur milieu de formation : ainsi, l'inclusion triphasée (a), qui mesure environ 100 micromètres et contient deux cubes de sel (en bas à gauche) et une bulle de gaz (au centre) en suspension dans un liquide, indique une provenance colombienne, tandis que l'autre inclusion (b) révèle une origine bulgare.

Le mildiou est une algue

Longtemps classé dans la famille des champignons, le mildiou est aujourd'hui considéré comme une algue.

Par les ravages dont il est la cause, le mildiou est l'un des micro-organismes les plus redoutés des viticulteurs, ainsi que des cultivateurs de pomme de terre et de betterave. Il est apparu en France en 1878, et les botanistes qui l'ont étudié l'ont classé dans la famille des champignons en se fondant sur des caractères anatomiques. Toutefois, à la lumière d'analyses génétiques récentes, ce végétal appartiendrait plutôt à la famille des algues.

Depuis 30 ans, les indices d'une mauvaise classification se sont accumulés. Les parois des cellules du mildiou sont composées de cellulose, et non pas de chitine comme celles des champignons. Le mildiou prélève les stérols (des lipides) dont il a besoin chez les plantes qu'il parasite, tandis que les champignons les synthétisent. Cette dernière différence explique notamment l'inefficacité des fongicides utilisés contre le mildiou : ils inhibent la synthèse des corps gras que le parasite ne fabrique pas ! En revanche, la bouillie bordelaise, le seul moyen de s'en débarrasser, contient du cuivre qui tue également les algues.

Les algues et le mildiou se reproduisent en libérant des zoospores, des cellules dotées de deux flagelles qui leur permettent de se déplacer dans l'eau, tandis que les champignons libèrent

des spores dépourvues de flagelles et incapables de se mouvoir par elles-mêmes (elles sont véhiculées par le vent et la pluie). Malgré ces preuves accablantes, le mildiou restait un champignon, car il fabrique un réseau de filaments nommé mycélium identique à celui des champignons (voir la figure).

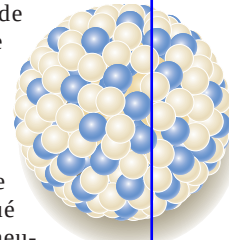
En 1988, le mycologue John Taylor, de l'Université de Berkeley, a effectué les premiers travaux de ce qui allait transformer radicalement la classification des végétaux. Il a comparé des séquences d'ADN impliqué dans la fabrication des ribosomes (des éléments cellulaires qui participent à la synthèse des protéines) de *Phytophthora infestans* (le mildiou de la pomme de terre), avec celles de champignons tels que des levures ou des moisissures. Les analogies observées l'ont conduit à reconsidérer la classification des champignons. Depuis 1994, le mildiou appartient à la famille des oomycètes, celle des algues.

Pendant les années qui ont suivi, les études génétiques effectuées par diverses équipes à travers le monde ont peu à peu remanié la classification des plantes. Ce qui était au départ une rectification phylogénique est devenue aujourd'hui une révolution botanique : tous les groupes traditionnels définis par des caractères anatomiques ont été redéfinis d'après les résultats des analyses génétiques. Certains caractères identiques sur lesquels on avait établi la parenté de deux espèces apparaissent aujourd'hui comme les résultats d'une évolution convergente d'organismes éloignés : les ADN – donc les organismes – diffèrent, mais les conditions environnementales ont façonné des caractères anatomiques voisins. Par exemple, les lotus que l'on croyait cousins des nénuphars sont aujourd'hui rangés dans le groupe des choux. Grandeur et décadence...

BRÈVES

Un pied sur l'îlot de stabilité?

Dans la course aux éléments lourds, l'élément 114 était activement recherché, car les théoriciens prévoyaient qu'il était particulièrement stable. En bombardant une cible de plutonium avec des ions calcium un mois durant, des physiciens de l'Institut de recherche nucléaire de Dubna, en Russie, auraient obtenu un «événement» qui résulterait de l'existence, 30 secondes durant, d'un isotope de l'élément 114 constitué de 114 protons et de 175 neutrons. Toutefois, ce résultat est loin d'être confirmé : les éléments fils qui résultent de la désintégration de l'élément 114 produit sont des isotopes difficilement identifiables. Toutefois cette observation permet aux physiciens de poser pied sur l'îlot de stabilité autour de l'élément 114.



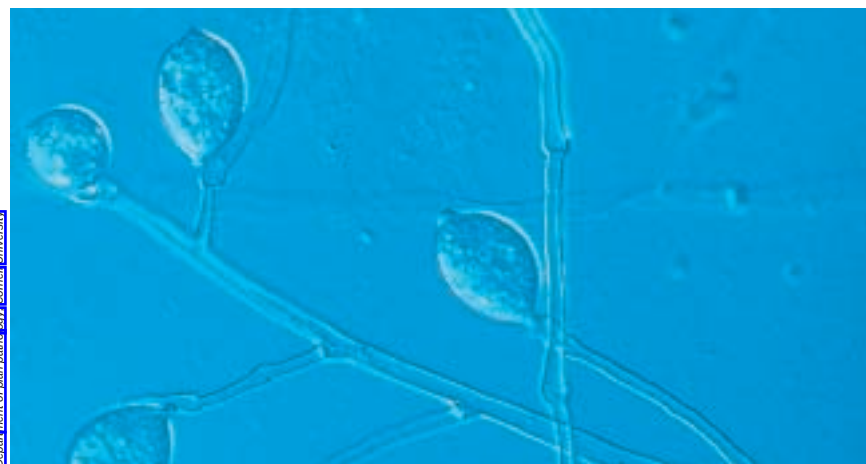
La révolution violette

Pour augmenter la densité de stockage sur les disques optiques, notamment les DVD, les physiciens réduisent la longueur d'onde des lasers utilisés pour écrire et lire les informations numériques. Grâce à la mise au point, par la société japonaise *Nichia Chemical*, de diodes lasers dont la longueur d'onde est égale à 400 nanomètres (dans le violet), la course vers les courtes longueurs d'onde vient de franchir une nouvelle étape. À quand la diode laser ultraviolette?

Réflecteur géant, pollution géante

Après l'essai d'un réflecteur géant en orbite le 4 février 1999, les astronomes s'inquiètent des conséquences néfastes que l'extension de cette technique aurait sur l'astronomie. Depuis des années, les astronomes du monde entier ont installé à grand frais de nombreux observatoires dans des zones reculées, qui ne sont pas affectées par la pollution lumineuse urbaine. Non seulement la pollution lumineuse qui résulterait de la mise en orbite de réflecteurs géants remettrait en cause l'efficacité de ces observatoires, mais elle serait également dommageable à l'observation de notre atmosphère à l'aide de radars. La radioastronomie a déjà été sacrifiée à l'autel des télécommunications; espérons que l'astronomie visible ne prendra pas le même chemin.

Suite page 22



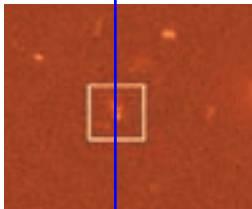
Mycélium de mildiou : c'est à cause du mycélium (les filaments) que le mildiou a été assimilé, à tort, à un champignon. Toutefois, pendant la reproduction sexuée, les champignons forment des spores démunies de flagelle, tandis que le mildiou, à l'instar des algues, produit des zoospores (contenues dans les sacs de 35 millièmes de millimètre de longueur) dotées de deux flagelles.

Infections urinaires jugulées?

Le premier vaccin contre les infections urinaires devrait être testé dans quelques mois. Il est destiné à lutter contre la bactérie *Escherichia coli*, responsable de près de 85 pour cent de ce type d'infections. Diverses bactéries portent des protéines spécifiques qui leur permettent d'adhérer aux tissus qu'elles infectent : la protéine FimH assure l'adhérence d'*Escherichia coli* à la vessie. Les animaux vaccinés avec cette protéine ont fabriqué des anticorps contre FimH. Ses molécules adhérentes neutralisées, la bactérie ne s'accroche plus à l'organe cible et ne l'infecte plus. Si le vaccin confirme les espoirs qu'il a fait naître, la vie de nombreuses femmes, principales victimes de ce type d'infections, devrait changer.

Le sursaut surprend

Le 23 janvier 1999, le satellite italien *Beppo-Sax* reçoit une intense bouffée de rayonnement gamma. Aussitôt, grâce à un système d'alerte automatique, les télescopes au sol pointent dans la direction indiquée et enregistrent une émission dans le visible qui provient d'une galaxie située à plusieurs milliards d'années-lumière. Alors qu'il y a quelques années encore, les astronomes s'interrogeaient sur l'origine de ces événements violents, ils savent aujourd'hui qu'ils proviennent de l'extérieur de notre Galaxie. Toutefois, l'énergie colossale produite par l'événement du 23 janvier – l'équivalent de plusieurs fois la masse du Soleil convertie en énergie – pose de nouvelles questions : aucun des mécanismes proposés jusqu'ici, telle la coalescence d'étoiles à neutrons, n'explique une telle débauche.



Mathématiques et football

Une loi régit-elle les scores des matchs de football? Michael Robinson, de l'Université du Surrey, et Mark Dixon, de l'Université de Londres, ont étudié les résultats de 7 000 matchs de football ayant eu lieu en Angleterre ; ils en ont déduit un modèle qui prévoit non seulement les scores des matchs, mais encore le score à différents moments du match. Le score n'est pas aléatoire, et il dépend du nombre de buts déjà marqués : quand l'équipe invitée gagne, les équipes adverses tendent à marquer davantage.

Suite page 24

Le stress du réveil

Une hormone de stress participe au réveil.

Chaque matin, la sonnerie du réveil nous tire du pays des rêves et nous laisse dans un état entre le stress et la tentation de se recoucher. Nous envions dans ces moments les personnes qui n'ont pas besoin de ces monstres sonores pour se réveiller. Une équipe de l'Université de Lübeck, en Allemagne, a montré qu'une hormone impliquée dans les mécanismes de stress participe au réveil naturel.

L'adrénocorticotrophine est une hormone sécrétée par l'hypophyse, glande située à la base du cerveau. Transportée par le sang, elle active les cellules des glandes surrénales qui sécrètent du cortisol et d'autres hormones de stress qui mettent l'organisme en alerte : pupilles dilatées, augmentation de la pression artérielle, état de vigilance.

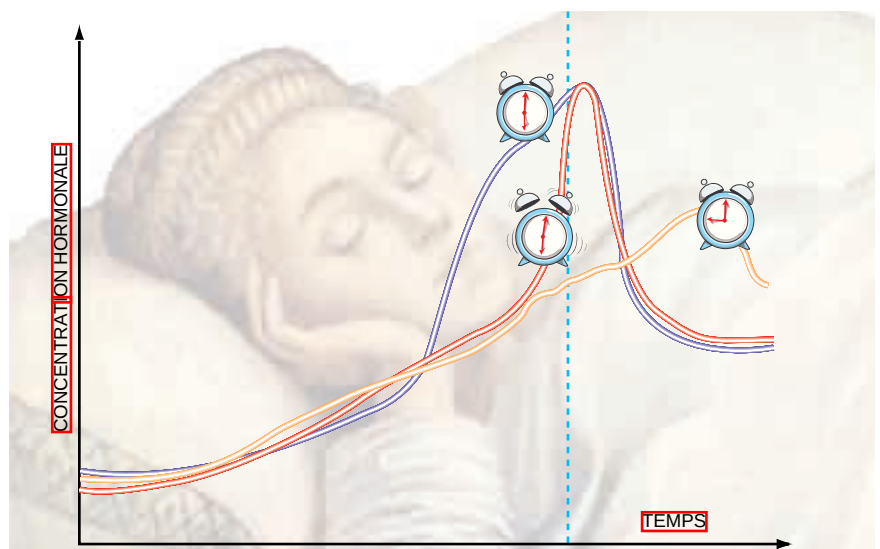
Les endocrinologues ont étudié 15 sujets choisis pour leurs rythmes de sommeil réguliers. Pendant la nuit, les activités cardiaque, musculaire et oculaire étaient enregistrées et les concentrations sanguines en adrénocorticotrophine étaient mesurées toutes les 15 minutes. Trois cas ont été comparés : certaines personnes étaient réveillées à 9 heures ; d'autres, qui connaissaient, avant de s'endormir, l'heure exacte du réveil, étaient tirées de leur sommeil par une sonnerie à 6 heures ; les dernières étaient

réveillées également à 6 heures, mais pensaient pouvoir dormir jusqu'à 9 heures. Un réveil à 6 heures est un réveil précoce, tandis qu'un réveil à 9 heures constitue presque une «grasse matinée».

Les résultats indiquent que l'organisme anticipe un réveil précoce d'environ une heure. La concentration en adrénocorticotrophine des sujets ayant connaissance de leur réveil à 6 heures augmente à partir de 4 heures 30 et est maximale une demi-heure après le réveil ; au contraire, la teneur hormonale des sujets réveillés par surprise atteint la même valeur, mais ne commence à augmenter qu'après le réveil. Par ailleurs, les enregistrements électriques montrent que l'anticipation hormonale du réveil apparaît toujours, que la personne endorme soit en phase de sommeil lent ou en phase de sommeil paradoxal (pendant laquelle les rêves surviennent).

Ainsi, notre horloge biologique prévoit l'heure de réveil et déclenche la libération d'adrénocorticotrophine, qui favorise la sécrétion de cortisol. L'organisme passe progressivement de l'état endormi à l'état éveillé. En revanche, un réveil à 9 heures ne constitue pas un stress : la concentration en hormone hypophysaire augmente peu (voir la courbe orange de la figure) et suit les rythmes physiologiques ordinaires.

Cette étude montre qu'un réveil à 6 heures (anticipé ou non) déclenche un état de stress : la production d'adrénocorticotrophine est supérieure à celle d'un réveil naturel. Elle indique également que le système nerveux est actif pendant le sommeil : l'idée d'un réveil précoce est présente à l'esprit. C'est un exemple d'anticipation inconsciente.



L'évolution des concentrations en adrénocorticotrophine, une hormone de stress, en fonction du temps montre qu'un réveil par surprise ou plus tôt que d'ordinaire constitue un stress. Pendant l'heure précédant le réveil, la concentration sanguine en adrénocorticotrophine des sujets qui connaissent l'heure du réveil (courbe bleue) et l'anticipent est supérieure à celle des sujets réveillés par surprise (courbe rouge). Les sujets réveillés à 9 heures (courbe orange) ne subissent pas de stress.

Photo du Sommeil de Saint-Louis de Vittore Caracciolo Venezia - Collège dell'Académie

Le ciel se couvre...

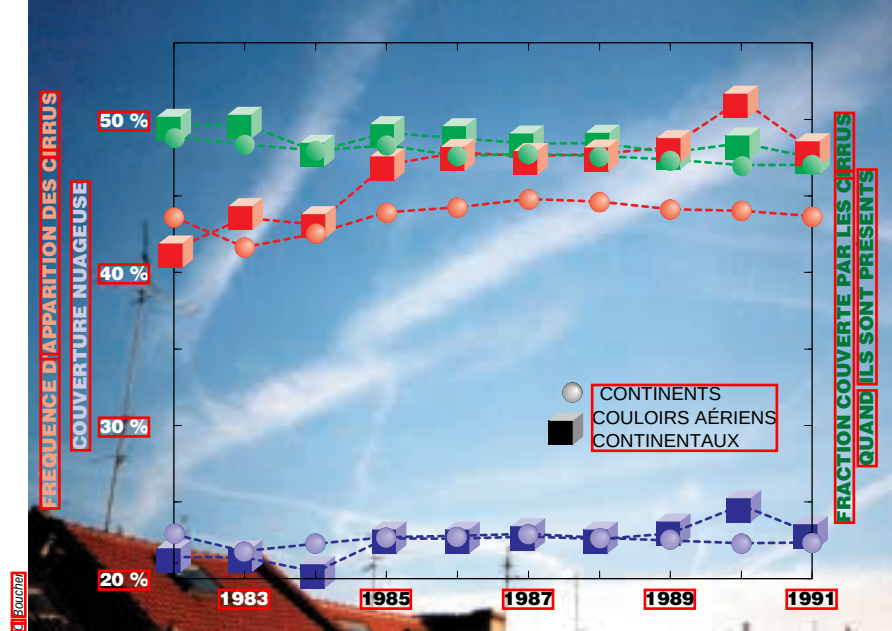
...dans les couloirs aériens.

Les nuages, croyons-nous, refroidissent l'atmosphère en réfléchissant le rayonnement solaire avant qu'il ne nous parvienne. Toutefois, l'augmentation du nombre de nuages créés par le trafic aérien pourrait, à terme, favoriser un réchauffement climatique global.

Les avions à réaction laissent parfois derrière eux dans le ciel des traînées blanches qui appartiennent à la catégorie des nuages hauts et fins nommés cirrus. Les traînées se forment aux altitudes de croisière des avions, entre 10 et 13 kilomètres, lorsqu'il fait assez froid (au plus -45 °C) et humide ; elles sont dues à l'émission, par les avions, de vapeur d'eau et de fines particules favorisant la condensation. Si l'air ambiant n'est pas saturé en vapeur d'eau, les traînées s'évaporent. Si, au contraire, l'air est saturé en vapeur d'eau, les traînées persistent dans le ciel : la vapeur d'eau ambiante se condense sur les cristaux de glace dont sont constituées les traînées. Celles-ci s'étendent, s'épaississent et évoluent parfois en un voile nuageux qui devient indiscernable d'un cirrus «naturel».

Une analyse détaillée de l'ensemble des observations visuelles réalisées par les météorologistes des stations météorologiques continentales et des navires révèle une augmentation notable de la présence de cirrus au-dessus des couloirs aériens entre 1982 et 1991. Cette augmentation est principalement visible au-dessus des États-Unis, de l'Europe et du couloir Nord-Atlantique.

Le trafic aérien, qui a progressé de trois à quatre pour cent par an au cours de la même période, est-il la seule cause de cet accroissement ? Des éruptions vol-



La fréquence d'apparition des nuages hauts et fins nommés cirrus a augmenté de 8,5 pour cent entre 1982 et 1991 au-dessus des couloirs aériens continentaux (cubes rouges) et de seulement 1,7 pour cent au-dessus des continents (sphères rouges). Simultanément la fraction de ciel couverte par les cirrus quand ils sont visibles (en vert) a légèrement diminué. Pour l'instant, la couverture nuageuse totale par les cirrus (en violet), qui favorise l'effet de serre, a donc peu augmenté. Le risque existe toutefois qu'elle croisse si le trafic aérien poursuit son augmentation dans les mêmes conditions qu'aujourd'hui.

caniques importantes, un changement d'humidité dans la haute atmosphère de ces régions, ou une oscillation climatique, pourraient aussi l'expliquer. L'évolution temporelle de l'augmentation du nombre de cirrus ne s'accorde toutefois pas avec les grandes éruptions volcaniques de 1982 et de 1991, ni avec les variations des indices climatiques habituels. De plus, les analyses météorologiques indiquent plutôt une baisse de l'humidité aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord.

Les cirrus contribuent à l'effet de serre de notre planète : ils absorbent le rayonnement infrarouge émis par le sol et par l'atmosphère, mais n'en réémettent qu'une partie vers l'espace. La réflexion du rayonnement solaire par les cirrus ne compensant pas leur absorption du rayonnement infrarouge, une augmentation de leur couverture contribue au réchauffement du climat.

Aujourd'hui, les cirrus sont plus nombreux, mais leur étendue individuelle moyenne a diminué (les traînées des avions créent de petits cirrus) : leur couverture globale, produite de la fréquence d'apparition des cirrus par leur étendue moyenne, n'a que peu augmenté. L'effet de serre associé aux traînées reste donc faible comparé à celui associé aux gaz à effet de serre d'origine humaine. Toutefois, les économistes prévoient une croissance annuelle du trafic aérien de six à sept pour cent jusqu'en 2050. Le délai de conception d'un avion et sa durée d'exploitation étant longs, nous pouvons réfléchir dès aujourd'hui aux mesures à prendre et aux techniques à mettre en œuvre pour que l'impact de l'aviation sur l'atmosphère et sur le climat reste limité.

Olivier BOUCHER,
Lab. d'optique atmosphérique, Lille

Le glioblastome

L'inhibition de la production d'un facteur de croissance présent dans ce type de tumeur, en bloque le développement.

Le traitement des cancers progresse lentement, mais certaines de ces maladies sont plus rebelles que d'autres. Le glioblastome, responsable de quelque 20 pour cent de toutes les tumeurs cérébrales, touche environ

3 000 personnes par an en France, et la durée de survie est faible. Des essais de thérapie génique ont déjà eu lieu aux États-Unis et en France, mais, jusqu'à présent, les résultats ont été plutôt décevants. Nous pensons les améliorer en utilisant une méthode qui détruit spécifiquement les cellules des glioblastomes.

L'histoire a commencé avec la chute du dogme selon lequel certaines molécules sont spécifiques du développement embryonnaire. Contrairement à ce qui était admis, on a découvert que certaines protéines, présentes chez l'embryon, disparaissent chez l'adulte, mais qu'elles

réapparaissent dans les tissus cancéreux. Ainsi divers facteurs synthétisés lors du développement ont des homologues dans les tumeurs : nous avons montré que l'alphafœtoprotéine, une oncoprotéine, est présente au cours du développement normal du système nerveux central et au cours de la formation pathologique d'une tumeur chez la souris (cette tumeur, ou tératocarcinome, ressemble au tissu nerveux, mais son aspect est plus désordonné).

Puis, nous avons identifié une oncoprotéine présente dans les cellules tumorales gliales (ces cellules produisent notamment la gaine de myéline qui entoure

L'infarctus, maladie auto-immune?

Certains anticorps dirigés contre des molécules du soi (des autoanticorps) et présents dans le muscle cardiaque sont plus fréquents chez les personnes atteintes de maladies cardio-vasculaires que chez les bien portants. Ces autoanticorps, dirigés contre les récepteurs bêta adrénergiques, interviennent dans la transmission des signaux dans les cellules cardiaques et ils en perturbent le fonctionnement. Ces récepteurs seraient en permanence activés par les autoanticorps. Pour qu'un traitement inhibant ces récepteurs bêta adrénergiques soit efficace, il devrait être associé à un inhibiteur des autoanticorps.

Planning familial chinois

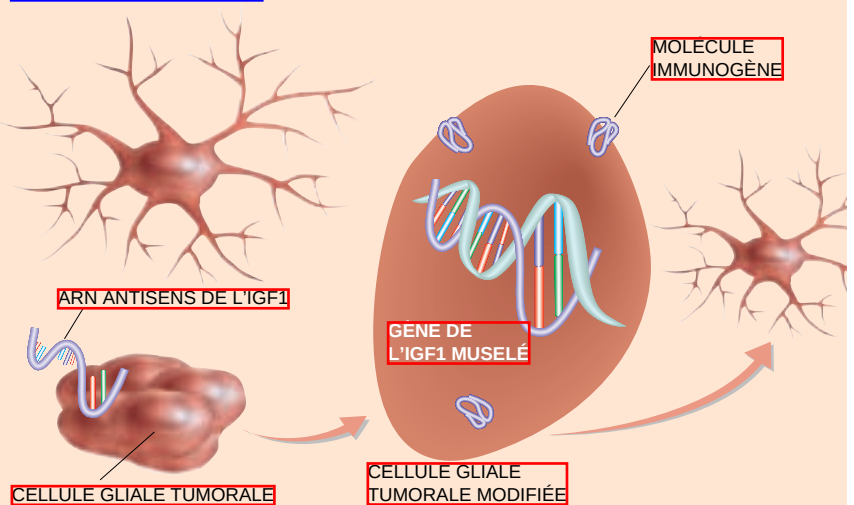
Après avoir tenté de limiter à un le nombre d'enfants par famille, le gouvernement chinois semble relâcher la contrainte : à la place de la ligature irréversible des trompes, naguère obligatoire après le premier enfant, les cliniques de planning familial proposent la pose de dispositifs intra-utérins (au-delà de deux enfants, les femmes n'ont plus le choix). On conseille aux femmes ayant déjà un enfant de se faire avorter. Quand une femme refuse et que son premier enfant est un garçon, elle est contrainte de payer une taxe (parfois trois fois le salaire annuel des parents, pendant cinq ans). Quand le premier enfant est une fille, les parents n'ont rien à payer.



Bactérie de termite

Quelques espèces de termites se nourrissent de bois ou de plantes et sont nuisibles, mais plus de la moitié des 2 300 espèces connues s'alimentent de végétaux dégradés. La matière organique ingérée est hydrolysée dans le tube digestif, de sorte que les macromolécules, telle la lignine, sont transformées en petites molécules, ensuite dégradées par la flore intestinale. Les biologistes de l'Institut de recherche pour le développement ont découvert une bactérie dans un termite du Congo qui est capable de dégrader, en l'absence d'oxygène, l'acide hydroxybenzoïque, composé aromatique très difficilement biodégradable. Ces bactéries de l'intestin des termites, capables de dégrader des composés très résistants, seraient-elles, un jour, utilisables comme dépolluants?

CELLULE GLIALE NORMALE



Dans les glioblastomes, les cellules gliales tumorales sécrètent le facteur IGF1 qui participe à leur multiplication. Quand ces cellules tumorales modifiées par thérapie génique expriment un ARN antisens de l'IGF1, cette molécule se colle à l'ARN de l'IGF1 produit au cours de la synthèse de la protéine. L'ARN de l'IGF1 est ainsi muselé et le facteur de croissance tumoral n'est plus synthétisé. De surcroît, les cellules tumorales se mettent alors à fabriquer des molécules qui activent le système immunitaire, lequel détruit les cellules de la tumeur.

les prolongements des neurones, lesquels assurent la transmission de l'influx nerveux). Cette protéine est absente des cellules neuronales. Cette oncoprotéine est le facteur de croissance IGF1. Également produite au cours du développement embryonnaire, chez la souris, ce facteur joue un rôle important dans la maturation des cellules du système nerveux central (quelques résultats indiquent même qu'une augmentation de la concentration en IGF1 au cours du développement serait associée à certaines anomalies congénitales, telle la macrocéphalie).

La production du facteur IGF1 entraînant la croissance tumorale, peut-on, en bloquant sa synthèse freiner la multiplication des cellules gliales tumorales, voire faire régresser une tumeur établie? Pour le savoir, nous avons commencé par introduire dans des vecteurs (des constructions génétiques artificielles), des séquences géniques qui produisent des ARN antisens de l'IGF1, c'est-à-dire des molécules complémentaires de l'ARN de l'IGF1 (l'ARN est une molécule intermédiaire, lors de la fabrication des protéines). Les ARN antisens se fixent sur les ARN normaux de l'IGF1, produits par les cellules tumorales, et les bloquent, interdisant la traduction de l'ARN en protéine : les cellules tumorales cessent de produire le facteur de croissance IGF1.

Puis le vecteur viral a été introduit, *in vitro*, dans une lignée de cellules de glioblastome : toutes les cellules gliales tumorales modifiées produisent une grande quantité d'ARN antisens et elles changent d'aspect.

Après cette étape, il nous fallait passer aux tentatives *in vivo*. Quand on injecte à des rats des cellules glioblastiques non transformées, une tumeur se développe après une dizaine de jours. Lorsque les mêmes cellules glioblastiques sont préalablement transformées avec le vecteur qui produit l'ARN antisens du facteur IGF1, aucune tumeur ne se développe. De surcroît, quand une tumeur existe et que l'on injecte des cellules gliales transformées, la tumeur disparaît, laissant la place à un amas de lymphocytes γ cytotoxiques, qui ont détruit les cellules tumorales.

Cette observation montre que le système immunitaire a reconnu les cellules tumorales modifiées, alors qu'il ne détecte pas les cellules tumorales non modifiées : de façon étonnante – et c'est l'une des clés du succès apparent de la méthode – les cellules tumorales se mettent à fabriquer, après l'introduction du vecteur supprimant l'IGF1, des antigènes qui activent les lymphocytes γ cytotoxiques qui leur sont spécifiques. Récemment, nous avons confirmé le phénomène dans le cas d'une autre tumeur (une tumeur du foie) exprimant l'IGF1.

Ainsi, pour lutter contre le glioblastome, nous proposons de modifier des cellules gliales tumorales pour qu'elles produisent de l'ARN antisens de l'IGF1 et qu'elles activent les lymphocytes γ cytotoxiques qui leur sont spécifiques. Des essais cliniques devraient évaluer la valeur thérapeutique de cette stratégie.

Jerzy TROJAN – INSERM, CRI 9701, Paris

Évanescentes

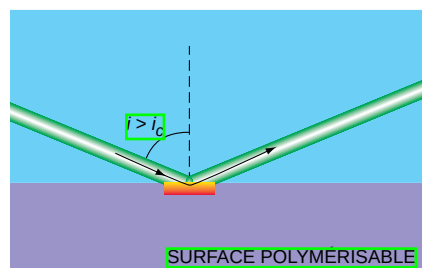
Des ondes qui sculptent la matière.

Dans la course vers la lithographie de petits éléments, les physiciens sont confrontés à une limite absolue : la diffraction. Ainsi la taille des structures est limitée à la moitié de la longueur d'onde de la lumière utilisée. Pour obtenir des objets de quelques nanomètres de dimension, on utilise habituellement des sources de rayonnements ultraviolets, X, voire des faisceaux d'électrons, extrêmement onéreux.

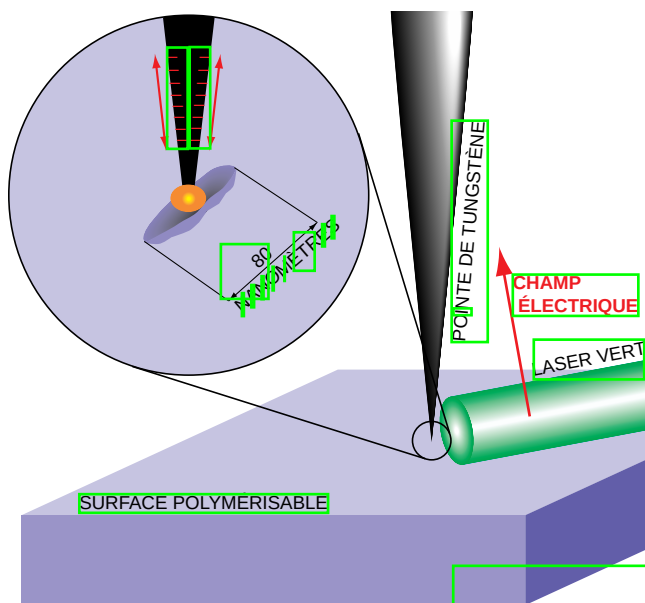
A l'aide d'ondes évanescentes, des ondes électromagnétiques qui effleurent la matière, des photochimistes de l'École supérieure de chimie de Mulhouse et des physiciens de l'Université de technologie de Troyes ont fabriqué des structures dont la dimension est 100 fois inférieure à celle de la longueur d'onde utilisée.

En stéréophotolithographie, les petites structures sont façonnées par solidification d'un liquide de monomères qu'un laser polymérise (un polymère est un assemblage rigide de nombreux monomères). L'épaisseur minimale des couches, ou résolution, dépend de la taille de la tache de focalisation de la lumière. Or, en optique, les phénomènes de diffraction limitent cette focalisation à la moitié de la longueur d'onde de la lumière. Pour obtenir des structures encore plus petites, les photochimistes ont eu l'idée d'utiliser des ondes évanescentes.

Examinons une onde électromagnétique qui passe d'un milieu d'indice de réfraction élevé à un milieu d'indice inférieur. Lorsque l'angle d'incidence est supérieur à un angle critique, en incidence rasante par exemple, l'onde est totalement réfléchie. Une onde, dont l'intensité décroît très rapidement, est créée dans le milieu d'indice de réfraction faible :



1. Lors de la réflexion totale d'une onde électromagnétique, une onde évanescence est émise dans le milieu d'indice inférieur, i_c (zone orangée). Comme l'intensité de cette onde décroît rapidement avec la profondeur, elle durcit la surface sensible sur quelques nanomètres d'épaisseur.



2. Lorsque les physiciens éclairent la pointe métallique d'un microscope à force atomique avec un laser vert, il se crée des ondes évanescentes à son extrémité. Le champ électrique du laser fait alors osciller les électrons du métal. Cette oscillation accroît localement l'intensité des ondes évanescentes (zone jaune) qui sculptent la surface photosensible située sous la pointe en une structure de taille cinq fois inférieure à la longueur d'onde du laser utilisé.

c'est une onde évanescente. Tout se passe comme si, avant d'être réfléchi, l'onde pénétrait légèrement dans le milieu d'indice inférieur.

Effleurant ainsi la matière, cette onde peut durcir un monomère sur quelques nanomètres d'épaisseur. Par exemple, en créant des ondes évanescentes à l'aide d'un prisme, les chercheurs ont construit des couches dont la hauteur ne dépassait pas quatre nanomètres (voir la figure 1).

La résolution verticale obtenue est excellente, mais peut-on créer des structures dont la résolution verticale et la résolution horizontale soient inférieures à la moitié de la longueur d'onde utilisée ? Autrement dit, peut-on passer d'une meilleure résolution dans une dimension (la hauteur des couches de polymère), à une meilleure résolution dans les trois dimensions spatiales ?

Des physiciens ont alors eu l'idée de combiner des ondes évanescentes et l'effet de pointe. Dans ce cas, on utilise non pas des ondes évanescentes créées

par réflexion totale sur un prisme, comme précédemment, mais des ondes évanescentes obtenues par diffraction sur un objet de taille inférieure à la longueur d'onde de la lumière. En effet, lorsque un objet diffracte de la lumière, deux sortes d'ondes sont créées : des ondes propagatives dont la longueur d'onde est au plus égale à la moitié de la longueur d'onde initiale et des ondes évanescentes, confinées près de l'objet.

Quelle est le principe de l'expérience ? L'extrémité d'une pointe de tungstène de quelques nanomètres de diamètre est placée au contact d'une surface polymérisable (un liquide composé d'un monomère et de «photo-initiateurs»). Cette pointe est éclairée avec un laser durant quelques secondes, de sorte que la surface sensible absorbe une énergie inférieure à celle nécessaire à sa solidification. Cet éclairage engendre cependant des ondes évanescentes localisées autour de la pointe. C'est là que l'effet de pointe intervient.

L'éclairage de la pointe métallique par un champ électrique quasi parallèle à l'axe de la pointe et créé par un faisceau laser fait vibrer les électrons de la pointe (voir la figure 2). Comme le diamètre de la pointe est de plus en plus petit à mesure que l'on se rapproche de l'extrémité, la densité spatiale de charges devient très importante au bout de la pointe. Autrement dit, cet effet augmente l'intensité du champ électromagnétique au bout de la pointe, de sorte que celle-ci polymérise la solution sensible très localement.

Grâce à cette amplification des ondes évanescentes, les physiciens ont obtenu de manière reproductible des structures inférieures à 100 nanomètres, cinq fois moins que la longueur d'onde du laser incident (540 nanomètres).

Ainsi, la limite de diffraction n'est plus un obstacle : ce n'est plus la longueur d'onde de la lumière qui importe, mais son confinement. Non seulement les ondes évanescentes serviront à la miniaturisation d'éléments plastiques, mais aussi en optique, en holographie, voire pour des applications jusqu'alors réservée à la lithographie X.

Symbiose de galaxies

Une petite galaxie spirale au cœur d'une galaxie géante.

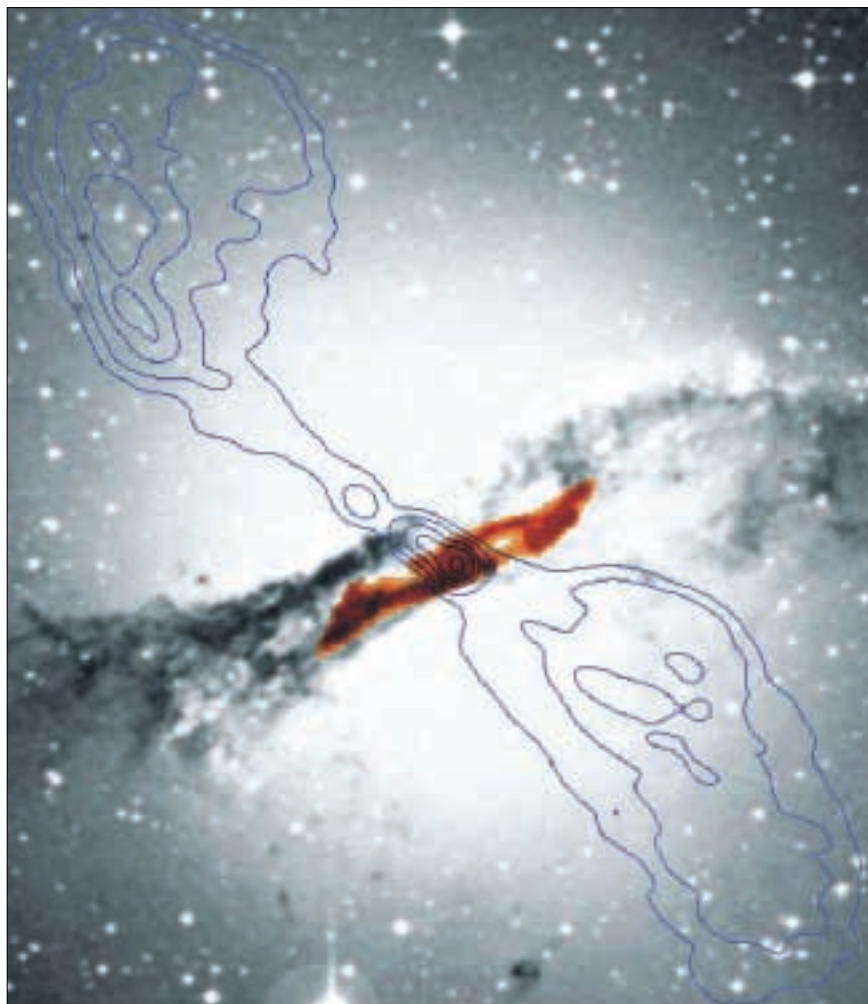
Les radiogalaxies géantes sont des galaxies dont la région centrale, vraisemblablement constituée d'un trou noir massif, a éjecté une grande quantité de matière sous forme de jets. Ces jets émettent un fort rayonnement radio. Les jets de la radiogalaxie Centaurus A sont si étendus que la galaxie a dû éjecter de la matière durant un milliard d'années ! Comment alimenter aussi longtemps le trou noir central ? À l'aide du télescope infrarouge ISO, Félix Mirabel, Olivier Laurent et leurs collègues du CEA ont découvert, au centre de cette radiogalaxie, une galaxie spirale dont

la structure rémanente alimenterait le trou noir.

La caractéristique essentielle des radiogalaxies étendues est la taille des jets. La matière éjectée par Centaurus A s'étend ainsi à près de 500 000 années-lumière de part et d'autre de la région centrale. Cachée par un grand disque de gaz, cette région abriterait un trou noir massif. Aux longueurs d'onde visibles, le disque de gaz absorbe tout le rayonnement, de sorte que l'on ne peut rien distinguer de sa structure interne. Dans l'infrarouge proche (entre un et deux micromètres), l'absorption est moindre, mais l'intense émission des vieilles étoiles de la galaxie elliptique qui entoure le disque de gaz est la seule visible. En revanche, à des longueurs d'onde de l'infrarouge moyen et lointain (entre 5 et 16 micromètres environ), les astronomes observent l'émission du gaz situé à l'intérieur du disque. À

leur grande surprise, ils ont découvert que ce gaz central avait la morphologie d'une galaxie spirale barrée. Les analyses de cette structure ont permis la reconstitution des événements qui ont précédé à la formation de Centaurus A.

Voici des milliards d'années, une galaxie elliptique géante est entrée en collision avec une petite galaxie spirale. Cette dernière a alors été complètement phagocytée, et la matière qui la constituait a formé un disque de gaz et de poussière au centre de la galaxie elliptique. Or, la présence d'une galaxie elliptique autour du disque stabilise ce dernier, tout comme la présence d'un halo autour de notre Galaxie la stabilise. Ainsi, le disque de gaz au centre de Centaurus A est stable depuis des milliards d'années. Dans ce disque, des instabilités ont formé une structure spirale et une barre constituée d'étoiles et de gaz. Cette structure de barre se serait



© NASA, ESA, J. Huchra

Cette superposition d'images illustre la structure de la radiogalaxie Centaurus A. Le fond est une image dans le visible où l'on distingue un disque de poussière opaque, au cœur d'une galaxie elliptique. L'émission radio (ν) provient d'électrons éjectés à très grande vitesse par le trou noir central. L'émission infrarouge centrale (ν), observée à l'aide du satellite ISO, a

maintenue durant un milliard d'années en raison du déclenchement permanent de nouvelles « instabilités spirales » dans le disque. Grâce à cette barre, une sorte de tuyau d'alimentation géant, la matière des régions externes du disque est transportée vers le trou noir qui l'éjecte en de puissants jets.

Si c'est la première fois que ce mécanisme symbiotique est observé, les astro-

nomes s'interrogent sur son universalité : est-il à l'origine de toutes les radiogalaxies géantes observées ? Les autres radiogalaxies sont malheureusement trop lointaines pour que l'on puisse les utiliser pour répondre à cette question. Seuls des télescopes spatiaux, tel le *NGST* (un super télescope spatial qui sera lancé entre 2007 et 2010), seront en mesure d'apporter une réponse.

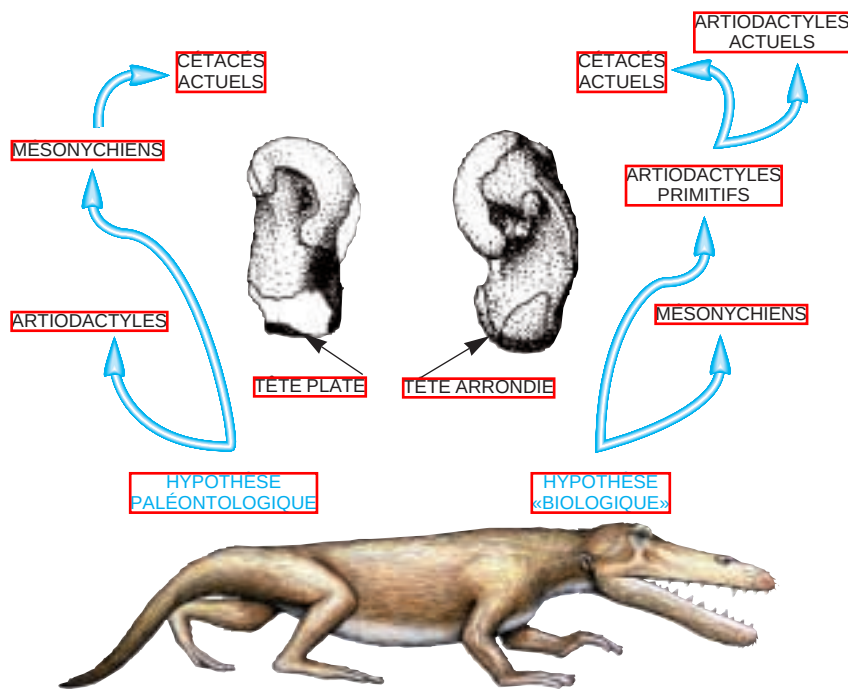
La cheville des baleines

Des fossiles identifient-ils les ancêtres des cétacés ?

Les mammifères terrestres, l'espèce humaine comprise, ont un ancêtre commun aquatique qui, un jour, est sorti de l'eau et a conquis la terre ferme. Parmi ses descendants, certains ont pourtant « choisi » de retourner vivre

dans l'eau. Ainsi, les cétacés tels que les baleines et les dauphins ont un ancêtre terrestre.

Les paléontologues ont longtemps cru que les mésonychiens terrestres, aujourd'hui disparus, étaient les ancêtres des mammifères marins. Cependant, des résultats d'analyses d'ADN modifient cette vision en montrant que les artiodactyles (des ongulés marchant sur un nombre pair de doigts, tels les hippopotames, les chameaux et les ruminants actuels) étaient les plus proches cousins des mammifères marins, avec lesquels ils partageraient un



L'*Ambulocetus* est une baleine primitive dont on a retrouvé des os de chevilles (astragale) fossilisés âgés de 50 millions d'années. L'anatomie comparée de ces os (os de gauche) avec ceux d'artiodactyles (os de droite), tels les hippopotames actuels, incite à penser que les mésonychiens sont les ancêtres des cétacés actuels (arbre de gauche). Une autre hypothèse indique que les artiodactyles primitifs seraient les ancêtres des baleines (arbre de droite).

ancêtre commun. Récemment, au Pakistan, l'équipe de Hans Thewissen, de l'Université de l'Ohio, a mis au jour deux os fossilisés qui confirment en partie la théorie des paléontologues.

Les fossiles sont des astragales de chevilles de baleines primitives, telles que *Ambulocetus* (voir la figure) vivant il y a 50 millions d'années. La tête arron-

die des os découverts diffère des astragales des artiodactyles et renforcent la théorie des mésonychiens ; néanmoins, deux facettes articulaires correspondent à celles que l'on trouve chez les artiodactyles. Les paléontologues s'interrogent. J. Thewissen, pense que les fossiles n'appartiennent vraisemblablement pas à un artiodactyle, mais n'ap-

partiennent sans doute pas non plus à un mésonychien.

Les biologistes moléculaires ont comparé les génomes de cétacés avec ceux de différents artiodactyles encore vivants. Les derniers résultats contredisent les données paléontologiques et montrent que l'hippopotame est l'artiodactyle le plus proche des cétacés. Tout deux auraient un ancêtre commun.

Mark Uhen, de l'Institut de Cranbrook, remarque que les artiodactyles peuvent être les animaux terrestres vivants les plus proches des mammifères marins, sans en être les ancêtres. En outre, les paléontologues indiquent que les résultats d'analyses génétiques sont biaisés car les similarités constatées ne reflètent peut-être que des évolutions convergentes, plutôt que l'existence d'un ancêtre commun.

William Sanders, de l'Université du Michigan, remarque par ailleurs que les plus vieux fossiles d'hippopotames connus sont âgés d'environ 18 millions d'années, alors que les plus vieilles baleines datent de plus de 50 millions d'années. Un ancêtre commun aurait donc subsisté plus de 32 millions d'années sans laisser de traces. De plus, la dentition et la forme du crâne des baleines ne correspondent pas à celles des artiodactyles.

L'issue du débat reste confuse. D'une part, aucun fossile de mésonychien ne contient d'ADN suffisamment intact pour se prêter à des analyses comparées fiables. D'autre part, les morphologies des fossiles ne sont pas assez convaincantes. Seul un fossile de mésonychien bien conservé permettrait de trancher.

Lignes de billes

Peut-on aligner des billes sur une ligne de façon que quatre d'entre elles soient à coup sûr non équidistantes ?

Cela ressemble à la règle d'un jeu pour les enfants. Deux joueurs disposent de billes, et chacun à son tour, ils en posent une sur une ligne. La condition imposée est qu'aucun groupe de trois billes choisies au hasard ne doit être formé de billes équidistantes (dans ce cas, aucune bille centrale de triplets ne doit être au milieu des deux autres). Est-ce que deux enfants peuvent jouer indéfiniment ?

Avec cette seule condition, la réponse est affirmative. Par exemple, lorsque d est la distance qui sépare les deux

premières billes, le joueur suivant place la troisième à une distance égale à $2d$ de la deuxième, puis à $2^2d = 4d$ de la troisième, puis à $2^3d = 8d$, et ainsi de suite. Aucun triplet ne sera composé de billes équidistantes. Cependant, dans ce cas de figure, les billes sont de plus en plus espacées, et la densité, nommée δ , c'est-à-dire le rapport du nombre de billes posées entre la première et la dernière sur le nombre total de billes que l'on pourrait poser, tend vers zéro à mesure que le jeu se déroule.

Imposons donc une nouvelle condition : la densité ne doit pas être nulle à l'infini. Les enfants peuvent-ils encore jouer indéfiniment ? La réponse est négative, il y a un nombre limité de billes à jouer qui dépend de la densité que les joueurs se sont imposé. En 1998,

Pour une densité différente de zéro, il existe un nombre limite de billes ne contenant aucun couple de billes équidistantes choisies parmi quatre.

le mathématicien Tim Gowers, de l'Université de Cambridge, a reçu la médaille Fields (le «prix Nobel» des mathématiciens) notamment pour le calcul du nombre limite de billes ne contenant, cette fois, aucun groupe de quatre billes équidistantes. Nous verrons que ses travaux concernaient des nombres et non des billes.

En 1936, les mathématiciens hongrois P. Erdős et G. Turán ont conjecturé que pour une densité δ donnée, il existait un nombre limite N de billes à poser tel que k billes prises au hasard ne soient pas

équidistantes. En 1953, K. Roth a calculé le nombre maximal de billes que l'on peut poser avec une densité δ , de façon qu'aucun triplet prélevé au hasard ne soit composé de billes équidistantes. Ce nombre est très élevé ; les enfants joueront quelques semaines en posant une bille par seconde !

T. Gowers a calculé récemment le nombre limite de billes qui ne contient pas quatre billes équidistantes, en fonction de la densité δ . L'intérêt de sa méthode réside dans son application possible pour des groupes de billes plus importants. Le calcul du nombre limite de billes ne contenant pas de groupe de plus de quatre billes est aujourd'hui en cours de vérification.

Laissons les billes aux enfants. Ces résultats intéressent les mathématiciens

lorsque la ligne de jeu est remplacée par l'ensemble des entiers naturels et les billes par des entiers. Des billes équidistantes signifient alors des nombres successifs d'une suite arithmétique où l'on calcule un terme en ajoutant une constante au précédent (par exemple, la suite 4, 9, 14, 19, 24,...). Le résultat de T. Gowers indique que dans la suite des entiers de 1 à N où N est supérieur à la limite calculée, chaque sous-ensemble de δN nombres contient au minimum une suite arithmétique de quatre termes. Anodin en apparence, ce résultat est le premier pas dans la résolution d'un problème soulevé par P. Erdős : l'ensemble des nombres premiers (divisibles uniquement par 1 ou par eux-mêmes) contient-il des suites arithmétiques de longueur quelconque ?

Nouveau regard sur des fards

Il y a 4 000 ans, les Égyptiens synthétisaient des cosmétiques à usage thérapeutique.

Un trait de maquillage noir qui souligne et allonge l'œil : la fréquence de cette caractéristique sur les portraits peints et sculptés dans l'Égypte ancienne y témoigne de l'importance du maquillage. Des tombes ont effectivement livré des coffrets de toilette qui contenaient, outre des miroirs, des épingles à cheveux et des stylets, des récipients encore remplis de poudres colorées. Les Égyptiens se maquillaient avec des fards verts, blancs, gris ou noirs, mélanges de minéraux colorés et de matières grasses. Outre des préoccupations esthétiques, ces produits avaient des fonctions thérapeutiques, qui motivaient des procédés de fabrication longs et complexes.

Le Musée du Louvre conserve, dans ses collections égyptiennes, de nombreux flacons à fard, en pierre, de roseau ou en bois, qui pouvaient contenir 50 à 100 grammes de poudre. Notre équipe, en collaboration avec la Source européenne de rayonnement synchrotron (ESRF) à Grenoble, a caractérisé les constituants des poudres cosmétiques noires contenues dans 49 de ces flacons, datés de 2000 à 1200 avant notre ère.

La microscopie électronique et la diffraction des rayons X révèlent que la couleur noire est due à la présence de galène (sulfure de plomb). La teinte est parfois éclaircie par de la cérusite, carbonate de plomb blanc.

La plupart des produits analysés contiennent aussi en abondance deux chlorures de plomb, la laurionite et la phosgénite. Ces minéraux ont été introduits intentionnellement par les fabricants : le bon état de conservation des poudres exclue une formation par des phénomènes d'altération lors du vieillissement des produits. Par ailleurs, ils ont été synthétisés : leur rareté naturelle aurait empêché les Égyptiens de les inclure dans des cosmétiques pendant plusieurs siècles comme ils l'ont fait. Enfin, la présence de laurionite et de phosgénite n'a certainement pas de motivations esthétiques : ces minéraux sont blancs et ils sont la plupart du temps associés à la cérusite, blanche aussi et beaucoup plus facile à se procurer. Les Égyptiens les ont-ils donc synthétisés pour conférer aux fards des propriétés particulières ?

Cette présomption est renforcée à la lecture de recettes de produits médicaux, décrites par Dioscoride et Pline l'Ancien au I^{er} siècle de notre ère. Ils décrivent, en particulier, comment l'«écume d'argent purifiée» (l'oxyde de plomb) était broyée et mélangée dans de l'eau avec du sel gemme et parfois du natron (des carbonates de sodium principalement), puis filtrée ; la procédure était répétée chaque jour pendant plusieurs semaines. Lorsque nous avons suivi ce mode opératoire et mélangé de l'oxyde de plomb et du chlorure de sodium dans de l'eau, une lente réaction a produit une solution basique que les remplacements quotidiens d'eau ont régulièrement neutralisée. Nous avons ainsi obtenu une très fine poudre de laurionite blanche. En présence de carbonates, on obtient, avec le même procédé, de la phosgénite. La préparation de tels composés par voie aqueuse met en jeu des réactions



La poudre noire, visible sur le bord intérieur de ce flacon de quelques centimètres de diamètre en albâtre, du Nouvel-Empire égyptien (environ 1500 avant notre ère), et sur le couvercle, est un cosmétique à base de galène (sulfure de plomb). Il contient aussi des chlorures de plomb, obtenus par synthèse chimique. Sur la radiographie (à gauche), les zones claires correspondent aux composés de plomb, qui absorbent fortement les rayons X. Ces cosmétiques avaient une fonction esthétique, mais ils servaient aussi à protéger l'œil contre des maladies.

chimiques assez simples mais un procédé long et répétitif sans doute élaboré après de nombreux tâtonnements.

Au 1^{er} siècle de notre ère, ces produits servaient à soigner des maladies des yeux. Le médecin romain Celse recommandait ainsi un collyre qui mêlait de la gomme, de la galène, de la céruse et de l'«écume d'argent traitée». Il conseille aussi cette dernière pour des soins de la peau et des cheveux.

Ces vertus thérapeutiques étaient-elles déjà connues en Égypte 2 000 ans auparavant? Le climat égyptien a été, et est toujours, cause de nombreuses infections oculaires, que le fard pouvait contribuer à prévenir ou à traiter. Des papyrus médicaux indiquent de nombreuses préparations pour soigner les yeux. Ainsi, le papyrus d'Ebers, daté d'environ 1550 avant notre ère, cite des traitements de maladies oculaires à base de galène, et d'autres matières minérales dont nous ne savons pas traduire les noms. Une tombe contemporaine de ce document a toutefois livré trois flacons en roseau, dont l'un portait l'inscription «vrai fard à paupière noir» et les deux autres «collyre à dis-

soudre, bon pour la vue». D'anciennes analyses chimiques ont montré que ces deux derniers contiennent un carbonate et un chlorure de plomb, sans doute la phosgénite.

La cohésion des fards était, comme aujourd'hui, assurée par un support gras, surtout d'origine animale. On distingue trois textures de fard, obtenues par des concentrations plus ou moins grandes de matières grasses. Certains échantillons n'en contiennent que des traces infimes, sans doute introduites involontairement lors de la préparation des produits minéraux. À l'inverse, les cinq à sept pour cent présents dans d'autres échantillons témoignent de la volonté d'ajouter un liant. On trouve enfin des cas intermédiaires, qui contiennent 0,1 à 0,5 pour cent de matières grasses. Ces trois catégories ressemblent étonnamment à celles que l'on trouve aujourd'hui dans les lignes de cosmétiques : les poudres libres, sans ou avec très peu de matières grasses, les fards à paupières et les crayons khôl, les plus gras.

Philippe WALTER, LRMF-CNRS-Culture
René BRENIAX, Société L'Oréal

Un ancêtre venu du froid

La vie est-elle née dans un milieu tempéré?

A la fin des années 1980, une équipe de généticiens américains a construit l'arbre généalogique des espèces vivantes. Les formes les plus primitives semblaient être des micro-organismes vivants dans des eaux chaudes (plus de 80 °C), et l'on en a déduit que la vie était apparue en milieu aquatique chaud, peut-être à proximité des failles volcaniques, au fond des océans. Cependant, Nicolas Galtier et Manolo Gouy, de l'Université de Lyon, et Nicolas Tourasse, de l'Université du Texas, ont montré que l'ancêtre des formes vivantes actuelles ne pouvait vivre dans un environnement chaud.

Ils ont comparé, parmi 40 espèces, la composition des acides ribonucléiques ribosomaux (ARNr), des molécules présentes chez tous les organismes vivants. Les ribosomes, qui participent à la synthèse des protéines, sont de petits éléments cellulaires, constitués de deux sous-unités composées de protéines et d'ARN. Ce dernier est une chaîne de molécules nommées bases azotées (adénine, uracile, guanine et cytosine), reliées par une trame d'acide phosphorique et d'un sucre, le ribose. Ces bases azotées s'apparient spécifiquement pour former deux types de paires de bases : adénine et uracile ; cytosine et guanine. Des apparie-

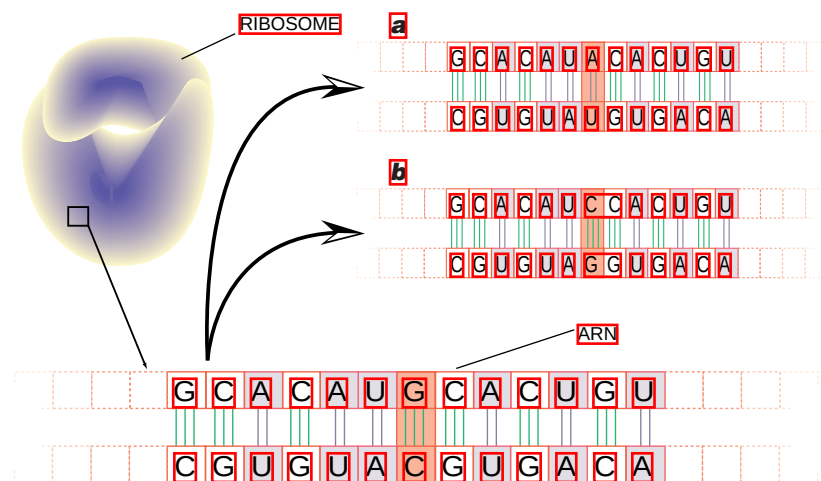
ments apparaissent au sein d'une même molécule d'ARN qui se replie et acquiert ainsi la structure tridimensionnelle indispensable à sa fonction.

La chaleur détruit l'activité des ARN en rompant les appariements de bases. Or, alors que l'adénine et l'uracile sont reliées par deux liaisons, la guanine et la cytosine le sont par trois : un ARN riche en paires guanine-cytosine est plus résistant qu'un ARN riche en paires adénine-uracile.

Les généticiens français ont tout d'abord calculé les proportions de guanine et de cytosine dans deux des trois ARN que contient un ribosome, chez des espèces telles que des bactéries vivant en milieu chaud, des bactéries moins résistantes à la chaleur, des plantes, des champignons, des animaux uni- et pluricellulaires.

Puis, N. Galtier, M. Gouy et N. Tourasse ont élaboré un modèle d'évolution des ARN ribosomaux. Ils ont quantifié les probabilités des différents remplacements d'une base par une autre et ont ainsi déterminé la proportion de guanine et de cytosine dans les ARN du plus récent ancêtre commun des formes qui vivent aujourd'hui. Selon leurs calculs, elle n'atteint que 54 pour cent, tandis que 60 pour cent sont nécessaires à la survie dans un milieu chaud : l'ancêtre commun vivait donc en milieu tempéré.

La résistance à la chaleur de certains organismes ne serait pas un caractère ancestral, mais plutôt une adaptation tardive à des conditions extrêmes. Aussi, si une chaleur importante semble avoir été nécessaire à l'apparition des premières molécules biologiques, le dernier ancêtre commun des espèces vivant aujourd'hui évoluait en milieu tempéré.



Un ribosome est composé de deux sous-unités, elles mêmes constituées de protéines et d'acide ribonucléique (ARN). Les bases azotées qui le composent s'apparient spécifiquement en deux types de paires de bases : adénine-uracile (A-U) reliées par deux liaisons ; et guanine-cytosine (C-G) reliées par trois. Plus les liaisons sont nombreuses, plus l'ARN résiste à la chaleur. Un ARN riche en paires G-C est plus résistant qu'un ARN riche en paires A-U. Au cours de l'évolution, certains changements de bases modifient la résistance des ARN à la chaleur (a), d'autres ne la changent pas (b).



Dossier

La révolution cosmologique

En mai 1998, lors d'une conférence sur l'énergie manquante de l'Univers, les cosmologistes votèrent : croyaient-ils ou non aux nouvelles observations d'explosions stellaires qui impliquaient – contrairement à toute attente – que l'expansion de l'Univers accélérât ? Bien que les astronomes sachent depuis les années 1920 que l'Univers est en expansion, les galaxies s'éloignant les unes des autres, ils supposaient que cette expansion ralentissait en raison de la nature attractive de la gravitation. Si l'expansion accélère, l'Univers doit être empli d'une forme inconnue de matière ou d'énergie qui a un effet répulsif, idée que les physiciens trouvaient... repoussante. Pourtant, sur les 60 cosmologistes présents à la conférence, 40 acceptent les nouvelles découvertes.

Depuis dix ans, les astronomes savent que leurs théories cosmologiques sont imparfaites. Quand on calcule la quantité totale de matière dans l'Univers, on trouve une quantité bien inférieure à celle qui est nécessaire pour ralentir l'expansion comme le prédisait la théorie de l'inflation, une explication élégante des premiers instants du Big Bang. Jusqu'à aujourd'hui, les indices à l'encontre de cette théorie n'avaient jamais été suffisants pour que les cosmologistes l'abandonnent. Toutefois, maintenant, les théoriciens admettent qu'il y a quelque chose qui « cloche ». L'expansion ne ralentit pas comme on le pensait. Soit les scientifiques doivent se réconcilier avec le concept d'énergie invisible, soit ils doivent modifier ou abandonner l'inflation.

Dans ce numéro, *Pour la Science* présente trois aspects de l'histoire. D'abord, les observateurs relatent comment et pourquoi leur travail sur les supernovae a déclenché un tel bouleversement. Un théoricien explique ensuite pourquoi ces observations impliquent l'existence d'une énergie éthérée qui remplirait le vide. Enfin, deux cosmologistes offrent une autre interprétation en prolongeant la théorie de l'inflation « avant » le Big Bang.



Des supernovae pour sonder l'espace-temps

CRAIG HOGAN • ROBERT KIRSHNER • NICHOLAS SUNTZEFF

L'analyse des explosions d'étoiles très lointaines indique que l'expansion de l'Univers accélère. Une forme d'énergie étrange semble être la cause de cette accélération.

Il y a bien longtemps (environ cinq milliards d'années), dans une galaxie très lointaine (à environ sept milliards d'années-lumière), une étoile a explosé. Cette supernova brilla comme plus d'un milliard de soleils. Sa lumière voyagea dans l'espace, son intensité faiblissant avec la distance et sa longueur d'onde s'allongeant avec l'expansion cosmique. Une infime partie de cette lumière atteignit la Terre : dix minutes durant, au cours d'une sombre nuit de 1997, quelques centaines de photons de cette supernova heurtèrent le miroir d'un télescope, au Chili. Un ordinateur de l'observatoire reconstruisit alors une image numérique qui montra une minuscule tache de lumière. Cette tache, d'apparence pourtant insignifiante, était pour nous une vision stimulante : une nouvelle balise pour sonder l'espace et le temps.

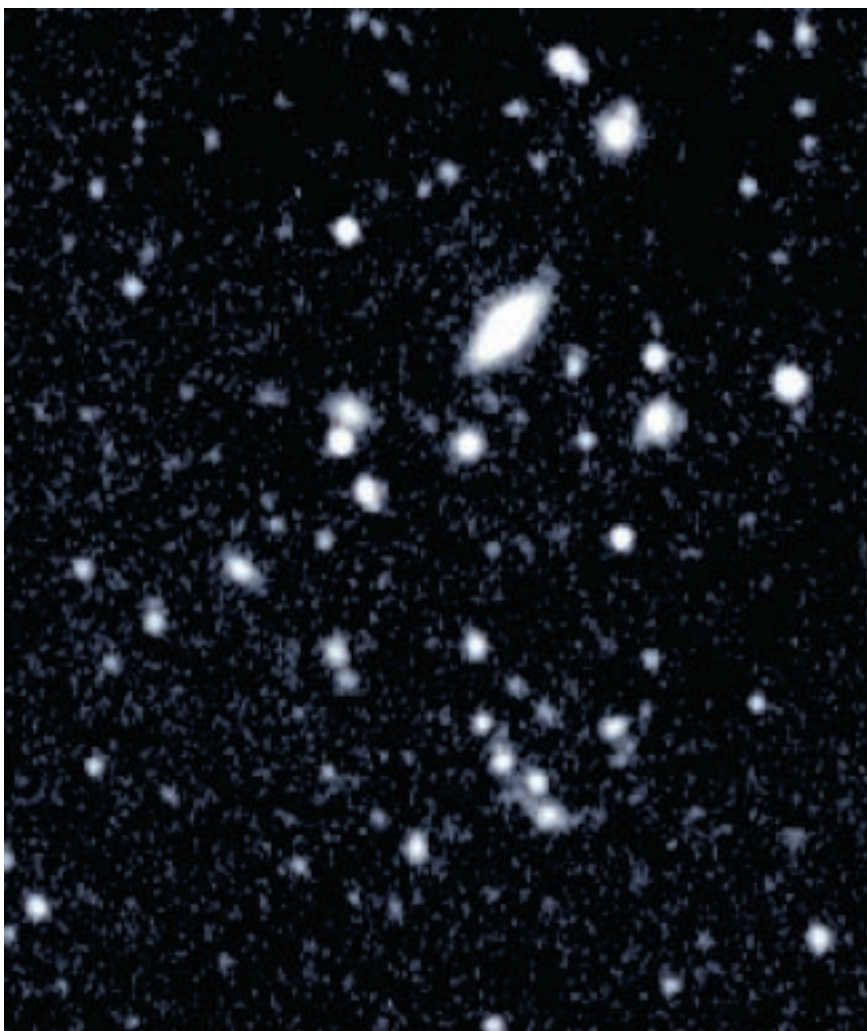
Avec des collègues du monde entier, nous avons traqué la lumière de plusieurs dizaines de supernovae et avons utilisé ces observations pour cartographier la forme globale de l'Univers et pour établir l'histoire de son expansion. Nos études chamboulent la vision classique de l'Univers :

1. OÙ EST LA SUPERNOVA? Cette paire d'images, réalisées à l'aide du télescope de quatre mètres de diamètre de l'Observatoire de Cerro Tololo, au Chili, révèle la première supernova lointaine découverte. Dans le cliché de droite, obtenu trois semaines après celui de gauche, la supernova modifie l'apparence de l'une des galaxies. Pouvez-vous la trouver? Certaines différences résultent de conditions atmosphériques différentes. La réponse est donnée sur la figure 2.

L'Univers serait plus vaste et plus vide qu'on ne le croyait depuis une dizaine d'années. En outre, son expansion ne ralentit pas autant que de nombreux cosmologistes l'avaient calculé. Peut-être même accélère-t-elle.

L'expansion des galaxies

L'histoire de l'expansion cosmique intéresse beaucoup les astronomes, car elle reflète la géométrie de l'Univers et la nature de ses constituants – matière,



PIRELLA GÖTTSCHEW • HARVARD-SMITHSONIAN CENTER FOR ASTRONOMY

lumière ou d'autres formes d'énergie. La théorie de la relativité générale relie ces propriétés fondamentales de l'Univers et décrit comment elles agissent sur le mouvement de la matière et sur la propagation de la lumière. Les prévisions astronomiques qui en résultent peuvent alors être confrontées aux observations.

Avant la publication de la théorie d'Albert Einstein, en 1916, et avant les premières observations de l'expansion cosmique, dans la décennie suivante, la plupart des astrophysiciens pensaient que l'Univers avait une taille constante. Même Einstein se méfia de ses équations lorsqu'il comprit qu'elles décrivaient un univers qui évoluait. Cependant les mesures des mouvements galactiques par Edwin Hubble et par d'autres ne laissèrent guère de doute : les galaxies faibles, parce que lointaines, s'éloignent de la Terre plus vite que les galaxies brillantes, proches ; ainsi, conformément aux équations de la relativité générale, l'Univers est en expansion, et les galaxies s'éloignent les unes des autres comme des taches

de peinture à la surface d'un ballon que l'on gonfle. Les astronomes ont déterminé les vitesses de récession des galaxies à partir du décalage des raies spectrales visibles vers des longueurs d'onde supérieures (le rougissement, ou décalage vers le rouge). Bien qu'il soit souvent attribué à l'effet Doppler, en vertu duquel une sirène qui s'approche paraît plus aiguë qu'une sirène qui s'éloigne, le rougissement cosmologique résulte de l'expansion de l'Univers, qui étire les longueurs d'onde de la lumière des galaxies. Le rayonnement des objets plus lointains, qui a voyagé plus longtemps, est plus décalé vers le rouge que le rayonnement des sources plus proches.

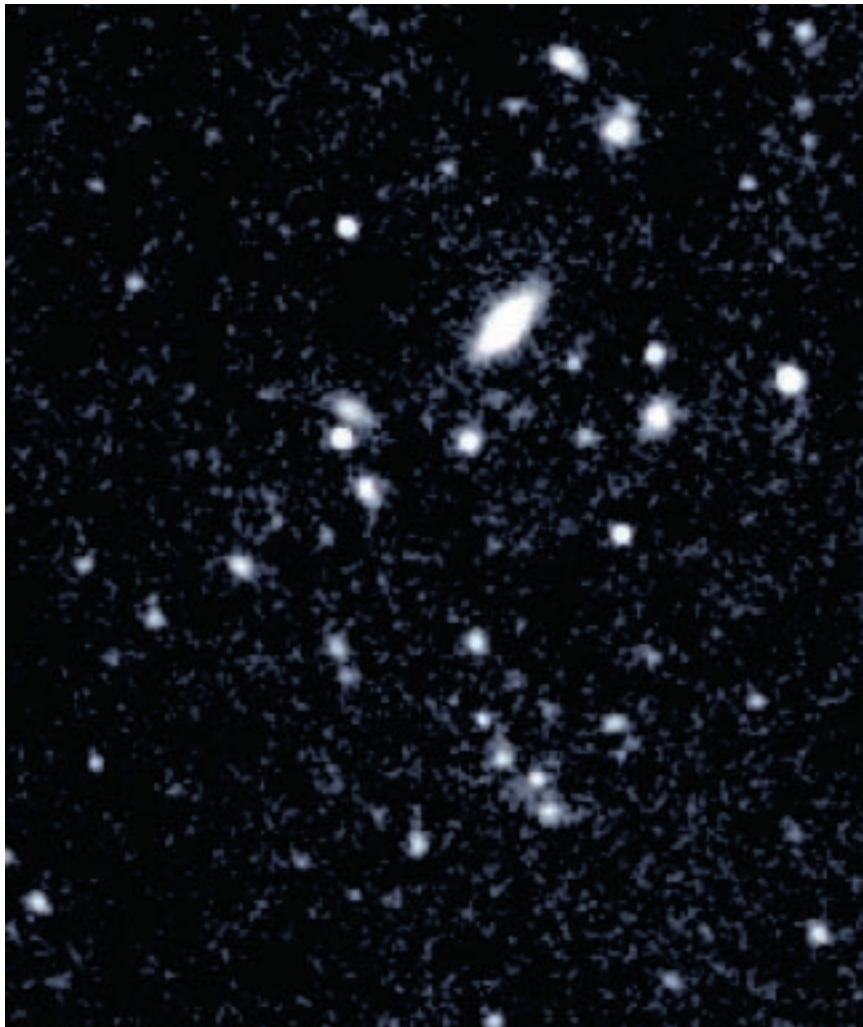
Dans les années 1930, à l'époque de Hubble, les spectromètres ne mesuraient le décalage vers le rouge que pour des galaxies brillantes. Or, pendant que la lumière de ces galaxies proches se propageait vers la Terre, l'Univers s'est très peu dilaté. Pour des changements aussi faibles, le décalage vers le rouge est proportionnel à la distance. Le

rapport de ces deux grandeurs est fixe : c'est la constante de Hubble, qui caractérise la vitesse actuelle d'expansion cosmique. Les astrophysiciens supposaient que, pour les galaxies plus lointaines, cette relation entre rougissement et distance serait modifiée, soit parce que la vitesse d'expansion a changé au cours du temps, soit parce que l'espace entre nous et ces galaxies est courbe. Ainsi, la mesure de cette modification était devenue l'un des grands objectifs de la cosmologie, mais il demeure difficile, car il requiert de déterminer les distances des galaxies extrêmement lointaines.

Pour estimer les distances des diverses galaxies, Hubble et les cosmologistes de son époque supposaient qu'elles ont toutes la même luminosité intrinsèque. Dans cette hypothèse, les galaxies les plus brillantes sont plus proches que celles qui apparaissent plus faibles. Toutefois, cette méthode a ses limites : la luminosité des galaxies est très variable ; de surcroît, pour les sources lointaines, la lumière met tant de temps à nous parvenir qu'elle dévoile des galaxies dans leur prime jeunesse, dont la luminosité intrinsèque pourrait être bien différente de celle de galaxies plus mûres, observées près de nous. Comme il est difficile de démêler ces modifications évolutives des effets de l'expansion, les astronomes ont longtemps cherché d'autres «chandelles de référence», des objets dont la luminosité intrinsèque serait la même, que ces objets soient proches ou lointains.

Pour être visibles à des milliards d'années-lumière de distance, ces balises doivent être très brillantes. Au début des années 1970, certains cosmologistes tentèrent d'utiliser les quasars, des sources extrêmement énergiques (probablement alimentées par des trous noirs qui avalent des étoiles et du gaz). Malheureusement, les quasars se révélèrent encore plus variés que les galaxies, et donc peu utiles pour l'arpentage de l'Univers.

Vers la même époque, d'autres astronomes commencèrent à utiliser des supernovae – des étoiles qui explosent – comme jalons pour les études cosmologiques. Cette approche fut d'abord controversée, car les supernovae étaient, aussi, très diverses. Toutefois, au cours des dix dernières années, les astronomes ont déterminé avec précision la luminosité intrinsèque d'un type de supernovae particulier, les supernovae de type Ia.



La mort d'une étoile

Une supernova de type Ia est l'explosion d'une étoile, c'est-à-dire une bombe thermonucléaire naturelle. L'étoile qui explose commence son existence sous la forme d'une sphère d'hydrogène, en équilibre. L'effondrement gravitationnel initial chauffe et comprime le gaz, ce qui déclenche des réactions nucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium, en carbone, en oxygène, en néon, et en d'autres éléments. L'énergie dégagée provoque l'agitation des atomes, ce qui équilibre la gravitation. Toutefois, lorsque le combustible nucléaire s'épuise, la pression devient insuffisante pour maintenir l'équilibre, et l'étoile s'effondre sur elle-même jusqu'à ce que son volume soit seulement de la taille de la Terre et sa densité un million de fois celle de la matière ordinaire. L'étoile est devenue une naine blanche.

La plupart de ces naines blanches se refroidissent et s'éteignent ainsi sans

briller. Toutefois, celles qui sont dans un système binaire (deux étoiles liées par la gravitation) peuvent aspirer la matière de leur compagne et devenir si denses qu'elles s'effondrent brusquement. La chaleur qui en résulte déclenche une explosion thermonucléaire qui détruit complètement la naine blanche, éjectant sa matière à des vitesses qui atteignent 10 000 kilomètres par seconde. La lueur de cette boule de feu en expansion met environ trois semaines pour atteindre son éclat maximum, puis décline plusieurs mois durant.

Les supernovae ont des luminosités variées, mais les explosions plus brillantes durent généralement plus longtemps que les plus faibles. Ainsi, en surveillant leur durée, les astronomes corrigent les différences et déterminent leur luminosité intrinsèque à 12 pour cent près. Au cours des dix dernières années, grâce aux études des supernovae de type Ia proches à l'aide de détecteurs modernes, ces éclairs sont

devenus les «chandelles de référence» les mieux étalonnées du ciel.

Ces explosions stellaires sont des événements rares dans les galaxies : il s'en produit un tous les 300 ans environ. Toutefois, l'Univers contient tant de galaxies que des supernovae suffisamment brillantes pour faire l'objet d'une étude explosent toutes les quelques secondes, quelque part dans le ciel. Il suffit donc aux astronomes de les trouver et de les étudier soigneusement. Depuis quelques années, deux groupes rivalisent d'effort : d'une part, notre groupe, surnommé le Groupe à grand z (z caractérise le décalage vers le rouge), a été créé en 1995 par Brian Schmidt, des observatoires australiens du mont Stromlo et de Siding Springs ; l'autre groupe, nommé Projet cosmologie et supernovae, lancé en 1988, est dirigé par Saul Perlmutter, du Laboratoire Lawrence Berkeley (*voir l'encadré ci-contre*).

Bien que les deux équipes soient indépendantes, elles profitent des mêmes progrès fondamentaux, essentiellement le déploiement de grands détecteurs de lumière sur des télescopes géants. Grâce à ces progrès, les astronomes produisent des images numériques d'objets faibles sur une grande partie du ciel, ce qui facilite l'analyse ultérieure. Ainsi, une caméra construite par l'Université du Michigan et par la Société *Lucent* a été placée au foyer du télescope de quatre mètres de diamètre de l'Observatoire de Cerro Tololo, au Chili ; une seule exposition de dix minutes produit une image qui couvre une surface égale à celle de la Lune et qui contient 5 000 galaxies.

Pour repérer les supernovae lointaines, il suffit donc de prendre des images de la même zone du ciel à quelques semaines d'intervalle et de rechercher, dans les galaxies lointaines, des différences de luminosité. Comme les détecteurs de lumière enregistrent avec précision le nombre de photons ayant atteint chaque élément d'image, une simple soustraction des deux images indique les différences. Quand tout se passe bien, la soustraction conduit à une image noire (au bruit près), où les seuls signaux intenses correspondent à des objets nouveaux ou variables, telles les étoiles variables, les quasars, les astéroïdes et, dans certains cas, des supernovae.

Les programmes informatiques enregistrent la position des nouveaux objets et tentent d'identifier ceux qui

Des supernovae pour la cosmologie

Entré dans la course aux grands décalages vers le rouge dès la fin des années 1980, le Projet cosmologie et supernovae a découvert, à ce jour, près d'une centaine de supernovae lointaines. Exploit remarquable si l'on rappelle qu'avant 1992 seulement une supernova lointaine avait été découverte. La découverte la plus spectaculaire eut lieu en octobre 1998 avec le télescope Keck de huit mètres de diamètre, situé à Hawaii. Pour la première fois, une supernova ayant un décalage vers le rouge supérieur à un était détectée. Autrement dit, cette supernova a explosé il y a dix milliards d'années, bien longtemps avant que notre Soleil ne se mette à briller !

Le Projet supernovae et cosmologie est une collaboration internationale d'une trentaine de physiciens et d'astronomes, qui mettent en communs leurs efforts et leurs moyens d'observation les plus performants pour détecter ces supernovae et en déduire la valeur des paramètres cosmologiques. En France, une douzaine de physiciens et d'astronomes du Laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies (LPNHE) à Paris, de l'Ob-

servatoire de Meudon et d'autres institutions y participent.

De même que le Groupe à grand z , dont les résultats sont relatés dans l'article, le Groupe supernovae pour la cosmologie a annoncé durant l'été 1998 l'analyse de 42 supernovae à grand décalage vers le rouge. Si le nombre de supernovae diffère, les conclusions sont très semblables. D'abord, l'expansion de l'Univers serait infinie : l'Univers ne se reconstruira jamais. Ensuite, et ceci est assurément spectaculaire, cette expansion serait, dans la période actuelle, en phase d'accélération et ce depuis environ quatre milliards d'années !

Ces résultats devront être confirmés et la recherche systématique de supernovae à grand décalage vers le rouge se poursuit activement. Pour ce faire, l'équipe française propose de combiner l'utilisation du télescope Canada-France-Hawaii pour la détection des supernovae et un suivi sur le télescope Keck et sur le Très grand télescope européen (VLT), récemment mis en service au Chili. Le mystère des paramètres cosmologiques sera-t-il bientôt résolu ?

Reynald PAIN, LPNHE, Paris

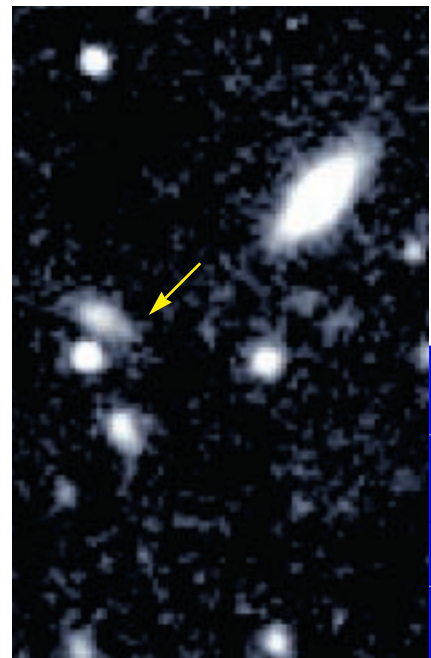
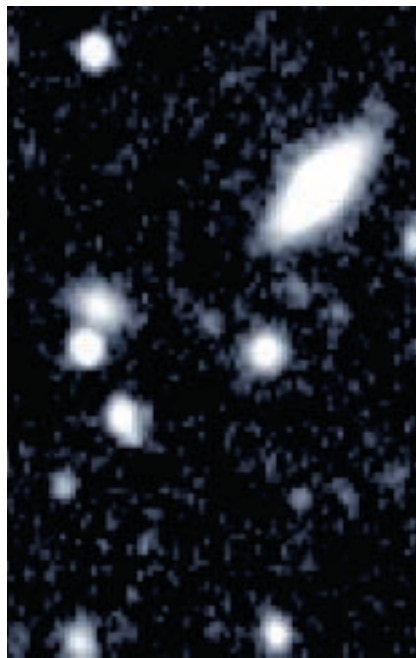
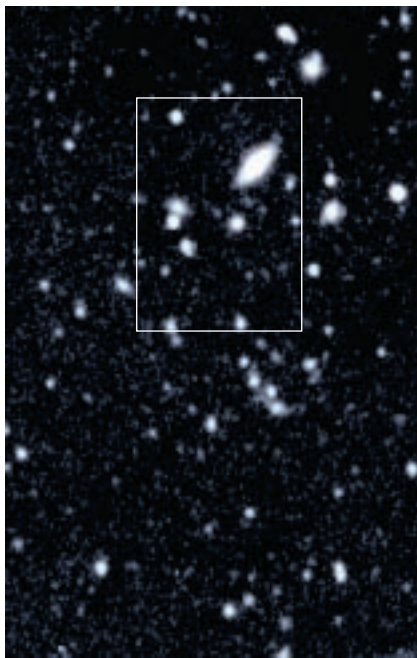
sont réellement des supernovae, mais les tests automatisés demeurent imparfaits, et nous devons scruter les images à l'œil nu pour décider quelles supernovae putatives sont réelles. Pour suivre l'évolution de la courbe de lumière de la supernova avant qu'elle ne devienne trop faible, l'analyse doit être effectuée rapidement. Pendant ces périodes harassantes, l'observatoire est un baignoire où astronomes et étudiants travaillent 24 heures sur 24 pendant plusieurs jours consécutifs, soutenus par l'enthousiasme et les pizzas chiliennes.

Ensuite, nous visons les meilleures supernovae présumées avec de grands télescopes, dont les télescopes Keck de huit mètres de diamètres, à Hawaï. Ces observations cruciales confirment si les objets proposés sont des supernovae de type Ia. À l'aide de ces observations, on mesure également l'éclat intrinsèque et le décalage vers le rouge.

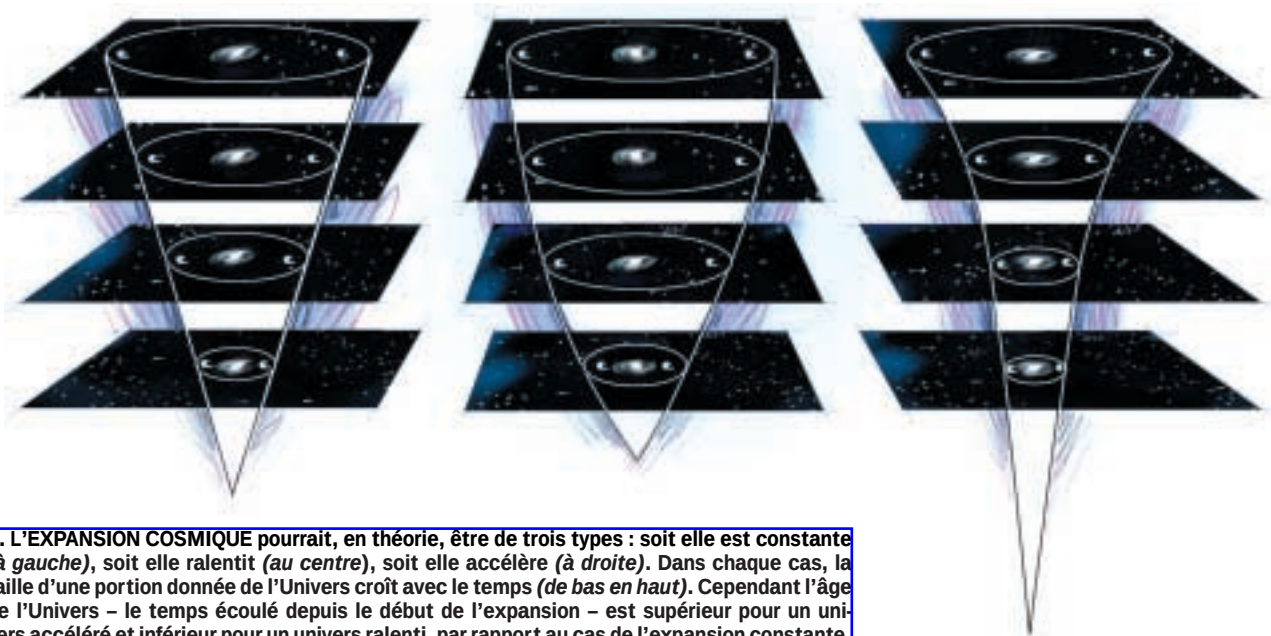
Du côté sombre

D'autres membres de notre groupe, travaillant avec des télescopes en Australie, au Chili et aux États-Unis, ont

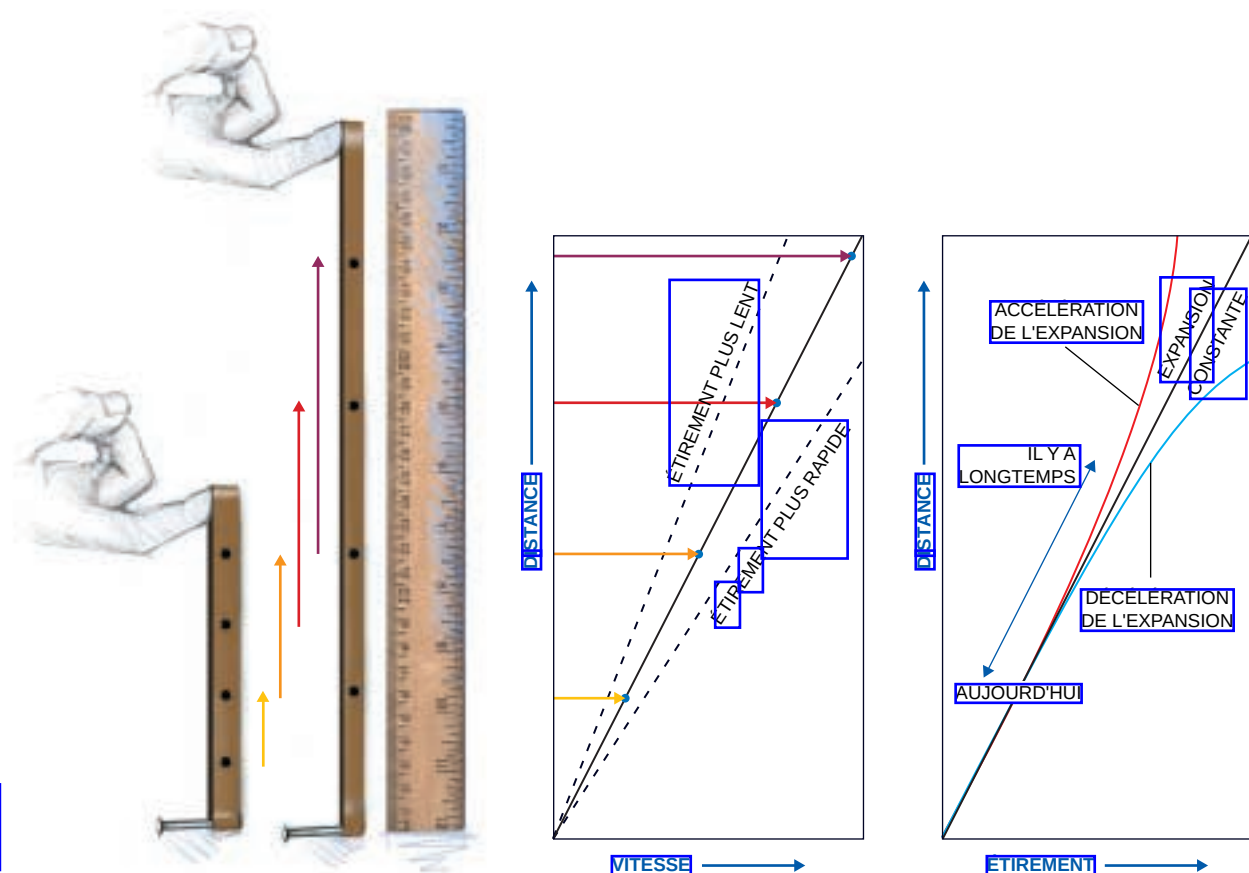
également suivi ces supernovae pour déterminer comment leur luminosité passe par un maximum, puis décline. La campagne d'observation pour une seule supernova dure plusieurs mois, et l'analyse finale doit souvent attendre un an ou plus, quand la lumière de la supernova a presque disparu, pour obtenir une bonne image de la galaxie qui abritait la supernova. Nous utilisons ce cliché final pour soustraire l'éclat de la galaxie des images de la supernova. Nos meilleures mesures proviennent du télescope spatial Hubble, qui saisit des détails si fins que



2. UNE SUPERNOVA LOINTAINE est indiquée par la flèche. L'explosion de cette étoile modifie uniquement quelques pixels de l'image prise après l'événement.



3. L'EXPANSION COSMIQUE pourrait, en théorie, être de trois types : soit elle est constante (à gauche), soit elle ralentit (au centre), soit elle accélère (à droite). Dans chaque cas, la taille d'une portion donnée de l'Univers croît avec le temps (de bas en haut). Cependant l'âge de l'Univers – le temps écoulé depuis le début de l'expansion – est supérieur pour un univers accéléré et inférieur pour un univers ralenti, par rapport au cas de l'expansion constante.



4. UN ELASTIQUE que l'on tend montre la relation linéaire entre la vitesse de récession des galaxies et leur distance. Étirons un élastique à une vitesse constante. La vitesse de différents points peints sur l'élastique est indiquée par la longueur des flèches colorées. Par exemple, le point le plus proche de l'origine se déplace le moins, et sa vitesse est la plus faible (flèche jaune). En revanche, le point le plus éloigné se déplace plus, et sa vitesse est supérieure (flèche violette). Lorsque l'on porte sur un diagramme la distance en fonction de la

vitesse, la pente de la droite donne la vitesse d'expansion de l'élastique (graphique de gauche). Si cette vitesse change au cours du temps, la pente change également (graphique de droite). Supposons que l'origine du graphique représente la Terre aujourd'hui ; les temps plus reculés se placent vers le coin supérieur droit, car ils correspondent aux grandes distances. Si la vitesse d'expansion était plus lente par le passé, la ligne se courberait vers le haut (ligne rouge). Si cette vitesse était supérieure, elle se courberait vers le bas (ligne bleue).

l'étoile qui explose émerge distinctement de sa galaxie hôte.

Après l'étude et l'analyse de dizaines de supernovae à grand décalage vers le rouge, une surprise nous attendait : les supernovae sont moins lumineuses que prévu. La différence est mince : les supernovae lointaines sont en moyenne 25 pour cent plus faibles que ce que prévoyait la théorie, mais ce résultat suffit à remettre en question les théories cosmologiques anciennes.

Avant de balayer les anciennes théories, les astronomes se sont demandé s'il existait une explication plus simple à la relative faiblesse de ces supernovae lointaines. Des poussières cosmiques situées dans le milieu intergalactique ou dans les galaxies où ont explosé les supernovae absorberaient-elles une partie de leur lumière ? Vraisemblablement pas, car les poussières atténuent plus la lumière bleue que la lumière rouge, de sorte que les supernovae seraient plus rouges qu'elles ne le sont en réalité (le phénomène est le même que celui qui fait rougir le soleil couchant). Or, nous n'observons pas une telle atténuation. De surcroît, la poussière cosmique ne

semble pas répartie uniformément dans l'espace, de sorte que la lumière de quelques supernovae seulement rencontrerait ces « nuages de poussières » et serait atténuée. Or, les supernovae ont presque toujours la même luminosité.

Une autre perturbation possible serait l'effet de lentille gravitationnelle, c'est-à-dire la courbure des rayons lumineux au voisinage des galaxies. Parfois, cet effet augmente la luminosité des sources, mais, le plus souvent, il la réduit ; des lentilles gravitationnelles pourraient donc atténuer l'éclat des supernovae lointaines. En fait, les calculs montrent que cet effet ne devient important que pour des sources plus éloignées que les supernovae que nous étudions, de sorte que nous pouvons écarter cette possibilité.

Enfin, nous craignons que les supernovae lointaines ne diffèrent des supernovae proches, émanant peut-être d'étoiles plus jeunes qui auraient contenu moins d'éléments lourds que les étoiles des galaxies plus mûres. Bien que nous ne puissions éliminer cette hypothèse, notre analyse tente déjà de prendre ces différences en compte. Ces

ajustements semblent fonctionner lorsque nous les appliquons aux galaxies proches, dont les supernovae présentent une grande dispersion d'âges, de compositions et de types.

Comme aucun de ces effets élémentaires ne s'accorde aux observations, nous pensons que la faiblesse inattendue des supernovae lointaines résulte de la structure du cosmos. Deux propriétés différentes de l'espace et du temps peuvent y contribuer.

D'abord, l'espace pourrait avoir une courbure négative. Une telle courbure se comprend mieux à l'aide d'une analogie bidimensionnelle. Les créatures vivant dans un monde bidimensionnel parfaitement plat (comme les personnages du roman *Flatland*, d'Edwin Abbott) trouveraient qu'un cercle de rayon r a une circonférence exactement égale à $2\pi r$. En revanche, si leur monde était en forme de selle, avec une courbure négative (voir *L'inflation de l'Univers*, par Martin Bucher et David Spergel, page 50), la circonférence d'un cercle de rayon r serait supérieure à $2\pi r$.

La plupart des cosmologistes supposent, pour diverses raisons théoriques,

que notre espace tridimensionnel, n'est pas courbé. Toutefois, s'il avait une courbure négative, l'énorme sphère de rayonnement produite par une supernova ancienne aurait une superficie plus grande que dans un espace géométriquement plat : de ce fait, la source nous paraîtrait plus faible qu'elle ne l'est en réalité.

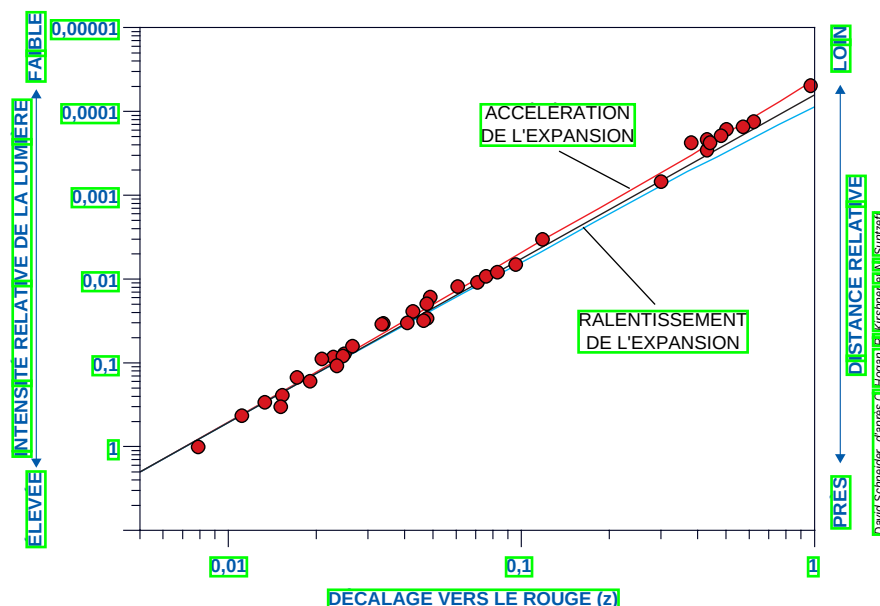
Les supernovae lointaines seraient également plus faibles que prévu si elles étaient plus loin que ne l'indique leur décalage vers le rouge. Autrement dit, les supernovae auraient un décalage vers le rouge inférieur à ce que l'on attendrait d'objets si lointains. Pour expliquer le décalage vers le rouge inférieur, les cosmologistes postulent que l'Univers s'est dilaté plus lentement par le passé qu'ils ne l'avaient prévu, tirant moins la lumière qu'il emporte.

La force

Pourquoi l'expansion cosmique ralentit-elle moins vite que prévu ? Dans un univers composé de matière ordinaire, la gravité ralentit progressivement l'expansion. Un faible ralentissement, comme l'indiquent les mesures sur les supernovae, implique une faible densité globale de matière dans l'Univers.

Bien que cette conclusion s'oppose aux idées théoriques anciennes, elle s'accorde avec d'autres indices. Par exemple, les astronomes ont observé que certaines étoiles semblent plus vieilles que l'Univers. C'est évidemment impossible, mais si le cosmos s'est dilaté plus lentement par le passé, ainsi que l'indiquent les supernovae, l'Univers est plus vieux qu'on ne le croyait, et la contradiction disparaît. Les nouveaux résultats s'accordent également bien avec d'autres tentatives récentes pour déterminer la quantité totale de matière, comme les études des amas de galaxies (voir *Les amas de galaxies*, par Patrick Henry, Ulrich Briel et Hans Böhringer, *Pour la Science*, février 1999).

Les nouvelles mesures de la densité de matière dans l'Univers nous éclairent aussi sur la courbure de l'Univers, car, selon la relativité générale, courbure et expansion sont liées : la matière montre à l'espace-temps comment se courber, et l'espace-temps montre à la matière comment se mouvoir. Une faible densité de matière correspond à une courbure négative, ainsi qu'à un faible ralentissement de l'expansion. Si l'Univers est presque vide, la courbure négative est maximale,



5. LA LUMINOSITÉ DES SUPERNOVAE ne varie pas, en fonction du décalage spectral (points rouges), comme le prévoyaient de nombreux théoriciens : l'expansion de l'Univers ne ralentit pas aussi vite que si l'Univers était «plat» (ligne bleue) et que si la constante cosmologique était nulle (pas d'énergie du vide). Les observations montrent que l'Univers ne contient que 20 pour cent de la matière nécessaire pour le rendre plat (ligne noire). L'expansion semble même accélérer, peut-être à cause d'une constante cosmologique non nulle (ligne rouge).

de sorte que l'atténuation des objets lointains est forte.

La grande surprise vient de ce que les supernovae que nous observons sont plus faibles que prévu, même pour un Univers presque vide (qui possède une courbure négative maximale). Nos observations semblent indiquer que l'expansion accélère progressivement. Un Univers composé uniquement de matière ordinaire ne peut croître de cette manière, parce que la gravité est toujours attractive. Cependant, conformément à la théorie d'Einstein, l'expansion peut accélérer si de l'énergie remplit l'espace partout. Cette étrange «énergie du vide» figure dans les équations d'Einstein sous la forme d'une constante dite cosmologique. Contrairement aux formes ordinaires de masse et d'énergie, l'énergie du vide agirait comme une gravité répulsive qui peut écarteler l'Univers à des vitesses croissantes (voir

L'antigravité, par Lawrence Krauss, page 42). Une fois cette possibilité extraordinaire admise, nous pouvons parfaitement expliquer nos observations, même en conservant la géométrie plate chère aux théoriciens.

Ainsi, ce résultat est le plus excitant que nous pouvions espérer : une forme d'énergie étrange communiquerait une force répulsive à longue portée. Toutefois, il est si surprenant que nous demeurons raisonnablement sceptiques. Heureusement, des progrès de la technique d'observation, tels les nouveaux détecteurs infrarouges et le télescope spatial de nouvelle génération, permettront bientôt de tester nos conclusions. Ces instruments plus précis et plus fiables nous permettront aussi de percevoir des balises encore plus faibles que celles qui s'allument il y a encore plus longtemps dans des galaxies beaucoup, beaucoup plus lointaines.

Craig HOGAN dirige le département d'astronomie de l'Université de Washington. Robert KIRSHNER enseigne l'astronomie à l'Université Harvard. Nicholas SUNTZEFF est astronome à l'observatoire de Cerro Tololo, au Chili.

Craig J. HOGAN, *The Little Book of the Big Bang*, Springer-Verlag, 1998.

S. PERLMUTTER et al., *Discovery of a Supernova Explosion at Half the Age of the Universe*, (*The Supernova Cosmology Pro-*

ject), in *Nature*, vol. 391, pp. 51-54, 1^{er} janvier 1998

Adam G. RIESS et al., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, in *Astronomical Journal*, vol. 116, n° 3, pp. 1009-1038, septembre 1998.

S. PERLMUTTER et al., *Measurement of W_n and W_s from 42 High Redshift Supernovae*, astro-ph/9812133, à paraître dans *Astrophysical Journal*.



L'antigravité

LAWRENCE KRAUSS

Certains cosmologistes expliquent les nouvelles observations des astronomes à l'aide d'équations qui comprennent un terme découvert par Einstein : la constante cosmologique.

En 1946, George Orwell écrivait : « Voir ce qui se trouve devant son nez demande un effort constant. » C'est bien le cas en cosmologie. L'Univers est tout autour de nous, nous en faisons même partie, mais les cosmologistes sont parfois obligés d'explorer ses confins pour glaner des informations sur les mécanismes qui ont conduit à notre existence sur la Terre. Les scientifiques croient en une simplicité des principes sous-jacents de la nature, mais démêler leur écheveau n'est pas une mince affaire, car les indices peuvent être subtils. Les récentes observations d'explosions stellaires lointaines l'ont bien montré. Contre toute attente, l'analyse de ces supernovae indique que l'expansion de l'Univers accélère au lieu de ralentir.

Depuis 1929, les astronomes savent que l'Univers se dilate : Edwin Hubble montra que les galaxies lointaines s'écartent les unes des autres comme si l'Univers était en expansion uniforme. À ces mouvements de récession s'oppose la gravité collective des amas de galaxies et de toutes les planètes, étoiles, gaz et poussières qu'elles contiennent. Même l'attraction gravitationnelle d'une plume ralentit, d'une quantité infime, l'expansion cosmique. Voici une dizaine d'années, théorie et observations ont semblé montrer que l'Univers contenait suffisamment de matière pour ralentir l'expansion sans jamais l'arrêter. En jargon géométrique, qu'Albert Einstein encourageait, l'Univers semblait « plat ».

L'Univers plat est intermédiaire entre deux autres géométries possibles, dites « ouverte » et « fermée ». Dans la lutte de la matière contre l'expansion du Big Bang, le cas ouvert représente la victoire de l'expansion : l'Univers

se dilate indéfiniment. Dans le cas fermé, la gravité l'emporterait, et l'expansion serait suivie d'une contraction : l'Univers finirait en s'écrasant sur lui-même. L'Univers est un peu comme une fusée : si on lance celle-ci à une vitesse supérieure à la vitesse de libération, la fusée échappe à l'attraction gravitationnelle et s'éloigne vers l'infini (cas ouvert) ; si on lance la fusée à une vitesse inférieure, elle finit par retomber sur Terre (cas fermé) ; enfin, si la vitesse initiale est exactement égale à la vitesse de libération, la fusée reste en orbite (cas plat).

Dans les années 1980, pour résoudre certains paradoxes de la théorie classique, les cosmologistes proposent la théorie de l'inflation. Selon cette théorie, un très court instant après le Big Bang, l'Univers s'est dilaté extrêmement rapidement, et l'Univers que nous habitons serait alors plat, en équilibre parfait entre les deux tendances antagonistes. Bien que l'Univers semble contenir trop peu de matière visible pour être plat, la dynamique céleste indique qu'il existe beaucoup de matière invisible. La majeure partie de la matière dans les galaxies et dans les amas de galaxies échappe aux télescopes. Il y a une dizaine d'années, j'ai nommé « quintessence » cette matière sombre, reprenant le terme utilisé par Aristote pour qualifier l'éther, la matière invisible supposée imprégner tout l'espace et dont l'idée a été reprise au XIX^e siècle (voir *La matière sombre dans l'Univers*, par Lawrence Krauss, in *Pour la Science*, février 1987).

Pourtant un solide faisceau de preuves montre aujourd'hui que même la matière invisible ne suffit pas à rendre l'Univers plat. Peut-être l'Univers n'est-il pas plat, mais

© 1999 J. KRAUSS



1. LE «VIDE» N'EST PAS VIDE : l'espace est peuplé de particules élémentaires qui surgissent et disparaissent trop rapidement pour être détectables. Leur présence est prévue par la mécanique quantique et par la relativité restreinte. L'énergie combinée de toutes ces particules «virtuelles», comme d'autres formes d'énergie, exercerait une force à longue portée soit attractive, comme la gravitation, soit répulsive selon des principes physiques qui ne sont pas encore compris. Aux échelles macroscopiques, cette énergie agirait comme la constante cosmologique proposée par Albert Einstein.

ouvert, auquel cas les cosmologistes doivent modifier – voire rejeter – la théorie de l'inflation (voir *L'inflation de l'Univers*, par Martin Bucher et David Spergel, page 50). En tout cas, si l'Univers est réellement plat, ses constituants principaux ne peuvent être ni de la matière visible, ni de la matière sombre, ni du rayonnement. L'Univers serait alors composé principalement d'une forme plus «éthérée» d'énergie, qui occuperait l'espace vide, y compris celui qui se trouve juste sous notre nez.

Attraction fatale

L'idée d'une telle énergie a une histoire longue et mouvementée. Elle commence avec la publication de la théorie de la relativité générale par Einstein, plus de dix ans avant que Hubble ne démontre l'expansion de l'Univers. En

reliant l'espace au temps et à la matière, la relativité promettait ce qui avait été jusque-là impossible : une compréhension de la dynamique des objets dans l'Univers et aussi de l'Univers lui-même. Toutefois, Einstein restait insatisfait de sa théorie, car, contrairement aux autres forces fondamentales qui s'exercent sur la matière, la gravité n'est qu'attractive. Or cette implacable attraction gravitationnelle de la matière entraînerait finalement la contraction de l'Univers. Ne croyant pas à cette idée, Einstein ajouta à ses équations, un «terme cosmologique», qui stabilisait l'Univers par une nouvelle force à longue portée. Une valeur positive de ce terme devait représenter une force répulsive, une sorte d'antigravité, qui soutiendrait l'Univers contre son propre poids.

Quelques années après, quand on découvrit l'expansion de l'Univers,

Einstein reconnut que l'ajout de cette constante était sa «plus grande erreur». Il l'abandonna cinq ans après son introduction. En 1923, dans une lettre au mathématicien Hermann Weyl, Einstein écrivit que «si le monde n'est pas quasi statique, alors au diable le terme cosmologique» (voir la figure 3). Comme l'éther avant lui, cette constante semblait vouée aux oubliettes de l'histoire.

Les physiciens étaient également heureux de se débarrasser de cet intrus. Dans la théorie de la relativité générale, l'énergie est la source des forces gravitationnelles (attractives ou répulsives), et la matière est simplement une forme d'énergie. La constante cosmologique est toutefois de nature différente : l'énergie qui y est associée ne dépend pas de la position ou du temps, d'où le terme «constante cosmologique». La force engendrée par la constante cosmologique opère même en l'absence totale de matière ou de rayonnement. Par conséquent, sa source doit être une énergie curieuse, qui réside dans l'espace vide. La constante cosmologique, comme l'éther, dote le vide d'une aura quasi métaphysique. Avec son abandon, la nature redevenait raisonnable.

Le redevenait-elle vraiment ? Dans les années 1930, le fantôme de la constante cosmologique réapparut lorsque les physiciens cherchèrent à combiner les lois de la mécanique quantique et celles de la théorie de la relativité restreinte. Paul Dirac et, plus tard, Richard Feynman, Julian Schwinger et Shinichiro Tomonaga montrèrent que l'espace vide est plus compliqué qu'on ne l'imaginait : des particules élémentaires surgissent spontanément du néant et y retournent, pour peu que leur durée de vie soit si courte que personne ne puisse la mesurer directement. Ces particules virtuelles peuvent sembler aussi abracadabrantes que des anges assis sur une tête d'épingle, mais la différence existe : ces particules invisibles engendrent des effets mesurables, telles des modifications des énergies possibles pour les électrons dans les atomes ou des forces entre des plaques métalliques proches (voir la figure 4). La théorie des particules virtuelles rend compte des observations jusqu'à la neuvième décimale (habituellement, les anges n'ont pas d'effet sur les atomes). Autrement dit, le vide n'est pas vide.

Types de matière			
Type	Composition probable	Indice principal	Contribution approximative à Ω
Matière visible	Matière ordinaire (composée principalement de protons et de neutrons) qui forme étoiles, poussières et gaz	Observations télescopiques	0,01
Matière sombre baryonique	Matière ordinaire trop faible pour être vue, peut-être naines brunes ou noires (objets compacts massifs du halo, ou MACHO)	Calculs de la nucléosynthèse dans le Big Bang et proportion du deutérium	0,05
Matière sombre non baryonique	Particules exotiques comme les «axions», les neutrinos massifs ou les particules massives faiblement interagissantes (WIMP)	La gravité de la matière visible est insuffisante pour expliquer les vitesses orbitales des étoiles au sein des galaxies et des galaxies dans les amas	0,3
«Matière sombre» cosmologique	Constante cosmologique (énergie de l'espace vide)	Le rayonnement du fond diffus cosmologique suggère un cosmos plat, mais il n'y a pas assez de matière baryonique ou non baryonique pour cela	0,6

2. L'UNIVERS contient des milliards et des milliards de galaxies, chacune contenant un nombre tout aussi grand d'étoiles. Pourtant l'essentiel de la masse de l'Univers semble constitué de «matière sombre», dont l'identité reste incertaine. La constante cosmologique, si son existence se confirme, agirait comme une forme encore plus exotique de matière sombre aux échelles cosmologiques. La quantité Ω est le quotient de la densité de matière ou d'énergie par la densité à laquelle l'Univers serait plat.

La réalité virtuelle

Si les particules virtuelles changent les propriétés des atomes, modifient-elles aussi l'expansion de l'Univers? En 1967, l'astrophysicien soviétique Yakov Zeldovich a montré que l'énergie des particules virtuelles devait agir précisément comme l'énergie associée à la constante cosmologique. Toutefois, les calculs de mécanique quantique révélèrent une surprise : ils conduisaient à la prévision de l'existence d'un ensemble de particules virtuelles qui couvrent toutes les longueurs d'onde possibles ; lorsqu'on additionnait les effets de toutes ces particules, l'énergie totale devenait infinie. Même quand on négligeait les effets quantiques inférieurs à une certaine longueur d'onde, pour lesquels la combinaison du comportement gravitationnel et quantique est mal connue, l'énergie du vide calculée était 120 ordres de grandeur supérieure à celle de l'énergie contenue dans toute la matière de l'Univers!

Quel pourrait être l'effet d'une constante cosmologique aussi gigantesque? Nous pouvons facilement imposer une limite supérieure à sa valeur. Tendons le bras et regardons nos doigts. Si la constante cosmologique était aussi grande que le suggère naïvement la théorie quantique, l'espace entre nos yeux et notre main se dilaterait si vite que la lumière émise par la main n'atteindrait jamais les yeux. Le fait que nous puissions voir non seulement jusqu'au bout de notre bras, mais également jusqu'aux confins de l'Univers impose une limite supérieure à cette constante : environ 120 ordres de grandeur inférieure à l'estimation mentionnée! Cette incompatibilité entre la théorie et les observations est la plus grande et la plus troublante de toute la physique moderne (voir *Le mystère de la constante cosmologique*, par Larry Abbott, in *Pour la Science*, juillet 1988).

Pour remédier à cette difficulté, on suppose qu'une loi physique encore inconnue annule la constante cosmologique. Les théoriciens aimeraient bien se débarrasser de cette constante, mais diverses observations astronomiques – l'âge de l'Univers, la densité de matière et la nature des structures cosmiques – suggèrent indéniablement qu'elle pourrait n'être pas tout à fait nulle.

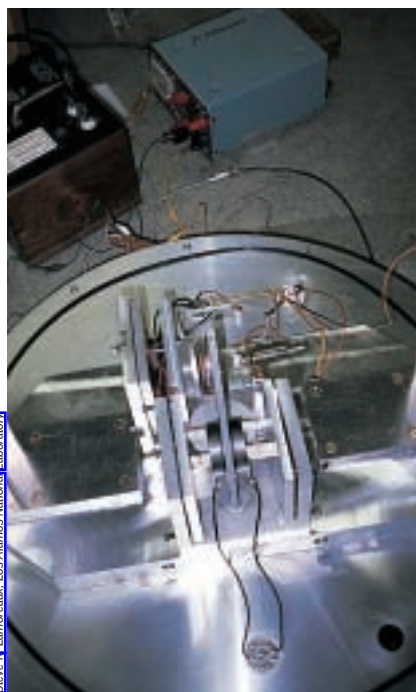
Quel est l'âge de l'Univers? Cette question est l'une des plus lancinantes de la cosmologie moderne. En mesurant les vitesses des galaxies, les astronomes calculent le temps qu'il leur a fallu pour atteindre leurs positions actuelles, en supposant qu'elles soient toutes issues du même endroit. Si l'Univers se dilate à vitesse constante (en première approximation, on peut ignorer le ralentissement dû à la gravité), l'âge de l'Univers serait le quotient de la distance intergalactique par la vitesse de séparation, c'est-à-dire l'inverse de la célèbre constante de Hubble.

Plus la valeur de la constante de Hubble est élevée, plus la vitesse d'expansion est rapide et plus l'Univers est jeune.

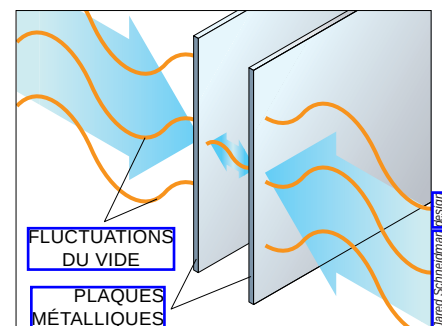
Hubble estimait que sa constante éponyme était égale à environ 500 kilomètres par seconde et par mégaparsec (un mégaparsec correspond environ à trois millions d'années-lumière). Autrement dit, deux galaxies éloignées d'un mégaparsec s'écartent de 500 kilomètres par seconde. Cette estimation est manifestement fautive, car elle conduit à un âge de l'Univers de deux milliards d'années inférieur à l'âge de la Terre (environ quatre milliards



3. CETTE LETTRE D'EINSTEIN au mathématicien allemand Hermann Weyl concède qu'un univers de taille constante serait instable et devrait se dilater ou se contracter : « Dans l'Univers de De Sitter, deux points fluides et instables se séparent à vitesse croissante. S'il n'y a pas de monde quasi statique, alors au diable le terme cosmologique. »



Steve A. Lamoreaux, Los Alamos National Laboratory



4. L'EFFET CASIMIR met en évidence que le vide est peuplé de « particules virtuelles ». Cet effet correspond à une attraction entre des objets métalliques – par exemple, une force attractive entre deux plaques métalliques parallèles (en haut). L'espacement fini entre les plaques empêche la matérialisation dans l'interstice de particules virtuelles plus grandes qu'une certaine longueur d'onde. Comme il y a alors plus de particules à l'extérieur des plaques qu'entre elles, les plaques se rapprochent (à droite). L'effet Casimir dépend clairement de la forme des plaques, ce qui permet aux physiciens de l'isoler des autres forces de la nature.

d'années). Si l'on tient maintenant compte de l'attraction gravitationnelle de la matière, on calcule que les objets se déplaçaient plus vite dans le passé, et que leurs positions actuelles sont donc atteintes plus rapidement que si leur vitesse avait été constante. Cette nouvelle hypothèse réduit encore d'un tiers l'âge estimé, ce qui aggrave la contradiction.

Au cours des 70 dernières années, les astronomes ont affiné leur détermination de la vitesse d'expansion, mais ils n'ont pas réussi à éliminer la difficulté. Avec le lancement du télescope spatial *Hubble* et le développement de nouvelles techniques d'observation, les mesures de la constante de Hubble de ces dix dernières années (entre 50 et 100 kilomètres par seconde et par mégaparsec) commencent finalement à converger. Selon l'une des dernières estimations, la valeur de la constante de Hubble serait comprise entre 65 et 81, avec une valeur la plus probable égale à 73 kilomètres par seconde et par mégaparsec (voir *L'expansion de l'Univers*, par Wendy Freedman, in *Pour la Science*, janvier 1993). Ces résultats placent la limite supérieure sur l'âge d'un univers plat à environ dix milliards d'années.

La crise de l'âge

Cette valeur résout-elle les conflits? Hélas non, car les astronomes observent des objets ayant plus de dix milliards d'années. Les amas globulaires sont parmi les objets les plus anciens de notre Galaxie. Ces groupes denses d'étoiles situés pour la plupart à sa périphérie se sont probablement formés avant le reste de la Voie lactée. En se fondant sur la vitesse à laquelle ces étoiles consomment du combustible nucléaire, on estime que leur âge est compris entre 15 et 20 milliards d'années. C'est plus que les dix milliards annoncés!

En 1995, afin de déterminer si ce conflit d'âge provenait de la cosmologie ou de la modélisation stellaire, nous avons réévalué l'âge des amas globulaires. Nous avons conclu que les amas les plus vieux avaient jusqu'à 12,5 milliards d'années, ce qui

Résumé des valeurs déduites de la densité de matière cosmique

Observation	$\Omega_{\text{matière}}$
Age de l'Univers	≤ 1
Densité de protons et de neutrons	0,3-0,6
Amas de galaxies	0,3-0,5
Evolution des galaxies	0,3-0,5
Fond diffus cosmologique	≤ 1
Supernovae de type Ia	0,2-0,5

5. LES MESURES de la contribution matérielle à Ω sont à peu près concordantes (on note Ω le quotient de la densité mesurée et de la densité critique ; $\Omega = 1$ correspond à un univers plat). Bien que chaque type de mesures soit contestable, la plupart des astronomes acceptent aujourd'hui que la matière seule ne rende pas Ω égal à un. Toutefois, d'autres formes d'énergie, comme la constante cosmologique, pourraient y contribuer.

contredisait toujours l'âge d'un univers plat, dominé par la matière.

Voici deux ans, le satellite *Hipparcos* de l'Agence spatiale européenne mesura les positions précises de plus de 100 000 étoiles ; leurs distances, ainsi que celles des amas globulaires, furent réévaluées. Ces nouvelles mesures ont conduit à recalculer l'âge des étoiles, car les nouvelles luminosités absolues, déduites des distances, correspondent à des vitesses différentes de consommation du carburant nucléaire par les étoiles et, donc, à des durées de vie différentes de celles qui avaient été calculées. Compte tenu des erreurs d'observation, il semble maintenant que les amas globulaires pourraient avoir seulement dix milliards d'années, ce qui serait compatible avec les âges cosmologiques.

Toutefois, cet accord marginal est inconfortable, parce qu'il requiert que les déterminations soient chacune à l'extrémité de l'intervalle possible. Pourquoi, alors, ne pas admettre que nous ne vivons pas dans un Univers plat dominé par la matière? Si nous acceptons de vivre dans un Univers peu dense, ouvert, et dont la décélération serait moins rapide, les difficultés s'amenuiseraient. Toutefois, même ainsi, l'âge de l'Univers n'est supérieur à 12,5 milliards d'années que si l'Univers est dominé non pas par la matière, mais par une constante cosmologique : la force

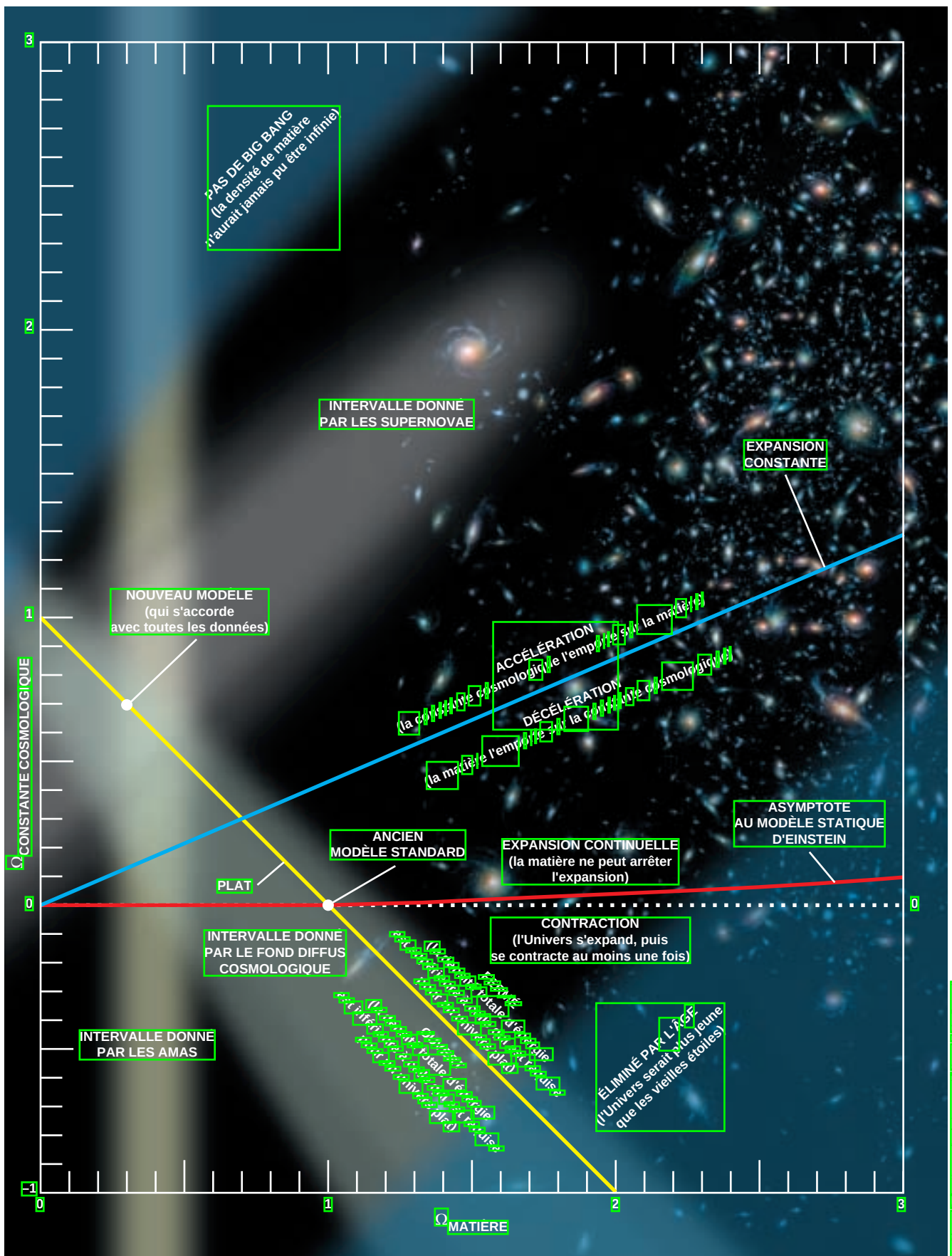
répulsive résultante accélérerait l'expansion ; les galaxies s'éloigneraient plus lentement qu'aujourd'hui, mettant plus de temps pour atteindre leurs séparations actuelles, de sorte que l'Univers serait plus vieux.

Alors que les cosmologistes évoquaient ces idées, d'autres observations ont contribué à ébranler l'édifice théorique classique. Notamment, les astronomes ont sondé des régions toujours plus grandes du cosmos et mieux recensé la matière qui s'y trouvait. Il est aujourd'hui clair que la quantité totale de matière est insuffisante pour que l'Univers soit plat.

Pour obtenir un recensement précis de la matière de l'Univers, les astronomes doivent estimer la synthèse des éléments légers au cours du Big Bang. Les éléments légers du cosmos – l'hydrogène, l'hélium et leurs isotopes plus rares, tel le deutérium – furent créés dans l'Univers primordial en quantités déterminées par le nombre de protons et de neutrons initialement présents. Ainsi, en comparant les proportions des divers isotopes, les astronomes déduisent la quantité totale de matière ordinaire produite peu après le Big Bang (il pourrait exister, bien sûr, une autre matière qui ne se composerait pas de protons et de neutrons).

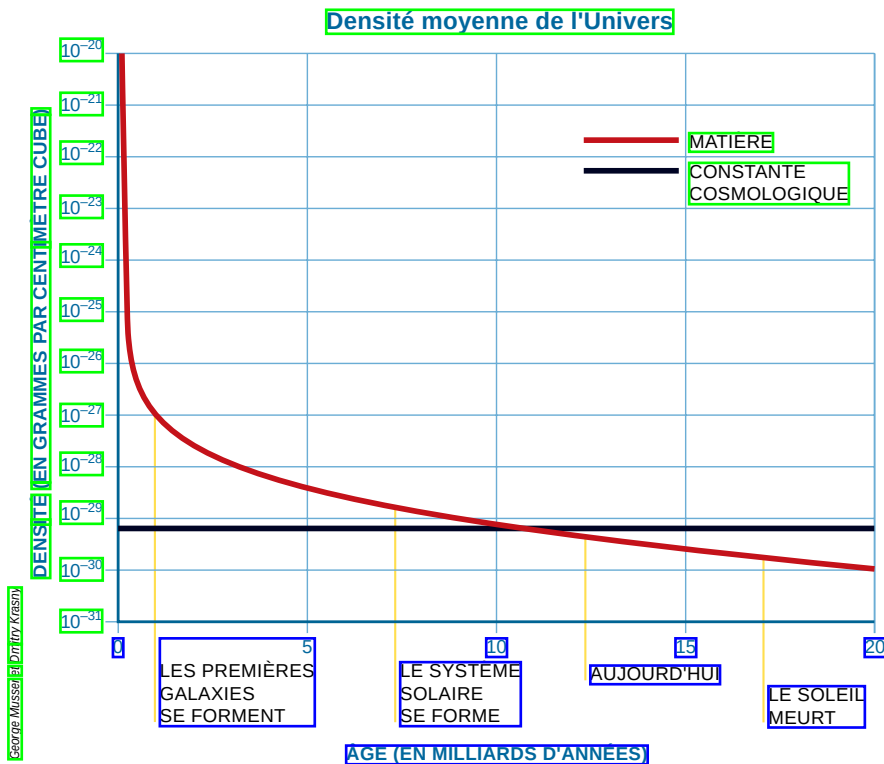
Ces estimations progressèrent en 1996, lorsque David Tytler, Scott Burles et leurs collègues de l'Université de San Diego déterminèrent la quantité primordiale de deutérium en mesurant l'absorption de la lumière d'un quasar par des nuages d'hydrogène intergalactiques. Comme ces nuages n'ont jamais contenu d'étoiles, leur deutérium ne peut avoir été synthétisé que lors du Big Bang. L'étude de ce deutérium montre que la densité moyenne de matière ordinaire est seulement quatre à sept pour cent de la quantité totale nécessaire pour que l'Univers soit plat!

Les astronomes ont également évalué la densité de matière en étudiant les plus gros objets gravitationnellement liés de l'Univers : les amas de galaxies. Ces groupes de centaines de galaxies renferment l'essentiel de la matière visible. Ils sont principalement composés d'un gaz intergalactique



6. CE DIAGRAMME montre comment l'évolution de l'Univers dépend de deux quantités cosmologiques clés : la densité moyenne de matière (axe horizontal) et la densité d'énergie due à la constante cosmologique (axe vertical). Leurs valeurs, données ici en unités cosmologiques standards, ont trois effets distincts. D'abord, leur somme (qui représente l'énergie cosmique totale) détermine la géométrie de

l'espace-temps (ligne jaune). Ensuite, leur différence (qui représente l'intensité relative de l'expansion et de la gravité) détermine comment la vitesse d'expansion varie au cours du temps (ligne bleue). Ces deux effets ont été sondés par des observations récentes (régions plus claires). Le troisième, un équilibre des deux densités, détermine l'évolution de l'Univers (ligne rouge). Au total, les possibilités sont très nombreuses.



7. LA COINCIDENCE COSMIQUE est l'un des nombreux mystères cosmologique. La densité moyenne de matière ordinaire décroît quand l'Univers se dilate (en rouge). La densité équivalente représentée par la constante cosmologique est fixe (en noir). Pourquoi alors, malgré ces comportements opposés, ont-elles toutes les deux presque la même valeur aujourd'hui? S'agit-il d'un hasard, d'une nécessité pour que la vie ait pu exister ou l'indication d'un mécanisme encore inconnu?

chaud, qui émet des rayons X. La température de ce gaz, déduite du spectre des rayons X, dépend de la masse totale de l'amas : plus les amas sont massifs, plus la gravité est forte, de sorte que la pression et la température sont élevées ; les amas massifs sont ainsi plus chauds. En 1993, après l'étude de plusieurs amas, des astronomes allemands avaient déduit que la matière lumineuse représentait seulement 10 à 20 pour cent de la masse totale des objets. Ces résultats, combinés aux mesures du deutérium, impliquent que la densité totale de la matière dans les amas – incluant les protons et les neutrons, ainsi que des particules plus exotiques comme certains candidats pour la matière sombre – est au plus égale à 60 pour cent de celle requise pour que l'Univers soit plat.

Un troisième ensemble d'observations, qui concerne aussi la répartition de la matière aux échelles les plus grandes, conforte l'idée que l'Univers ne contient pas assez de matière pour être plat. Aucune partie de la cosmologie n'a probablement autant progressé au cours des 20 dernières années que la compréhension de l'origine et de la nature des structures cosmiques.

Les astronomes ont longtemps supposé que les galaxies se sont formées à partir de petites concentrations de matière dans l'Univers jeune, mais on ignorait comment ces concentrations initiales étaient apparues. La théorie de l'inflation, dans les années 1980, fut le premier mécanisme plausible : elle stipulait une amplification des fluctuations quantiques à des dimensions macroscopiques.

Les simulations numériques de la croissance des structures après l'inflation ont montré que, si la matière sombre n'était pas composée de neutrons et de protons, mais d'un autre type de particules (telles que les WIMP, des particules massives qui interagissent peu avec la matière), de minuscules rides dans le fond diffus cosmologique pouvaient croître et former les structures que nous observons aujourd'hui. De surcroît, avec une densité globale de matière élevée, des concentrations de matière devraient encore évoluer en amas de galaxies. La croissance relativement lente du nombre d'amas de galaxies dans l'histoire récente de l'Univers montre que la densité de matière est inférieure à 50 pour cent de celle qui est requise pour

un Univers plat (voir *Les amas de galaxies*, par Patrick Henry, Ulrich Briel et Hans Böhringer, in *Pour la Science*, février 1999).

Rien ne compte

L'ensemble des observations a finalement vaincu l'*a priori* théorique qui refusait l'introduction de la constante cosmologique. Deux possibilités demeurent : soit l'Univers est ouvert, soit il est rendu plat par une forme d'énergie qui n'est pas associée à la matière ordinaire. Pour savoir quelle est la solution, les astronomes veulent mesurer le fond diffus cosmologique avec précision, car la mesure des fluctuations de la température du fond diffus renseigne sur la géométrie de l'Univers. Selon les premières indications apportées par le satellite COBE et par des détecteurs embarqués sur des ballons, l'Univers serait plat. Par ailleurs, pour la première fois, les mesures de la lumière émise par les supernovae lointaines indiquent que l'expansion de l'Univers accélère ; la constante cosmologique que l'on estime alors correspond à celle que l'on déduit d'autres observations (voir *Des supernovae pour sonder l'espace-temps*, par Craig Hogan, Robert Kirshner et Nicholas Suntzeff, page 36). Le fond diffus cosmologique, qui reflète la structure de l'Univers peu après le Big Bang, révèle la géométrie de l'Univers, qui dépend de la densité totale d'énergie, quelle que soit sa forme, tandis que les supernovae sondent directement le taux d'expansion de l'Univers, qui dépend de la différence entre la densité de matière (qui ralentit l'expansion) et la constante cosmologique (qui peut l'accélérer).

Ainsi les cosmologistes estiment que la constante cosmologique contribuerait pour 40 à 70 pour cent de l'énergie nécessaire pour rendre l'Univers plat (voir la figure 6). Soyons pourtant prudents : il est dit, dans la communauté des cosmologistes, qu'une théorie dont les prédictions confirment toutes les observations est probablement fautive, ne serait-ce que parce que certaines mesures ou certaines prédictions sont sans doute erronées. Sans attendre, les théoriciens se précipitent déjà pour comprendre ce qui aurait été impensable voilà 20 ans : l'existence d'une constante cosmologique positive,

mais bien inférieure à celle prévue par les théories quantiques actuelles. Une loi physique inconnue réduirait l'énergie du vide calculée par la théorie quantique, sans l'annuler complètement. Par un ajustement fin, cette loi enlèverait l'énergie des particules virtuelles jusqu'à la 123^e décimale sans toucher à la 124^e. Si deux effets très grands se compensent presque exactement, c'est qu'il doit y avoir une raison fondamentale sous-jacente, et pas uniquement un hasard numérique.

Steven Weinberg et ses collègues de l'Université d'Austin étudient le problème à l'aide du principe anthropique. Si l'Univers observé n'est qu'un parmi une infinité d'Univers possibles – chacun pouvant avoir des constantes physiques légèrement différentes, comme le proposent certaines versions de la théorie de l'inflation combinée aux idées émergentes de la gravité quantique –, alors les physiciens espèrent estimer la grandeur de la constante cosmologique en cherchant dans quels univers pourraient se développer une vie intelligente. Avec d'autres théoriciens, S. Weinberg a obtenu un résultat compatible avec la grandeur apparente de la constante cosmologique aujourd'hui.

Cependant, la plupart des théoriciens ne sont pas convaincus : pourquoi la valeur de la constante cosmologique ne résulterait-elle pas d'une théorie physique plutôt que de l'histoire (voir *Le principe anthropique*, par George Gale, in *Pour la Science*, février 1982).

Certains ont poursuivi des travaux commencés par Paul Dirac, qui accordait beaucoup d'importance aux grands nombres sans dimension, les nombres « purs », obtenus par combinaison algébrique des constantes fondamentales. Par exemple, il avait conclu que la constante gravitationnelle, G , est inversement proportionnelle à l'âge de l'Univers, et qu'elle diminue donc avec le temps (voir *Paul Dirac et la beauté de la physique*, par Corby Hovis et Helge Kragh, in *Pour la Science*, juillet 1993). La constante cosmologique pourrait également varier : si la constante cosmologique était fixe et non nulle, nous vivrions au seul moment de l'histoire cosmique où la densité de matière, qui décroît quand l'Univers se dilate, est comparable à l'énergie du vide. Pourquoi cette coïncidence ? Plusieurs groupes ont imaginé qu'il ne s'agit pas d'une coïncidence : une forme inconnue

Le destin de l'univers

Avec les découvertes astronomiques récentes, les cosmologistes prévoient une évolution de l'Univers bien différente de celle qui était naguère admise. La cosmologie prédisait deux évolutions selon la géométrie de l'Univers ou, de manière équivalente, selon la densité moyenne de matière qu'il renferme. Si sa densité moyenne était notable, l'Univers semblait « fermé », et son expansion était vouée à l'arrêt ; il se serait ensuite contracté et aurait fini par imploser. Si la densité était inférieure à la valeur critique, l'Univers aurait été « ouvert », et il se serait dilaté indéfiniment. Un univers « plat », pour lequel la densité est égale à la valeur critique, se dilate indéfiniment, mais de plus en plus lentement.

Pour établir ces scénarios, on supposait que la constante cosmologique était nulle. Si elle ne l'est pas, c'est elle – et non la matière – qui détermine l'évolution de l'Univers. En effet, la constante cosmologique correspond à une densité d'énergie fixe dans l'espace. La matière est impuissante : lorsque le rayon de l'Univers

double, la densité diminue d'un facteur huit, ainsi que les forces qui limitent l'expansion. Dans un Univers en expansion, la densité d'énergie associée à la constante cosmologique finit par l'emporter. Si la constante cosmologique est positive, elle engendre une force répulsive à longue portée, et l'Univers continuera à se dilater, même si la densité totale d'énergie dans la matière et dans l'espace est supérieure à la valeur critique (des valeurs très négatives de la constante sont exclues, parce que la force attractive résultante aurait déjà conduit l'Univers à sa fin).

La théorie de la relativité générale suppose que la constante cosmologique est constante, mais si la densité d'énergie du vide varie avec le temps, l'évolution de l'Univers dépendra de la façon dont elle varie. La phase d'inflation de l'Univers primordial pourrait avoir été une période où la constante cosmologique a varié. L'Univers entre peut-être aujourd'hui dans une nouvelle ère d'inflation, qui peut finalement se terminer.

d'énergie cosmique agirait comme une constante cosmologique qui varierait au cours du temps.

Proposées par James Peebles et Bharat Ratra, de l'Université de Princeton, voici une dizaine d'années, ces idées ont été ravivées par les récentes découvertes sur les supernovae. En se fondant sur des concepts de la théorie des cordes, Robert Caldwell et Paul Steinhardt, de l'Université de Pennsylvanie, ont reproposé le terme « quintessence » pour décrire cette énergie variable. Que la matière sombre, qui originellement portait ce nom, semble maintenant presque banale en comparaison, donne une mesure de l'énigme théorique sous-jacente. Personnellement, j'aime le terme de quintessence, mais l'idée

ne me paraît pas convaincante parce qu'elle conduit à des théories *ad hoc*. L'énigme de la constante cosmologique demeure.

Comment les cosmologistes la résoudreont-ils ? De nouvelles mesures du fond diffus cosmologique, l'analyse continue des supernovae lointaines et l'étude des lentilles gravitationnelles des quasars lointains permettront de mieux cerner la constante cosmologique. Une chose est déjà certaine : la cosmologie des années 1980, postulant un Univers plat dominé par la matière, est morte. L'Univers est soit ouvert, soit empli d'une énergie inconnue. Je préfère la seconde hypothèse, mais on devra explorer les deux voies par des idées radicalement nouvelles de la physique. « Rien » ne pourrait être plus intéressant.

Lawrence KRAUSS dirige le département de physique de l'Université Case Western Reserve.

Steven WEINBERG, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, 1992.

P. James E. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1993.

Martin REES, *Before the Beginning : Our Universe and Others*, Addison-Wesley, 1997.

Brian CHABOYER, Pierre DEMARQUE, Peter J. KERNAN et Lawrence M. KRAUSS, *The Age of Globular Clusters in Light of Hipparcos : Resolving the Age Problem ?*, in *Astrophysical Journal*, vol. 494, n° 1, pp. 96-110, 10 février 1998.

Lawrence M. KRAUSS, *The End of the Age Problem, and the Case for a Cosmological Constant Revisited*, in *Astrophysical Journal*, vol. 501, n° 2, pp. 461-466, 10 juillet 1998.



L'inflation de l'Univers

MARTIN BUCHER • DAVID SPERGEI

L'Univers contiendrait moins de matière que ne le prévoit la théorie de l'inflation : il semble se dilater plus vite que prévu. Certains cosmologistes résolvent ce paradoxe avec une inflation en deux étapes.

Les cosmologistes ont plus de chance que les biologistes : l'Univers tout entier semble bien plus simple que le moindre organisme unicellulaire. À l'échelle de l'Univers, étoiles, galaxies et amas de galaxies ne sont que des taches minuscules, et la matière est répartie quasi uniformément ; ses mouvements ne sont soumis qu'à la seule force de gravitation.

Ces deux caractéristiques, uniformité à grande échelle et domination de la gravitation, sont les fondements de la théorie du Big Bang, selon laquelle notre Univers se dilate depuis 12 milliards d'années environ. Cette théorie explique bien la vitesse des galaxies les unes par rapport aux autres, les abondances relatives des éléments chimiques légers, la faible intensité du rayonnement cosmologique et l'évolution générale des structures astronomiques. L'évolution du cosmos semble presque indépendante des détails de son contenu.

Pourtant la théorie du Big Bang contient des paradoxes. Il y a 20 ans, les cosmologistes les ont résolus en incorporant dans la théorie des éléments de physique des particules, ce qui a conduit à la théorie de l'«inflation». Cette dernière est aujourd'hui en crise : des observations récentes contredisent ses prévisions concernant la densité moyenne de matière dans l'Univers. Ce dernier n'est peut-être pas aussi simple que les cosmologistes l'imaginaient : soit il contient de la matière ou de l'énergie étranges, soit la théorie de l'inflation est plus complexe que son énoncé actuel. Dans cet article, nous examinerons la seconde hypothèse.

La théorie du Big Bang ne décrit pas la naissance de l'Univers, mais seulement sa croissance et sa maturation : l'Univers primitif aurait été composé de rayonnement incroyablement chaud

et dense ; une zone plus petite qu'une bille de billard se serait agrandie jusqu'à former l'Univers observable aujourd'hui. Des parties de l'Univers, peut-être de dimension infinie, nous resteraient invisibles, parce que leur lumière n'a pas encore eu le temps de nous parvenir. L'idée d'un Univers en expansion est troublante. Quand le cosmos se dilate, la distance entre deux objets indépendants croît. Ainsi les galaxies lointaines s'écartent, parce que l'espace qui les sépare grandit, comme un gâteau qui gonfle sépare les raisins qu'il contient.

La loi de Hubble décrit une expansion uniforme : les galaxies s'éloignent de la Terre (ou de tout autre point de l'Univers) à des vitesses proportionnelles à leurs distances. Les objets de l'Univers n'obéissent pas tous à cette loi, parce que l'attraction gravitationnelle lutte contre le gonflement de l'espace : ainsi, le Soleil et la Terre ne s'écartent pas. En revanche, la loi de Hubble est vérifiée aux échelles les plus grandes. La version la plus simple de la théorie du Big Bang stipule que l'expansion s'est toujours déroulée à peu près au même rythme.

En se dilatant, l'Univers s'est refroidi, sa densité a diminué, et il est devenu de plus en plus complexe. Une partie du rayonnement s'est condensée en particules élémentaires. Puis, 300 000 ans après l'explosion primordiale, la température a chuté à 3 000 °C, ce qui a permis aux électrons et aux protons de se combiner et de former des atomes d'hydrogène. À ce moment, l'Univers est devenu transparent,

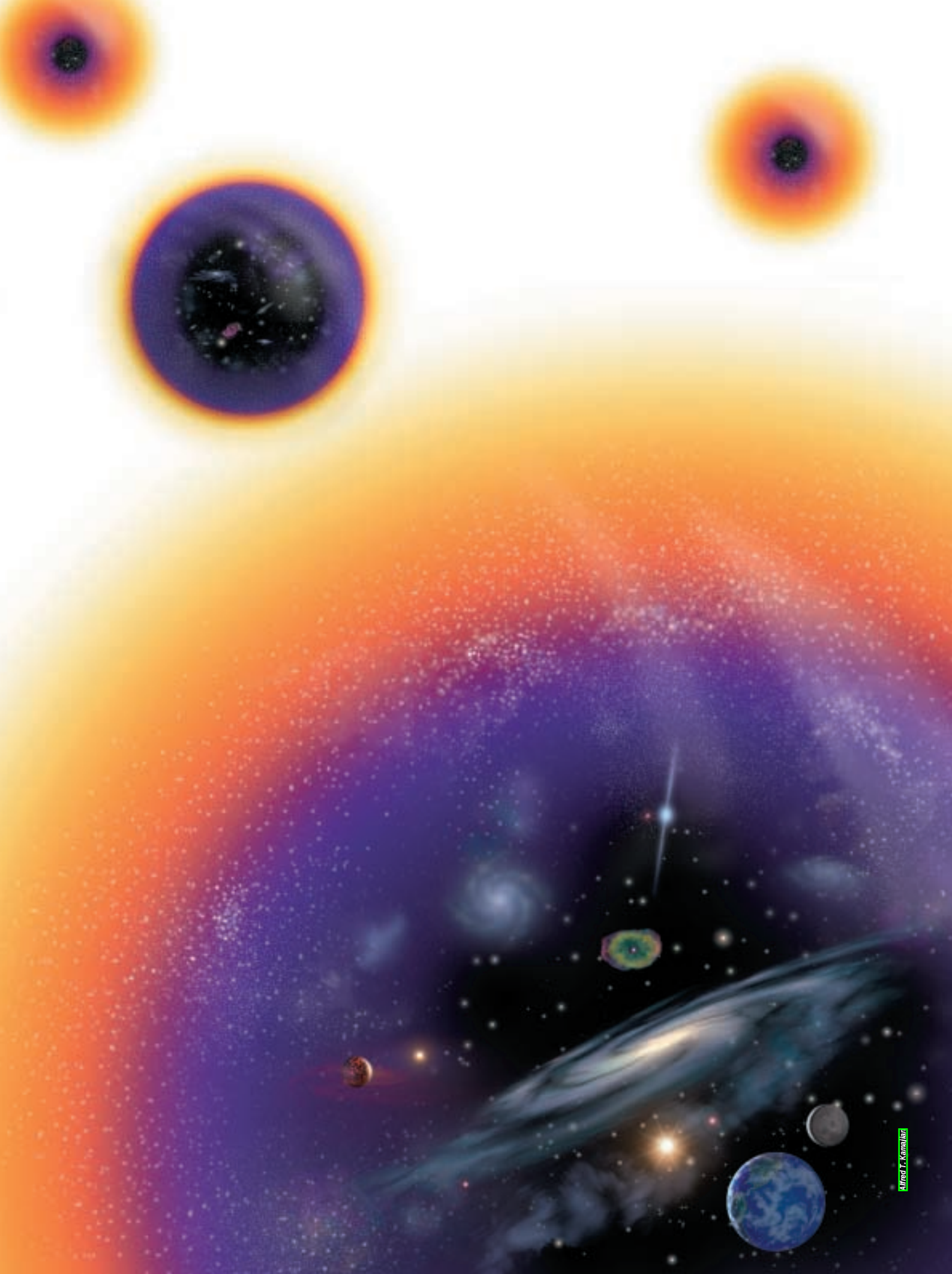
libérant un rayonnement cosmologique micrométrique diffus : l'homogénéité de ce rayonnement indique que les fluctuations de la densité de matière dans l'Univers primordial étaient inférieures à 1 pour 100 000. Pourtant, les petites concentrations de matière ont finalement crû et formé des galaxies et des amas de galaxies.

Une homogénéité inexpliquée

Malgré ses succès, cette théorie du Big Bang ne répond pas à certaines questions fondamentales. D'abord, pourquoi l'Univers est-il si uniforme ? C'est un fait que des régions du ciel à l'opposé l'une de l'autre se ressemblent beaucoup, malgré leur séparation de plus de 24 milliards d'années-lumière. Or, la lumière n'a encore voyagé que pendant 12 milliards d'années environ (l'âge de l'Univers), de sorte que ces régions n'ont encore jamais été en contact : elles n'ont pas eu le temps d'échanger de la matière, de la chaleur ou de la lumière pour homogénéiser leurs densités et leurs températures (voir la figure 4). L'uniformité de l'Univers a dû précéder l'expansion, mais la théorie ne l'explique pas.

Inversement, pourquoi l'Univers primordial présentait-il de petites hétérogénéités ? Heureusement qu'elles ont existé : sans ces minuscules fluctuations, l'Univers serait parfaitement homogène (quelques atomes par mètre cube), et ni la Voie lactée ni la Terre n'existeraient.

1. LES BULLES D'UNIVERS sont des univers complets qui croissent au sein d'un «multivers» plus grand et par ailleurs vide. Conformément à la théorie de la relativité générale, le temps et l'espace ont des significations différentes à l'intérieur et à l'extérieur de chaque bulle. Le temps perçu à l'intérieur augmente vers le centre de la bulle : la paroi de la bulle représente le Big Bang de cette bulle. Bien sûr, cette illustration montre une perspective impossible. Même si un observateur existait en dehors d'une bulle, il ne pourrait pas regarder à l'intérieur, parce que la bulle se dilate à la vitesse de la lumière.



Enfin, pourquoi la vitesse de l'expansion cosmique est-elle juste suffisante pour équilibrer l'attraction gravitationnelle de toute la matière de l'Univers? Tout écart notable à l'équilibre se serait amplifié : si l'expansion avait été un peu plus rapide, l'Univers semblerait aujourd'hui presque vide de matière ; si l'attraction gravitationnelle avait été un peu plus forte, l'Univers se serait contracté et serait redevenu une boule dense et chaude.

Les cosmologistes décrivent cet équilibre à l'aide de la variable Ω , rapport de l'énergie gravitationnelle à l'énergie cinétique (c'est-à-dire l'énergie contenue dans le mouvement de la matière en expansion). Ω est proportionnel à la densité de matière dans l'Univers : une densité supérieure correspond à une attraction gravitationnelle plus forte, donc à un Ω plus grand. Si Ω est égal à un, sa valeur ne change jamais. Sinon, sa valeur décroît ou croît par un processus auto-amplificateur, à mesure que l'une des deux formes d'énergie, cinétique ou gravitationnelle, devient prépondérante. Après des milliards d'années, Ω devrait être soit nul, soit infini. Comme la densité actuelle de l'Univers n'est ni

nulle ni infinie, on en déduit que, originellement, Ω était égal à un, à moins d'un milliardième de milliardième près. Pourquoi? La théorie du Big Bang n'offre d'autre explication que le hasard.

L'absence de réponse à ces questions n'invalides pas la théorie, qui explique bien plusieurs milliards d'années d'histoire cosmique ; en revanche, les cosmologistes pensent que la théorie est incomplète, et ils ont mis au point, au début des années 1980, la théorie de l'inflation.

L'inflation avant le Big Bang

La théorie de l'inflation pallie les insuffisances de la théorie du Big Bang, au prix de complications : elle postule que l'Univers, à son tout début, est passé par une période d'expansion très rapide (d'où son nom). Contrairement à l'expansion du Big Bang, qui ralentit au cours du temps, l'expansion de l'inflation est de plus en plus rapide. Elle écarte deux objets indépendants à une vitesse croissante, voire supérieure à celle de la lumière. Ce phénomène ne viole pas la théorie de la relativité, selon laquelle une masse ne peut se déplacer plus

vite que la lumière : c'est l'espace, situé entre les objets eux-mêmes au repos, qui se dilate plus vite que la lumière.

Cette rapide expansion initiale explique l'uniformité de l'Univers observé aujourd'hui. Toutes les parties de l'Univers visible ont été à un moment si proches que leur densité et leur température se sont homogénéisées. Puis, pendant l'inflation, les différentes régions de l'Univers ont cessé d'être en contact ; ce n'est qu'après la fin de l'inflation que la lumière, plus rapide que l'expansion du Big Bang, a commencé à diffuser vers l'intérieur de l'Univers. Il existe peut-être des hétérogénéités dans la partie invisible de l'Univers, mais nous devons attendre, pour les observer, que la lumière émise par ces régions parvienne jusqu'à nous.

Pour introduire une expansion rapide, la théorie de l'inflation utilise un élément emprunté à la physique des particules : le champ d'inflation, ou inflaton. En physique, les particules subatomiques, tels les protons et les électrons, sont représentées par des champs quantiques, qui ressemblent aux champs électrique, magnétique et gravitationnel familiers. Un champ est une fonction de

L'origine de l'Univers

Les lois de la physique décrivent généralement comment un système évolue à partir d'un état initial, mais les théories qui expliquent le commencement de l'Univers doivent contenir un type de loi complètement différent, qui explique l'état initial lui-même : les lois usuelles sont comme des cartes routières qui montrent comment aller de A à B, les nouvelles lois doivent expliquer pourquoi on part de A.

En 1983, James Hartle, de l'Université de Santa Barbara, et Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, ont appliqué la mécanique quantique à l'Univers tout entier, produisant une fonction d'onde cosmique, analogue à la fonction d'onde des atomes ou des particules élémentaires. Cette fonction d'onde (la fonction d'onde associée à une particule décrit la probabilité de présence de cette particule dans l'espace) détermine les conditions initiales de l'Univers. Selon cette approche, la distinction usuelle entre passé et futur perd son sens dans l'Univers primordial ; la direction temporelle prend les propriétés d'une direction spatiale. Tout comme l'espace n'a pas de bords, le temps n'a pas de commencement discernable. À l'Université Tufts, Alexandre Vilenkin a proposé une autre idée : l'utilisation d'une fonction d'onde «à effet tunnel» déterminée par les probabilités relatives qu'un univers de taille nulle devienne spontanément un univers de taille finie.

En 1998, S. Hawking et Neil Turok, aussi à Cambridge, ont proposé la création spontanée d'une bulle d'inflation ouverte à partir du néant. Cette nouvelle version de l'inflation ouverte évite l'hypothèse d'une désintégration du faux vide, mais A. Vilenkin et Andreï Linde, de l'Université Stanford, ont contesté les hypothèses de leur calcul.

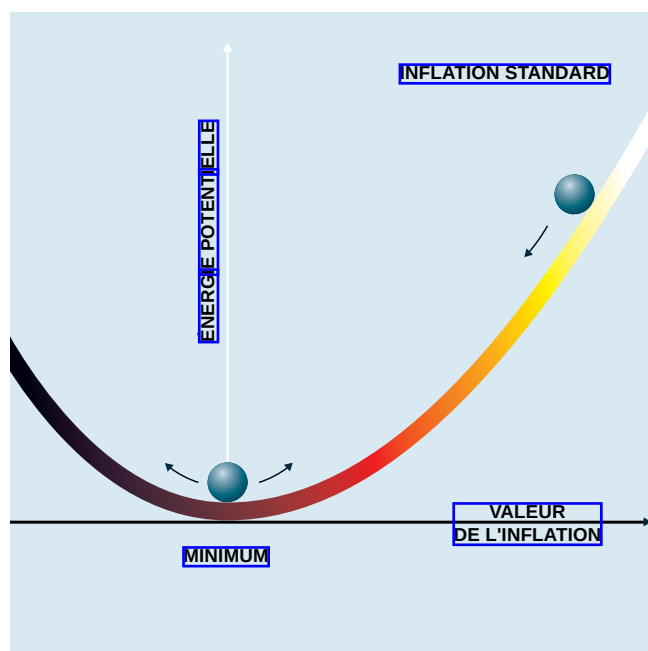
A. Linde a essayé de contourner le problème des conditions initiales en supposant que l'inflation est un processus sans

commencement. Dans la théorie la plus répandue, l'inflation prend fin quand le champ d'inflation roule en bas de sa courbe d'énergie potentielle. Cependant, en raison des fluctuations quantiques, le champ pourrait remonter le long de cette courbe. Autrement dit, il existerait en permanence des régions de l'Univers (qui forment en fait la majorité de son volume) qui sont en inflation. Elles entoureraient des poches d'espace où l'inflation a pris fin et où un univers stable s'est créé. Chaque poche serait caractérisée par des constantes physiques ; nous habiterions celle dont les constantes ont favorisé l'existence de la vie. Le reste de l'Univers continuerait de subir, et aurait toujours subi, l'inflation.

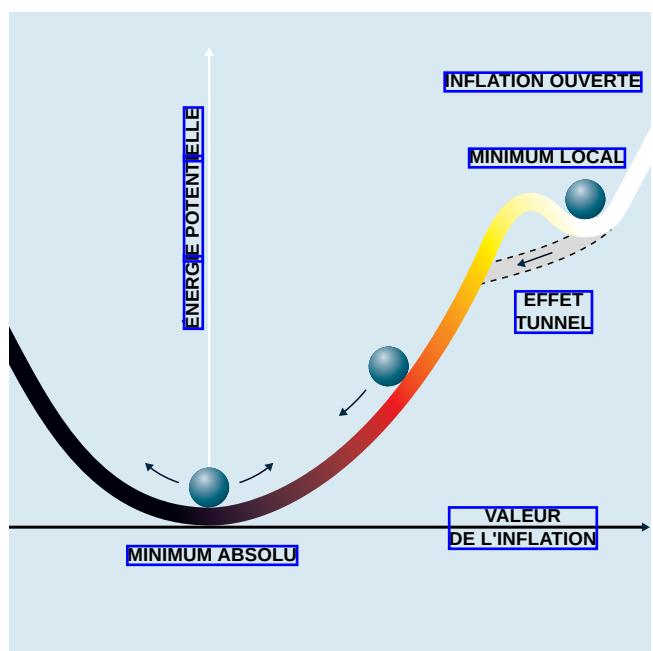
Toutefois, A. Vilenkin et Arvind Borde, aussi à Tufts, ont avancé que même cette extension de l'inflation ne décrit pas complètement l'origine de l'Univers. Bien que l'inflation puisse être éternelle dans le sens progressif du temps, elle nécessite un commencement absolu.

Richard Gott et Li-Xin Li, de l'Université de Princeton, ont récemment proposé que l'Univers soit cyclique, un peu comme si un voyageur remontait le temps et devenait son propre père. Une telle personne n'aurait pas d'arbre généalogique ; aucune explication de son origine n'est possible. Dans leur hypothèse, notre bulle s'est libérée du proto-univers cyclique ; elle n'est plus cyclique, mais en expansion et en refroidissement permanents.

Les astronomes testeront difficilement ces idées, car l'inflation efface presque toutes les caractéristiques observables de ce qui l'a précédée. De nombreux physiciens soupçonnent qu'une explication plus complète de l'Univers avant l'inflation, et de l'origine des lois de la physique, devra attendre une théorie vraiment fondamentale de la physique, peut-être la théorie des cordes.



2. LE CHAMP D'INFLATION, OU INFLATON, serait à l'origine de la force qui aurait provoqué l'expansion de l'espace. Ce champ se comporterait comme une bille roulant sur une pente : il tendrait à minimiser son énergie potentielle (axe vertical) en changeant sa valeur (axe horizontal). Les processus quantiques à l'aube du temps auraient communiqué à l'Univers une forte énergie potentielle. Selon la théorie de l'inflation (à gauche), l'inflaton roulerait vers sa valeur minimale, mais, selon la théorie de l'inflation ouverte (à droite), il se



serait arrêté dans un minimum local. Dans la plus grande partie de l'Univers, l'inflaton serait toujours dans ce minimum local, et l'inflation n'aurait jamais cessé. Dans quelques régions, le champ serait sorti du minimum local par «effet tunnel», et il aurait continué sa descente. L'une de ces régions serait la bulle d'Univers où nous vivons. Dans les deux modèles d'inflation, l'inflaton oscille dès qu'il approche de son point final, emplissant l'espace de matière et de rayonnement : c'est le Big Bang.

l'espace et du temps dont les oscillations sont interprétées comme des particules. Les champs sont responsables de la transmission des forces. L'inflaton est associé à une force «antigravitationnelle» qui étire l'espace.

À une certaine valeur de l'inflaton correspond une énergie potentielle. Comme une bille roulant le long d'une colline, l'inflaton roule vers le fond de son puits de potentiel (voir la figure 2, à gauche), mais l'expansion de l'Univers introduit ce que l'on peut décrire comme un frottement cosmique, qui s'oppose à la décroissance de l'énergie potentielle. Tant que ce frottement domine, l'énergie potentielle diminue très lentement, et la valeur de l'inflaton aussi : l'intensité de la force d'antigravitation augmente par rapport à celle de la gravitation, car la densité de l'Univers décroît. L'expansion de l'Univers est alors de plus en plus rapide. Finalement l'inflaton faiblit, et son énergie résiduelle se transforme en rayonnement et en particules (la matière que nous connaissons aujourd'hui). Ensuite l'expansion de l'Univers se poursuit conformément à la théorie du Big Bang.

Les cosmologistes étudient les conséquences des différentes théories sur la forme de l'Univers. Selon la

théorie de la relativité générale, la gravitation est en effet un phénomène géométrique : la matière et l'énergie déforment le tissu de l'espace-temps, tordant les trajectoires des objets qui se déplacent. L'expansion de l'Univers, qui est elle-même une forme de courbure de l'espace-temps, est commandée par la valeur de Ω (voir l'encadré page 55). Si Ω est plus grand que un, l'Univers a une courbure positive, comme la surface d'une orange, mais en trois dimensions spatiales : c'est la géométrie sphérique, ou «fermée». Si Ω est inférieur à un, la courbure de l'Univers est négative, comme une selle : c'est la géométrie hyperbolique, ou «ouverte». Si Ω est égal à un, l'Univers est plat, comme une crêpe : c'est la géométrie euclidienne habituelle.

L'inflation aplatit l'Univers observable. Quelle que soit la forme initiale de l'Univers, ce dernier se dilate si vite que nous n'en voyons plus qu'une petite partie, qui peut paraître plate pour les mêmes raisons que la surface terrestre qui nous entoure nous semble plate. L'inflation rapproche donc de un la valeur observée de Ω , tandis que les irrégularités initiales, dans les densités de matière et de rayonnement, sont effacées.

Ainsi, la théorie de l'inflation standard associe la géométrie euclidienne de l'espace et son homogénéité. Pour que l'Univers ait l'homogénéité actuelle, la théorie prévoit qu'il doit être très, très plat, avec Ω égal à un, à un cent millièmes près. Tout écart de Ω par rapport à un doit être indécidable par les astronomes. Depuis 20 ans, la planéité effectivement observée a été considérée comme une prévision bien vérifiée de la théorie.

L'Univers hyperbolique

Là est aujourd'hui le problème. De nombreuses observations astronomiques d'amas de galaxies et de supernovae lointaines montrent que la gravitation est trop faible pour vaincre l'expansion. La densité de matière doit être inférieure aux prévisions, et Ω semble être égal à environ 0,3 : l'Univers serait courbé et ouvert. Ce résultat peut s'interpréter de trois manières. Premièrement, la théorie de l'inflation pourrait être complètement fautive. Dans cette hypothèse, les cosmologistes devraient trouver une autre théorie qui résoudrait la question de l'homogénéité et qui expliquerait la valeur de Ω .

L'expansion accélérée que l'on déduit des observations des supernovae

lointaines suggère une deuxième hypothèse : l'existence d'une énergie supplémentaire qui agirait comme de la matière étrange, courbant l'espace comme le fait la matière ordinaire. Elle aplatiserait l'espace, et la théorie de l'inflation n'aurait rien à craindre (voir *L'antigravité*, par Lawrence Krauss, page 42). Pour l'instant, les calculs sont imprécis parce qu'on connaît mal les poussières de l'Univers et la nature des étoiles qui explosent, et ils ne permettent pas de clore (si l'on peut dire) le débat.

Une troisième approche consiste à dissocier la géométrie de l'Univers du processus d'inflation, en incluant dans la théorie la description d'étapes antérieures à l'inflation. Ces idées, explorées au début des années 1980, ont été reprises et développées récemment.

On peut trouver un potentiel associé à l'inflaton tel que l'Univers soit légèrement courbé au lieu d'être complètement plat. Supposons ainsi que la

fonction énergie potentielle possède deux minima : un minimum local et un minimum absolu (voir la figure 2, à droite). Quand l'inflaton roule le long de la pente, l'Univers se dilate en restant uniforme (comme dans la théorie exposée précédemment). Puis l'inflaton reste bloqué dans le minimum local. Les physiciens nomment cet état un « faux vide » : toute la matière et tout le rayonnement du cosmos y sont presque totalement sous la forme de l'énergie de l'inflaton. Les fluctuations inhérentes à la mécanique quantique font osciller l'inflaton et lui permettent de s'échapper du minimum local, par effet tunnel (comme on libère une bille coincée dans un flipper en secouant l'appareil).

La sortie du minimum local, ou désintégration du faux vide, ne s'est pas produite partout en même temps. Elle a d'abord eu lieu en un point quelconque, puis elle s'est propagée. Le

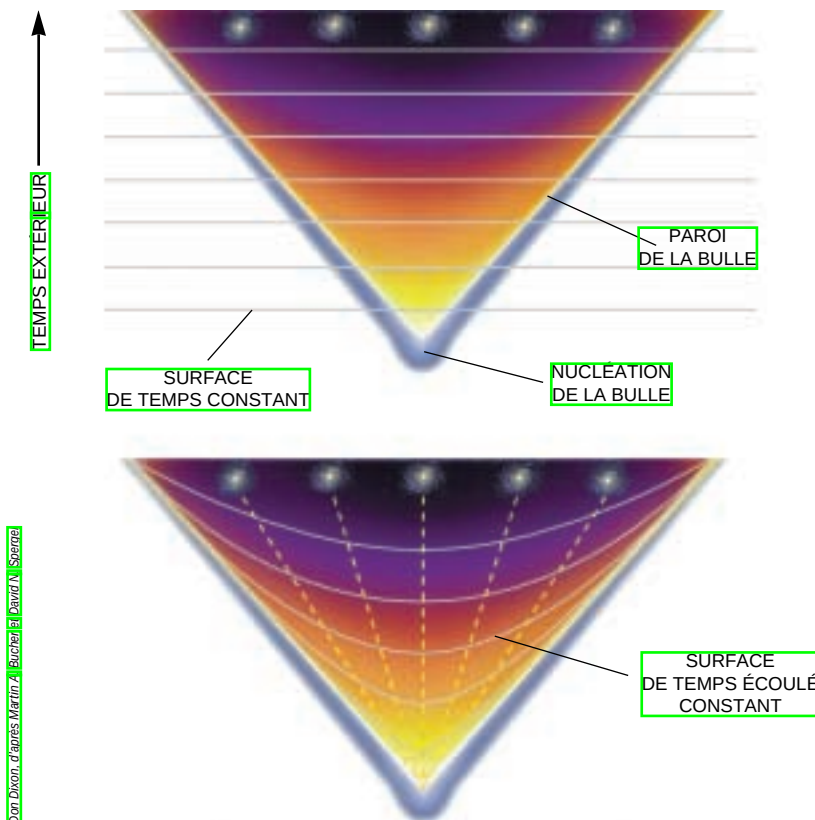
processus est comparable à l'ébullition d'une casserole d'eau : l'eau ne se transforme pas partout instantanément en vapeur. En raison du mouvement aléatoire des molécules, des bulles éparses se forment dans le liquide ; lorsque leur taille est inférieure à une taille critique, elles s'effondrent parce que la tension superficielle est supérieure à leur pression interne ; dans les bulles plus grosses, la pression à l'intérieur surmonte la tension superficielle, et ces bulles croissent.

Notre Univers est une bulle

Dans la désintégration du faux vide, les fluctuations quantiques ont joué le rôle du mouvement moléculaire aléatoire, provoquant la nucléation de bulles de vrai vide. Une force analogue à la tension superficielle a détruit la plupart des bulles, mais quelques-unes ont tant grossi que les effets quantiques sont devenus négligeables. Rien ne s'y opposant, le rayon de ces bulles a continué de croître à la vitesse de la lumière. Quand la paroi externe d'une bulle passe par un point de l'espace, l'inflaton en ce point est délogé du minimum local et il reprend sa descente vers le minimum absolu d'énergie potentielle : au sein de la bulle, l'espace se dilate comme dans la théorie de l'inflation. L'intérieur de cette bulle correspond à notre Univers. Le moment où l'inflaton a quitté le minimum local correspond au Big Bang.

Ce dernier s'est donc produit à des instants différents aux points situés à des distances différentes du centre de nucléation de la bulle. L'inflaton peut alors être utilisé comme un chronomètre : sa valeur en un point de l'espace indique le temps écoulé depuis le Big Bang en ce point. L'inflaton est maximal sur la paroi de la bulle et décroît régulièrement vers le centre. Mathématiquement, la valeur de l'inflaton reste constante sur des surfaces tridimensionnelles de forme hyperbolique (voir la figure 3).

La valeur de l'inflaton n'est pas qu'une grandeur mathématique. Elle a déterminé les propriétés fondamentales de l'Univers au sein de la bulle : sa densité moyenne et la température du rayonnement cosmologique diffus (aujourd'hui égale à 2,7 kelvins). Sur une surface hyperbolique, la densité, la température et le temps écoulé sont constants. Ces surfaces sont ce que les observateurs



3. UN UNIVERS OUVERT DANS UN ESPACE FERME? Ce serait possible si l'espace et le temps étaient perçus différemment en dehors (*en haut*) et à l'intérieur (*en bas*) d'une bulle d'Univers. Ici, le temps, mesuré par des observateurs extérieurs, augmente vers le haut de chaque ligne. Par définition, l'espace est n'importe quelle ligne ou surface qui relie des points à un certain temps (*lignes horizontales du schéma supérieur*). La bulle a une courbure sphérique et est donc fermée. Les observateurs intérieurs, toutefois, ne sont conscients que du temps écoulé, l'intervalle depuis que le bord de la bulle a atteint un point donné. Quand le temps écoulé augmente, la température diminue, ce qui entraîne un changement physique (*chaud en jaune ; froid en noir*). Les surfaces de temps écoulé constant sont des hyperboles, qui se courbent vers le haut et ne touchent jamais la paroi de la bulle. Les points internes s'éloignent mutuellement, à cause de l'expansion cosmique (*lignes pointillées*). L'Univers a une courbure hyperbolique et est donc ouvert.

La géométrie de l'Univers

Si l'Univers avait un «dehors» d'où on pouvait l'observer, la cosmologie serait bien plus facile. Confinés dans l'intérieur, les astronomes doivent déduire la forme de l'Univers de ses propriétés géométriques. L'expérience quotidienne indique que l'espace est euclidien, ou «plat», à petite échelle : deux lignes parallèles ne se coupent jamais, la somme des angles d'un triangle est de 180 degrés, la circonférence d'un cercle de rayon r est $2\pi r$. Toutefois, on ne peut pas en déduire que l'Univers est euclidien à grande échelle : ce serait comme si l'on affirmait que la Terre est plate parce que la surface qui nous entoure semble plate.

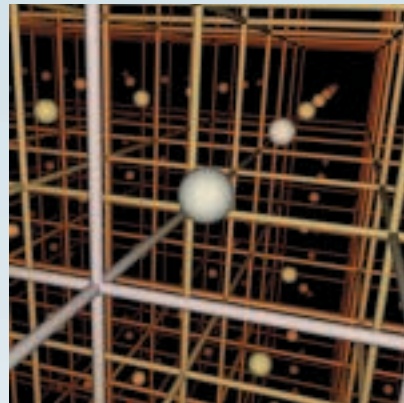
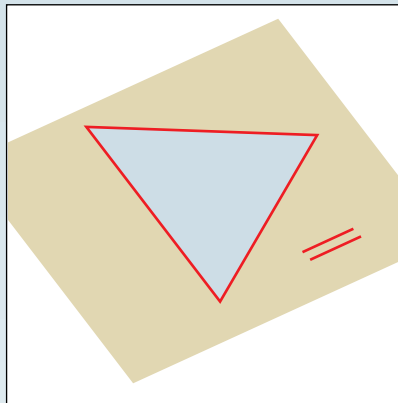
Si l'on admet que l'Univers est homogène (tous les points de l'espace sont équivalents) et isotrope (toutes les directions sont équivalentes), deux autres géométries tridimensionnelles sont possibles. Ce sont les géométries sphérique, ou «fermée», et hyperbolique, ou «ouverte». Elles sont caractérisées toutes les deux par un rayon de courbure, analogue au rayon terrestre. Si le rayon de courbure est positif, la géométrie est sphérique ; s'il est négatif, la géométrie est hyperbolique. Dans les deux cas, l'Univers semble euclidien aux distances inférieures au rayon de courbure.

Dans un univers sphérique, comme à la surface de la Terre, des lignes parallèles se coupent, la somme des angles d'un triangle peut atteindre 540 degrés, et la circonférence d'un cercle est inférieure à $2\pi r$. Comme l'espace se referme, l'univers sphérique est fini. Dans un univers hyperbolique, les lignes parallèles divergent, la somme des angles d'un triangle est inférieure à 180 degrés, et la circonférence d'un cercle est supérieure à $2\pi r$. Un tel univers est de taille infinie, comme l'espace euclidien (il existe des méthodes pour rendre finis les univers hyperbolique et plat, mais elles ne modifient pas les conclusions de la théorie de l'inflation).

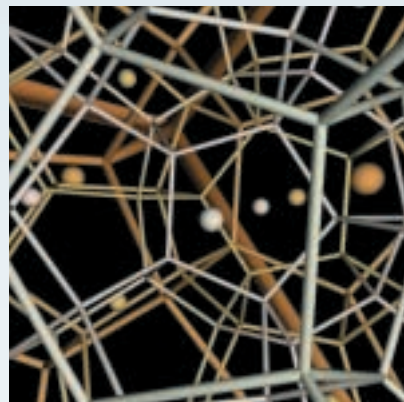
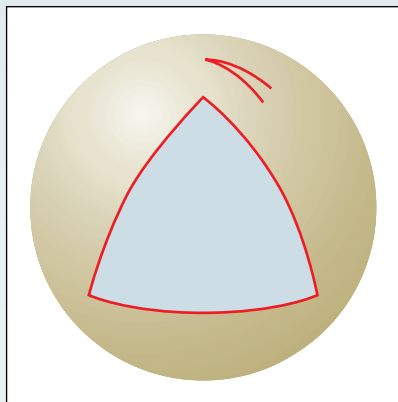
Dans ces trois géométries, les lois de la perspective diffèrent (à droite), et les structures du rayonnement cosmologique doivent apparaître différemment. Les fluctuations les plus grandes ont la même dimension absolue quel que soit le processus spécifique d'inflation. Si l'Univers est euclidien, les fluctuations les plus grandes ont une largeur d'environ un degré. Cependant, si l'Univers est hyperbolique, leur taille apparente n'est que d'un demi-degré, à cause de la déformation géométrique des rayons lumineux.

Des observations préliminaires indiquent que les rides mesurent bien un degré. Si ces résultats se confirment, on devra conclure que la théorie de l'inflation ouverte est fautive, mais attendons les prochaines observations satellitaires.

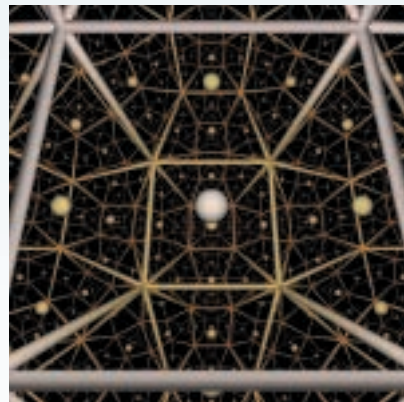
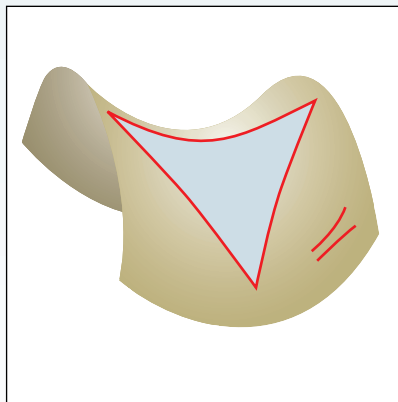
LES TROIS GEOMETRIES à courbure constante sont représentées ici sous deux vues différentes : une vue de l'extérieur d'un espace à seulement deux dimensions (*colonne de gauche*) et une vue de l'intérieur qui montre les trois dimensions de l'espace comprenant un réseau régulier (*colonne de droite*). La vue extérieure montre les règles géométriques de base. La vue intérieure révèle les dimensions apparentes des objets (qui, dans ces diagrammes, sont en fait de la même taille) à différentes distances ; sur ces images, les objets et les repères sont d'autant plus éloignés qu'ils sont plus rouges.



Dans un espace plat, les règles de la géométrie euclidienne s'appliquent. Le diamètre apparent de sphères identiques est inversement proportionnel à leur distance.



Dans un espace sphérique, les propriétés géométriques sont celles d'une sphère. Quand la distance augmente, les sphères semblent d'abord plus petites, leur diamètre apparent passe par un minimum, puis il réaugmente (de même, les méridiens issus d'un pôle ont une séparation maximale à l'équateur, puis se rejoignent au pôle opposé). Le maillage de l'espace représenté ici se compose de dodécaèdres (des solides réguliers à 12 faces).



Un espace hyperbolique a la géométrie d'une selle. Le diamètre apparent des sphères se réduit beaucoup plus vite avec la distance que dans l'espace euclidien. Comme les angles sont plus aigus, cinq cubes peuvent être adjacents par une arête, au lieu de quatre seulement dans l'espace euclidien.

Steve Levy, National Center for Supercomputing Applications, University of Illinois at Urbana-Champaign

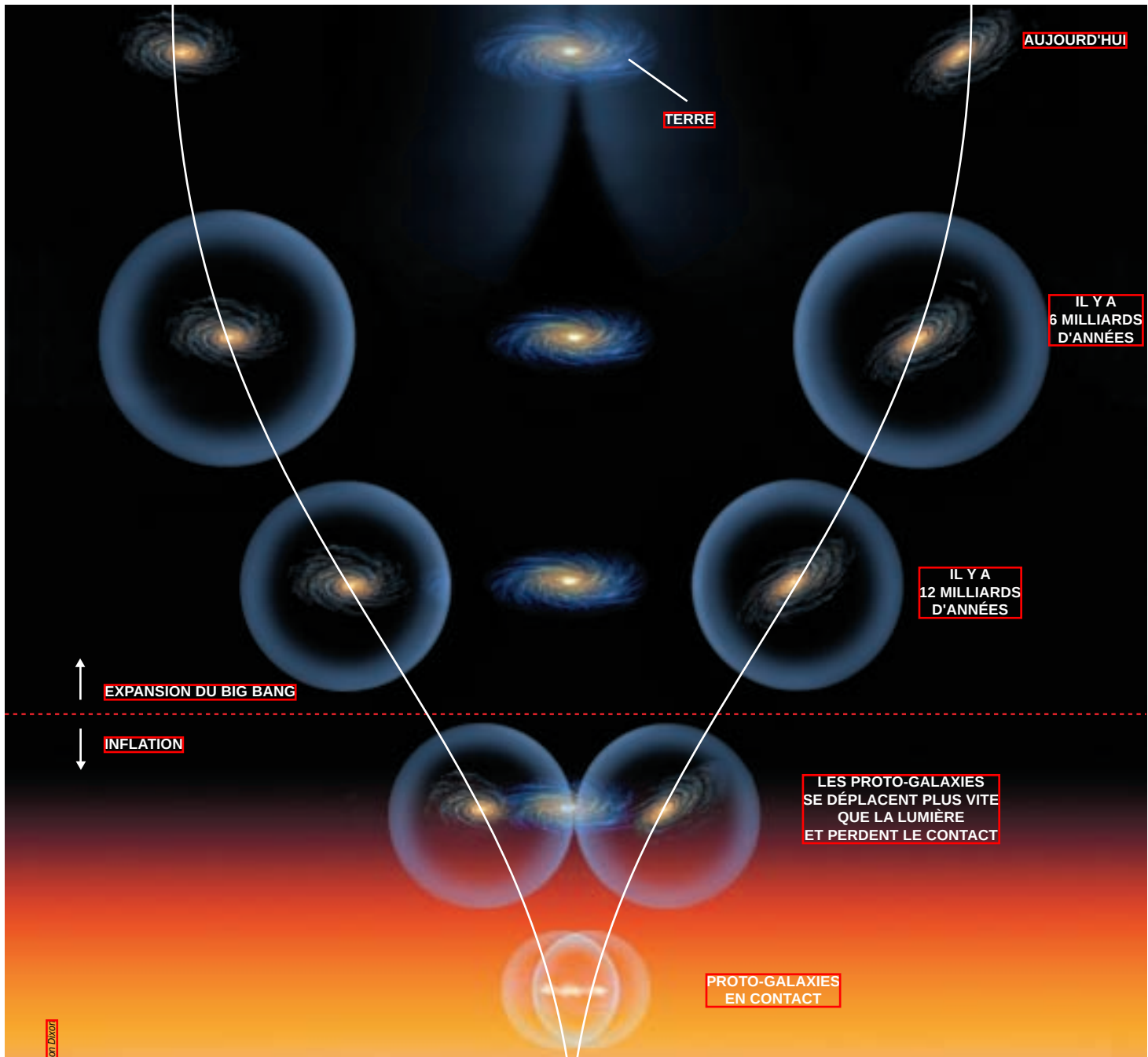
à l'intérieur de la bulle perçoivent comme un «temps» constant. Il diffère du temps mesuré en dehors de la bulle.

Comment un concept aussi fondamental que le temps peut-il être différent à l'intérieur et à l'extérieur de la bulle? Avant l'énoncé de la théorie de la relativité par Einstein, une telle différence aurait semblé impossible, mais,

selon cette théorie, la distinction entre l'espace et le temps disparaît. Ce qu'un observateur nomme «espace» et «temps» est largement une convention. Le temps représente la direction dans laquelle les choses changent et, dans la bulle, le changement est gouverné par l'inflation.

Selon la théorie de la relativité, l'Univers a quatre dimensions : trois

d'espace et une de temps. Dès que la direction du temps est déterminée, les trois directions restantes doivent être spatiales ; ce sont les directions dans lesquelles le temps reste constant. Nos calculs montrent qu'une bulle d'univers semble hyperbolique de l'intérieur. Pour nous qui sommes dans une telle bulle, un voyage dans l'espace est



4. L'UNIFORMITÉ DE L'UNIVERS est un paradoxe important en cosmologie. Dans l'expansion normale du Big Bang (*en haut*), une telle régularité est impossible. Il y a plusieurs milliards d'années, les galaxies de régions opposées du ciel ont commencé à briller. Malgré l'expansion de l'Univers, leur lumière nous a finalement atteints dans la Voie lactée. Les hommes, observant ces galaxies à l'aide de télescopes, ont remarqué qu'elles paraissaient très semblables. Pourtant la lumière d'une galaxie ne peut avoir atteint une galaxie distante de plus d'une quinzaine d'années-lumière. Com-

ment les galaxies de zones opposées de l'Univers ont-elles harmonisé leurs apparences sans interagir? L'inflation (*en bas*) fournit une réponse. Dans le premier quart de seconde de l'histoire cosmique, les précurseurs des galaxies se touchaient. L'Univers s'est ensuite dilaté à vitesse croissante, les séparant à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Depuis, les galaxies n'interagissent plus. Quand l'inflation a pris fin, la lumière a pu à nouveau aller de l'une vers l'autre ; d'ici plusieurs milliards d'années, les galaxies entreront à nouveau en contact.

une trajectoire sur une hyperbole. Regarder dans le passé, c'est regarder vers la paroi de la bulle. En principe, nous pourrions regarder en dehors de la bulle et voir ce qui s'est passé avant le Big Bang, mais, en pratique, l'Univers primordial, dense et opaque, bloque la lumière en provenance de l'extérieur.

L'ouvert dans le fermé

Cette fusion de l'espace et du temps permet de loger un univers hyperbolique et ouvert à l'intérieur d'une bulle sphérique fermée, mais en expansion. Pour un observateur situé dans la bulle, l'espace est un mélange de l'espace et du temps tels qu'ils sont perçus par un observateur situé en dehors de la bulle.

Avec le concept étrange des bulles d'Univers, les cosmologistes peuvent admettre que Ω soit différent de un. Si la théorie de la formation des bulles explique les hyperboles, elle ne précise pas leur taille. Celle-ci est déterminée par le potentiel de l'inflaton et elle varie dans le temps en accord avec la valeur de Ω . Initialement, Ω est nul dans la bulle. Sa valeur augmente pendant l'inflation et tend vers un : les hyperboles commencent avec une forte courbure et elles s'aplatissent progressivement. Le potentiel de l'inflaton impose le rythme et la durée de l'aplatissement. Quand l'inflation dans la bulle prend fin, Ω est en équilibre extrêmement près de un, mais légèrement inférieur. On peut choisir le potentiel de l'inflaton tel que la durée de l'inflation dans la bulle ait juste la bonne valeur (à quelques pour-cent près) et que la valeur actuelle de Ω soit en accord avec la valeur observée.

À première vue, le processus d'inflation en plusieurs étapes semble alambiqué, mais la conclusion principale est simple : l'uniformité et la forme de l'Univers ne sont pas nécessairement reliées. Elles résultent, au contraire, d'étapes différentes de l'inflation : l'uniformité de l'inflaton avant la nucléation de la bulle ; la forme de l'inflaton au sein de la bulle. Comme les deux propriétés ne sont pas liées, le besoin d'uniformité ne détermine pas la durée de l'inflation, qui dure juste assez longtemps pour donner aux hyperboles le degré d'aplatissement désiré.

En fait, cette formulation est une extension directe de la théorie du Big Bang. La vision habituelle de l'inflation

décrit ce qui se passe juste avant l'expansion du Big Bang. La nouvelle théorie, ou théorie de l'inflation ouverte, décrit l'étape qui a précédé. Une théorie qui décrirait des temps encore plus reculés serait nécessaire pour expliquer la création originelle de l'Univers (voir l'encadré de la page 52).

La vie dans une bulle d'Univers a un certain nombre de conséquences intéressantes. Ainsi, un observateur extraterrestre pourrait passer de l'extérieur à l'intérieur de la bulle, mais, une fois à l'intérieur, cet observateur (comme nous) ne pourrait plus en sortir, car cela nécessiterait de voyager à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

Une autre conséquence est que notre univers fait partie d'une infinité d'autres bulles immergées dans une vaste écume de faux vide en expansion éternelle. Que se passerait-il si deux bulles entraient en collision ? Leur rencontre produirait une explosion cosmique qui détruirait tout dans les bulles au voisinage du point d'impact. Heureusement, comme la nucléation des bulles est un processus extrêmement rare, un tel cataclysme est peu probable. Même s'il s'en produisait un, une partie notable des bulles resterait intacte : aux yeux des observateurs situés dans la bulle, mais loin de l'impact, l'événement apparaîtrait comme une région très chaude dans le ciel.

Comment tester cette théorie ? Certes, elle explique pourquoi l'Univers est homogène, mais les cosmologistes cherchent des prévisions quantitatives que des travaux d'astrophysique analyseraient. Les conséquences spécifiques de l'inflation ouverte ont été calculées en 1994.

Les théories de l'inflation et de l'inflation ouverte font toutes deux des prévisions fondées sur des effets quantiques, à l'origine de faibles différences

dans la vitesse d'inflation en différents points de l'espace. Quand l'inflation a pris fin, l'excès d'énergie qui subsistait dans le champ d'inflation a pris la forme de rayonnements ordinaires et a provoqué l'explosion du Big Bang. Si la durée de l'inflation a varié selon les points de l'espace, la quantité d'énergie résiduelle a également varié, tout comme la densité de rayonnement.

Le rayonnement cosmologique diffus fournit un instantané de ces fluctuations. Selon l'inflation ouverte, il a été perturbé non seulement par les fluctuations qui existaient à l'intérieur de l'Univers, mais aussi par celles qui naissaient hors de la bulle et se propageaient à l'intérieur. D'autres fluctuations auraient été créées par des imperfections de la nucléation de la bulle. Ces caractéristiques devraient être les plus notables aux échelles les plus grandes : elles nous permettraient de regarder en dehors de notre bulle d'Univers. En outre, l'inflation ouverte devrait avoir d'autres conséquences, purement géométriques (voir l'encadré de la page 55).

Avec la précision actuelle des observations astronomiques, on ne peut savoir si les prévisions de l'inflation ouverte sont mieux vérifiées que celles de l'inflation classique. On ne pourra trancher qu'avec les mesures du *Détecteur d'anisotropies micrométriques*, un satellite que la NASA lancera à la fin de 2000. Un dispositif européen plus perfectionné, nommé *Planck*, devrait être lancé en 2007. Ces satellites effectueront des observations semblables à celles du satellite *COBE*, qui a mesuré le rayonnement cosmologique diffus il y a une dizaine d'années, mais avec une bien meilleure résolution. Si aucune théorie existante ne convenait, les cosmologistes devraient alors trouver de nouvelles idées pour décrire les événements des tout premiers moments de l'Univers.

Martin BUCHER est chercheur à l'Université de Cambridge. David SPERGER est professeur d'astrophysique à l'Université de Princeton.

Alan GUTH et Paul STEINHARDT, *L'Univers inflatoire*, in *Pour la Science*, juillet 1984.

Eugene F. MALLOVE, *The Self-Reproducing Universe*, in *Sky & Telescope*, vol. 76, n° 3, pp. 253-256, septembre 1988.

P. JAMES, E. PEEBLES, David SCHRAMM, Edwin TURNER et Richard KRON, *L'évolution de l'Univers*, in *Pour la Science*, décembre 1994.

Andreï LINDE, *L'Univers inflatoire auto-reproducteur*, in *Pour la Science*, janvier 1995.

Martin BUCHER, Alfred S. GOLDBERGER et Neil TROK, *Open Universe from Inflation*, in *Physical Review D*, vol. 52, n° 6, pp. 3314-3337, 15 septembre 1995.

J. MATHER et J. BOSLOUGH, *The Very First Light : The True Inside Story of the Scientific Journey Back to the dawn of the Universe*, BasicBooks, 1996.

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

La lutte contre la grippe

GRAEME LAVER • NORBERT BISCHOFBERGER • ROBERT WEBSTER

Bientôt commercialisés, les nouveaux médicaments antigrippaux empêchent le virus de la grippe de se multiplier dans les tissus humains. Ils devraient également prévenir l'infection.

Régulièrement, une nouvelle souche du virus de la grippe se propage dans les populations humaines. La souche étant nouvelle, personne ou presque n'est immunisé contre elle. Même les personnes vaccinées ne sont pas protégées ; les vaccins protègent seulement contre les souches connues que les biologistes ont utilisées pour mettre au point les préparations vaccinales. Ne rencontrant aucune résistance, la nouvelle souche provoque la maladie, voire la mort, dans le monde entier.

La pire des épidémies – ou pandémie – de grippe que le monde ait connue fut celle de 1918 : elle a tué plus de 20 millions de personnes, parfois en quelques heures seulement. Ce fléau, dû au virus de la grippe espagnole, fut suivi d'épidémies de grippe asiatique en 1957, de grippe de Hongkong en 1968, et de grippe russe en 1977 (ces dénominations indiquent que l'on croyait être l'origine géographique des pandémies, mais on sait aujourd'hui que ces quatre épidémies, et peut-être bien d'autres, venaient de Chine).

Les médecins savent qu'une nouvelle pandémie peut surgir n'importe quand, et être aussi grave que celle de 1918. En 1997, quand un nouveau type de virus de la grippe atteignit 18 personnes à Hongkong, tuant six d'entre elles, les spécialistes craignirent qu'une nouvelle pandémie n'ait commencé. Les autorités locales circonscrivirent rapidement l'épidémie, en identifiant le foyer initial – des poulets, des canards et des oies contaminés –, puis en abattant toutes les volailles de Hongkong.

Aurons-nous autant de chances la prochaine fois ? Si un virus aussi dévastateur que celui de Hongkong avait frappé des régions surpeuplées du monde, 30 pour cent de la population mondiale aurait péri (sous l'action directe du virus ou à la suite d'infections bactériennes secondaires), avant qu'un vaccin ne protège ceux qui auraient échappé à l'infection : on met environ six mois pour produire un vaccin contre un variant particulier de la grippe, pour en tester l'innocuité et pour le distribuer, ce qui est beaucoup trop long pour réagir efficacement contre une pandémie galopante.

Cependant, si la pandémie redoutée ne survient pas avant un an ou davantage, on devrait disposer de traitements pour réduire les symptômes et le nombre des décès : deux médicaments contre la grippe, en cours d'essais cliniques, pourraient recevoir leur autorisation de mise sur le marché avant la fin de l'année. Ces deux substances – le zanamivir et le GS 4104 – semblent prévenir la grippe et réduire la durée et la gravité des symptômes chez les personnes atteintes.

Contrairement aux vaccins (qui préparent le système immunitaire à réagir en cas d'intrusion des virus) et aux remèdes usuels (qui calment les symptômes, mais n'agissent pas sur l'infection elle-même), ces médicaments ont été conçus pour s'attaquer directement au virus de la grippe : ils inhibent une enzyme virale essentielle, la neuraminidase, et réduisent ainsi notablement la prolifération du virus dans l'organisme. D'autres inhibiteurs

de la neuraminidase, qui n'ont pas encore été testés chez l'homme, sont à l'étude.

Deux médicaments contre la grippe, l'amantadine et la rimantadine, sont déjà commercialisés. Ils ont un autre mode d'action, mais ont surtout de graves inconvénients : ils provoquent parfois des confusions mentales et d'autres effets secondaires neurologiques, et ils sont inefficaces contre l'une des deux principales classes de virus humains de la grippe (le type B). De surcroît, les virus de la grippe semblent devenir assez facilement résistants à ces médicaments, de sorte que les personnes traitées au début d'une épidémie risquent de transmettre à d'autres personnes des variants viraux résistants, ce qui est particulièrement grave dans les collectivités, tels les hôpitaux.

Les médicaments les plus récents sont le fruit de la chance et de la logique. Leur mise au point résulte de la découverte, en 1983, de la structure tridimensionnelle de la neuraminidase. Pourtant, c'est une série de découvertes antérieures qui a permis aux biologistes de comprendre que tous les variants de la grippe ont leur talon d'Achille – une faiblesse que les médicaments exploitent.

1. LES NOUVEAUX MÉDICAMENTS (triangles rouges) contre la grippe bloquent le site actif d'une enzyme, la neuraminidase, « plantée » à la surface des virus de la grippe. Cette enzyme permet aux particules virales nouvellement formées de se déplacer d'une cellule de l'organisme à une autre. Dès que l'enzyme est inactivée, le virus ne progresse plus.

Anatomie d'un fléau

Parmi ces travaux antérieurs, certains avaient révélé quelques propriétés des virus de la grippe et de leur stratégie de survie. Les virologues savent depuis longtemps que les virus sont des gènes emballés dans des protéines, qui les protègent ou qui favorisent leur prolifération dans les organismes qu'ils infectent. Dans le cas du virus de la grippe et de quelques autres virus, ces divers constituants sont entourés d'une membrane composée de molécules de lipides. Les virus infectent les organismes, parce qu'ils envahissent certaines de leurs cellules, où ils se multiplient, puis ils quittent ces cellules et en infectent d'autres. Certains symptômes surviennent parce que la prolifération virale détruit les cellules infectées, d'autres sont dus aux défenses immunitaires qui provoquent une inflammation locale, des douleurs généralisées et de la fièvre.

Les virus humains de la grippe ont une affinité particulière pour les cellules épithéliales

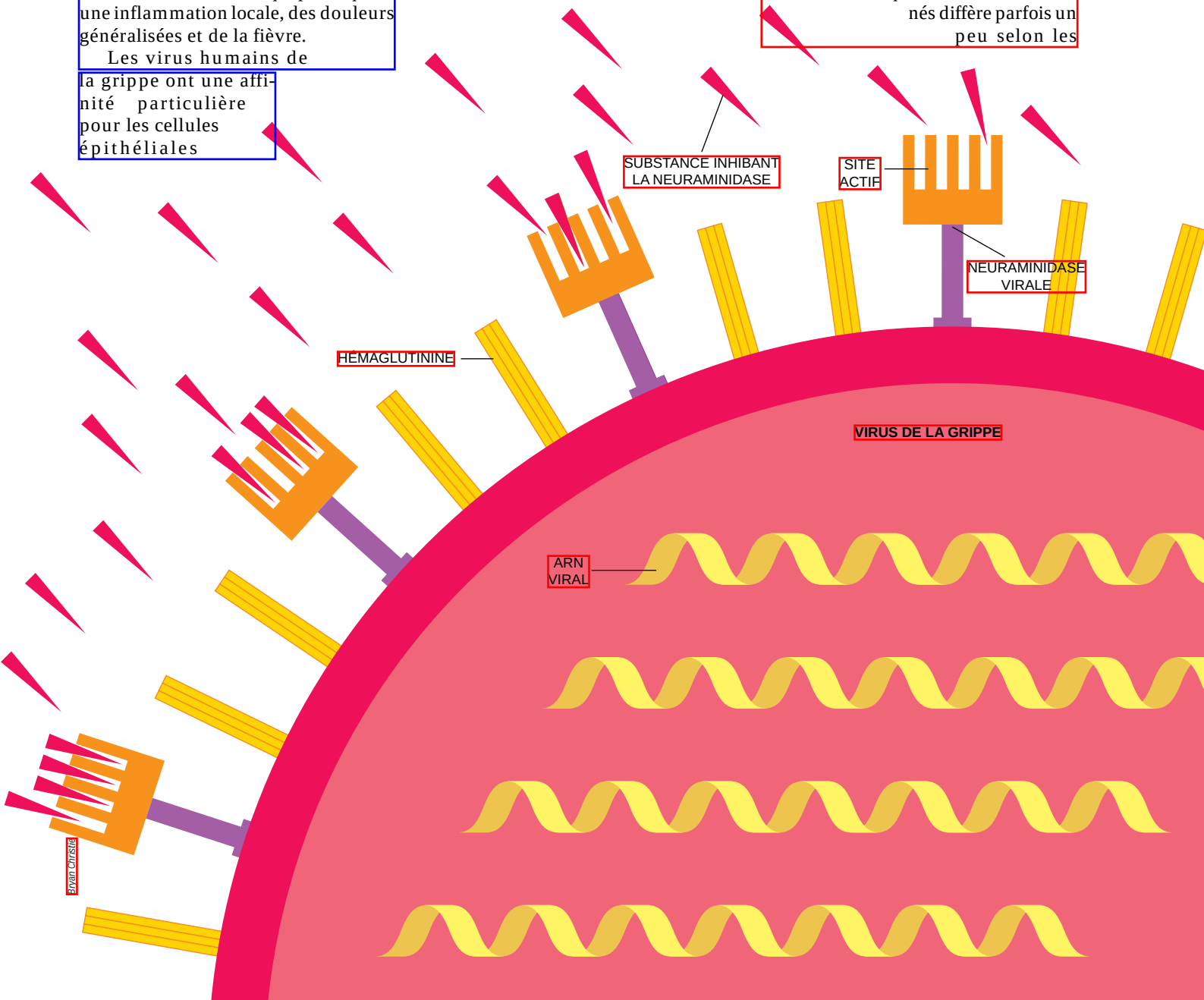
qui recouvrent les voies respiratoires. Un jour ou deux après la contamination, les symptômes classiques apparaissent : le nez coule ou s'obstrue, la toux est irrésistible, le malade a de la fièvre, des douleurs, il frissonne, il est fatigué et il n'a plus d'appétit. D'après les descriptions de tels symptômes, on sait que les populations humaines souffrent de la grippe depuis plus de 2 500 ans.

Le premier virus humain de la grippe a été isolé en 1933. Ces virus se répartissent en deux principales catégories – le type A et le type B –, qui diffèrent par certaines de leurs protéines internes. Une troisième variété (C) ne semble pas être responsable de maladies graves.

Les virologues classent les diverses formes du type A selon les particularités des deux protéines fichées dans la surface virale comme des spicules :

l'hémagglutinine et la neuraminidase (l'enzyme qui est la cible des nouveaux médicaments). Ces protéines, comme toutes les autres, sont des chaînes repliées d'acides aminés. Les diverses molécules d'hémagglutinine ont presque toutes la même structure tridimensionnelle typique, et celles de neuraminidase aussi. Toutefois, à l'intérieur de chaque groupe, les séquences des acides aminés varient notablement selon les protéines. Ainsi, dans les gripes de type A, on a identifié 15 sous-types d'hémagglutinine et 9 sous-types de neuraminidase. Selon les molécules d'hémagglutinine et de neuraminidase qui composent ces types viraux, on nomme ces virus H1N1, H1N2, H2N2, etc.

Les virus de type B forment un groupe plus homogène. Ils portent une seule forme d'hémagglutinine et une seule forme de neuraminidase, bien que la séquence d'acides aminés diffère parfois un peu selon les





souches de type B. De même, les souches de chaque sous-type de grippe A présentent une légère variabilité.

Les virus de type A et de type B se distinguent aussi par leurs modes d'action. Les virus de type B n'infectent que l'espèce humaine, et ils déclenchent des épidémies locales plutôt que des pandémies. Au contraire, les virus de type A touchent également les porcs, les chevaux, les phoques, les baleines et les oiseaux, bien que toutes les souches n'infectent pas toutes ces espèces (quatre sous-types seulement infectent notre espèce) : ils ont été responsables de toutes les pandémies du XX^e siècle.

Malgré leurs différences, les deux types de virus de la grippe ont le même cycle de vie. Pour qu'une particule virale pénètre dans une cellule humaine, il faut que l'hémagglutinine virale se lie à une molécule d'un sucre, l'acide sialique, située à la surface de la cellule à infecter. Cette liaison déclenche l'absorption du virus, d'abord emprisonné dans une sorte de bulle, une invagination de la membrane cellulaire. Puis les gènes viraux (des brins d'ARN) et les protéines viraux sont libérés dans la cellule et gagnent le noyau.

Les brins d'ARN viral sont répliqués et de l'ARN messager est produit ; puis cette molécule est transcrite en protéines par la machinerie cellulaire.

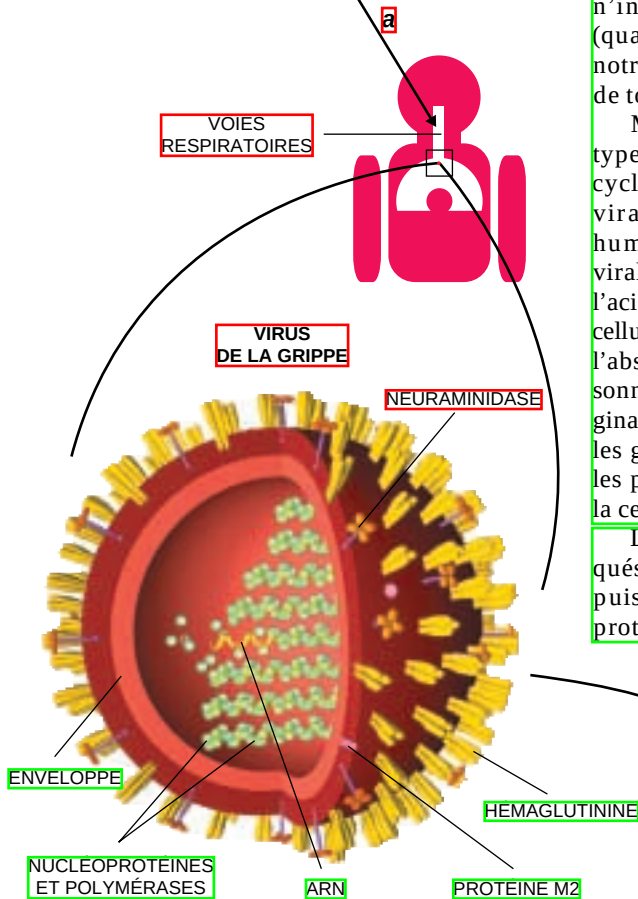
Finalement, les protéines et les gènes viraux produits par la cellule s'assemblent en nouvelles particules virales qui s'échappent de la cellule, en bourgeonnant à sa surface.

Comme ces particules émergentes sont recouvertes de morceaux de la membrane cellulaire, elles portent des molécules d'acide sialique, ce même composé auquel s'accrochent les virus de la grippe quand ils infectent les cellules. Si l'acide sialique restait sur le virus et à la surface des cellules qui libèrent les nouveaux virus, l'hémagglutinine des particules nouvellement formées s'y fixerait, collant les particules virales sur la cellule, comme des insectes sur un papier tue-mouches : les nouvelles particules virales ne pourraient se disperser pour contaminer d'autres cellules.

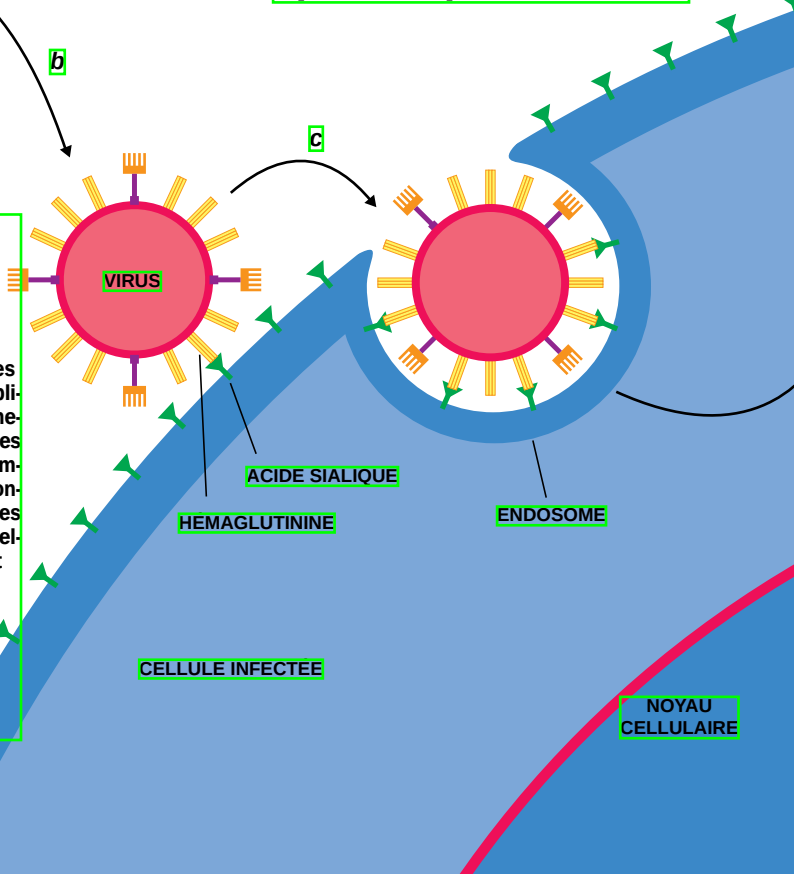
Toutefois le virus a une botte secrète. Les molécules de neuraminidase portées par les nouvelles particules virales arrachent l'acide sialique : elles « dissolvent » la colle que constitue l'acide sialique, ce qui permet aux particules virales de s'échapper. Cette enzyme aide aussi les particules virales à se frayer un chemin dans le mucus où baignent les cellules des voies respiratoires.

Les origines des pandémies

Dès les années 1960, les biologistes ont su qu'un médicament qui bloquerait l'une quelconque des étapes de la réplication empêcherait le virus de



2. LE CYCLE DU VIRUS DE LA GRIPPE commence souvent par la transmission de postillons émis par une personne contaminée qui éternue (a). Les particules virales (le détail ci-dessus) pénètrent dans les cellules des voies respiratoires, parce qu'une molécule du virus, l'hémagglutinine, se lie à de l'acide sialique porté par les cellules (b). Ensuite, les cellules absorbent le virus (c), qui déverse son matériel génétique, constitué d'ARN, et ses protéines vers le noyau (d et e). Certaines de ces protéines servent à la réplication de l'ARN (f) et à produire de l'ARN messager, que la machinerie cellulaire qui produit les protéines utilise pour fabriquer des protéines viraux (g et h). Ensuite les gènes viraux et les protéines s'assemblent pour former de nouvelles particules virales (i) qui bourgeonnent et s'échappent de la cellule. Les particules libérées sont revêtues d'acide sialique. Si cette substance restait sur le virus et sur la cellule, les molécules d'hémagglutinine d'une particule se fixeraient rapidement sur l'acide sialique d'autres particules et de la cellule : les nouvelles particules virales s'aggloméreraient et adhèreraient à la cellule, de sorte que l'infection ne se propagerait pas à d'autres cellules. La neuraminidase présente sur le virus arrache l'acide sialique de la surface des nouvelles particules virales (j), les laissant libres d'envahir d'autres cellules (k).



déclencher une grippe, ou abrègerait une infection déjà présente. Ils prévoyaient que la plupart des molécules efficaces perturberaient aussi les cellules saines, puisque les virus de la grippe se développent à l'intérieur des cellules et se servent de la machinerie cellulaire de fabrication des protéines.

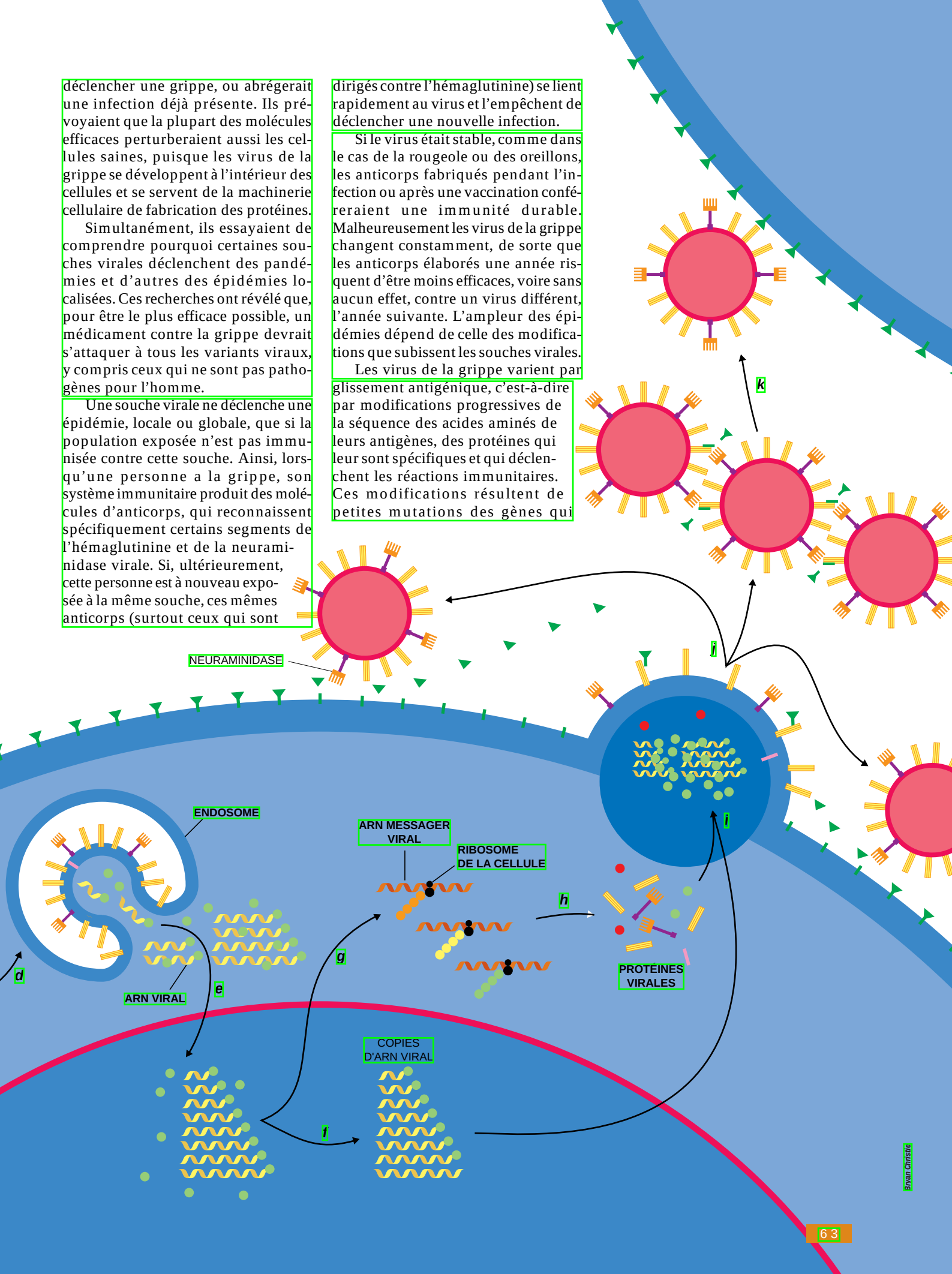
Simultanément, ils essayaient de comprendre pourquoi certaines souches virales déclenchent des pandémies et d'autres des épidémies localisées. Ces recherches ont révélé que, pour être le plus efficace possible, un médicament contre la grippe devrait s'attaquer à tous les variants viraux, y compris ceux qui ne sont pas pathogènes pour l'homme.

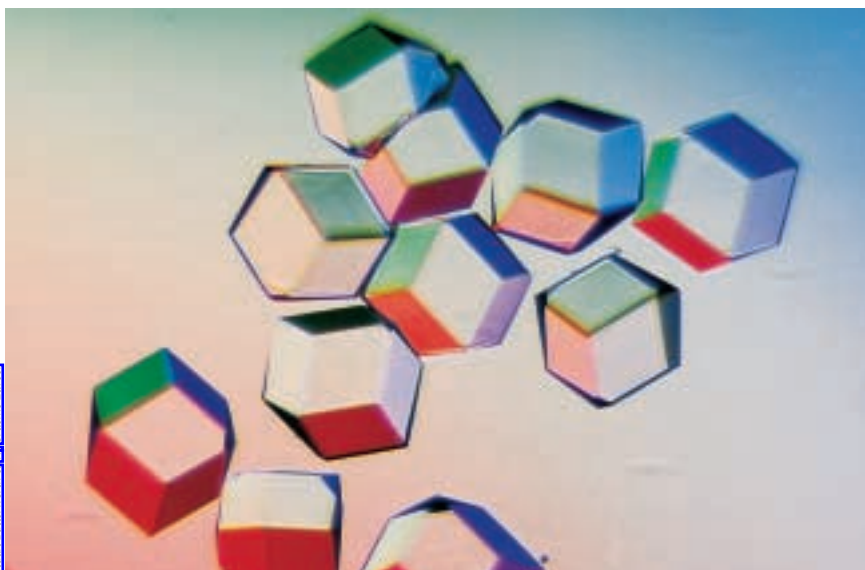
Une souche virale ne déclenche une épidémie, locale ou globale, que si la population exposée n'est pas immunisée contre cette souche. Ainsi, lorsqu'une personne a la grippe, son système immunitaire produit des molécules d'anticorps, qui reconnaissent spécifiquement certains segments de l'hémagglutinine et de la neuraminidase virale. Si, ultérieurement, cette personne est à nouveau exposée à la même souche, ces mêmes anticorps (surtout ceux qui sont

dirigés contre l'hémagglutinine) se lient rapidement au virus et l'empêchent de déclencher une nouvelle infection.

Si le virus était stable, comme dans le cas de la rougeole ou des oreillons, les anticorps fabriqués pendant l'infection ou après une vaccination confèreraient une immunité durable. Malheureusement les virus de la grippe changent constamment, de sorte que les anticorps élaborés une année risquent d'être moins efficaces, voire sans aucun effet, contre un virus différent, l'année suivante. L'ampleur des épidémies dépend de celle des modifications que subissent les souches virales.

Les virus de la grippe varient par glissement antigénique, c'est-à-dire par modifications progressives de la séquence des acides aminés de leurs antigènes, des protéines qui leur sont spécifiques et qui déclenchent les réactions immunitaires. Ces modifications résultent de petites mutations des gènes qui





3. CES CRISTAUX DE NEURAMINIDASE ont été obtenus à partir d'un virus de la grippe qui avait infecté des oiseaux sauvages de la Grande Barrière de corail, en Australie. Grâce à ces cristaux de neuraminidase, les biologistes ont déterminé la structure tridimensionnelle de l'enzyme et fabriqué des médicaments qui en bloquent le site actif. Les différentes teintes correspondent à des réflexions de lumières colorées.

codent ces protéines. Certaines mutations ne modifient guère la stabilité des protéines ni leur activité. D'autres modifient tant les protéines produites qu'elles diminuent la viabilité des virus. D'autres encore rendent les virus plus redoutables, par exemple en reconfigurant un site qui était auparavant reconnu et inactivé par un anticorps.

Lorsque les gènes de l'hémagglutinine ou de la neuraminidase sont notablement modifiés, les protéines codées pour ces gènes échappent à la plupart des anticorps d'une population : une nouvelle épidémie se déclenche. Cette épidémie s'arrête lorsqu'elle atteint des groupes dont le système immunitaire a déjà rencontré la plupart de ces antigènes modifiés.

Les virus de type B semblent évoluer uniquement par glissement antigénique, se modifiant progressivement chez les personnes infectées. Au contraire, les virus de type A subissent des modifications plus marquées, des cassures antigéniques, qui, seules, peuvent déclencher des pandémies.

Lors d'une cassure antigénique, les souches portent des molécules d'hémagglutinine et une neuraminidase totalement nouvelles, que presque personne n'a rencontrées. Le virus échappe alors à la panoplie des anticorps portés par toutes les populations du globe et déclenche une pandémie. Aujourd'hui, les avions qui sillonnent le monde pourraient transporter un virus dangereux sur toute la Terre en quelques heures.

Une telle métamorphose ne résulte pas d'une simple mutation génétique. Le mécanisme de cassure antigénique le mieux étudié survient après le mélange de deux souches virales dans une cellule humaine : les gènes rassemblés dans les nouvelles particules virales (et les protéines correspondantes) proviennent en partie de la première des souches et en partie de la seconde. Ce réassortiment peut se produire parce que le génome du virus de la grippe est composé de huit brins d'ARN (chacun des brins codant une ou deux protéines). Ces brins se mélangent facilement et se réassemblent lorsque de nouvelles particules virales de type A se forment dans une cellule infectée par les deux souches virales. Ainsi, certains virus de la grippe infectent à la fois l'homme et le porc. Quand un porc est infecté par un virus humain et par une souche n'infectant généralement que les oiseaux, la souche hybride ressemble aux souches humaines, mais est, par exemple, pourvue aussi d'hémagglutinine d'oiseau.

On a récemment découvert que la cassure antigénique se produit aussi d'une autre façon, de sorte qu'un virus de grippe animal, qui n'avait pas encore réussi à infecter l'homme, devient pathogène. On ignore quelle cassure antigénique a provoqué la pandémie de grippe espagnole de 1918, due au sous-type H1N1 de type A, mais on a montré qu'un réassortiment a été à l'origine de la pandémie de grippe asiatique de

1957 (due à H2N2) et de celle de grippe de Hongkong de 1968 (due à H3N2). Des oiseaux aquatiques auraient apporté des gènes inhabituels, et le mélange des gènes aurait eu lieu dans des porcs infectés. Si les porcs sont effectivement impliqués dans l'apparition de nouvelles souches virales de la grippe, on comprendrait pourquoi les pandémies se déclarent souvent en Chine : des millions d'oiseaux, de porcs et de personnes vivent dans la promiscuité.

Le virus qui a tué six personnes à Hongkong en 1997 (H5N1) n'était pas issu d'un réassortiment. Il est passé directement des oiseaux à l'homme, ce que l'on n'avait jamais observé auparavant. En revanche, il ne se transmettait pas d'homme à homme. S'il avait eu le temps de devenir contagieux par mutation ou par réassortiment, il aurait certainement été responsable d'une grave pandémie.

L'alerte de 1997 a convaincu nombre de spécialistes de la santé publique que les services sanitaires doivent surveiller la grippe non seulement chez l'homme, mais aussi chez les animaux, y compris chez les oiseaux migrateurs : ceux-ci sont probablement des réservoirs de virus de type A, qui sont ensuite transmis aux oiseaux domestiques et à d'autres espèces. L'identification rapide de souches animales potentiellement dangereuses pour l'homme pourrait prévenir une catastrophe sanitaire à grande échelle.

L'incident de Hongkong a confirmé l'urgence des recherches sur ce que l'on nomme la barrière d'espèces, qui empêche de nombreuses souches virales de se transmettre d'une espèce animale à une autre. Si l'on en comprenait mieux la nature, les biologistes pourraient sans doute colmater les brèches qui permettent aujourd'hui à certaines souches animales de franchir cette barrière et d'infecter l'homme.

Une découverte fortuite

Les diverses études de la grippe ont montré, dès la fin des années 1970, qu'un médicament antigrippe ne serait efficace que s'il bloquait l'activité d'une des molécules indispensables à la multiplication du virus ; il devrait agir sur un site conservé de la molécule cible, c'est-à-dire sur un groupe d'acides aminés présents dans tous les types de souches du virus de la grippe. Un médicament qui aurait pour cible une région conservée, présente sur n'importe quel

virus, serait vraisemblablement actif contre tous les virus humains de la grippe, y compris ceux qui passent directement de l'animal à l'homme.

La mise au point des inhibiteurs de neuraminidase se fonde sur une découverte fortuite. Vers la fin des années 1970, l'un de nous (G. Laver) étudiait la molécule N2 du virus qui a provoqué la pandémie de grippe de Hongkong en 1968 (H3N2). Cette neuraminidase provenait-elle de la souche responsable de la pandémie de grippe asiatique de 1957 (H2N2)? Il voulait comparer les séquences d'acides aminés des deux molécules et, d'abord, isoler et concentrer les «têtes» des molécules de neuraminidase présentes à la surface des virus.

Après avoir isolé ces têtes à partir de virus purifiés et après les avoir concentrées par centrifugation, G. Laver constata avec surprise que le précipité obtenu n'était pas amorphe, comme les protéines le sont d'habitude, mais qu'il formait des cristaux. Or, les cristaux, qui sont des réseaux ordonnés de molécules, permettent l'analyse de la structure tridimensionnelle des grosses protéines!

En Australie, Peter Colman et ses collègues effectuèrent cette détermination en 1983 : les spicules des virus de la grippe sont constitués de quatre molécules identiques, ou monomères. Le tétramère résultant ressemble à un groupe de quatre ballons carrés disposés à l'extrémité d'une tige qui est fichée dans la membrane virale. Puis l'équipe de P. Colman découvrit bientôt que chacun des monomères de neuraminidase présente à sa surface un

profond sillon central. De surcroît, malgré les variations des molécules de neuraminidase, la même séquence d'acides aminés tapisse la paroi du sillon de tous les variants viraux connus, qu'il s'agisse des types A ou B.

Quand certaines régions d'une molécule sont ainsi invariantes, elles sont généralement indispensables à la fonction de la molécule. Dans le cas présent, le sillon semblait être le site actif de la neuraminidase, celui où l'acide sialique est clivé, et les acides aminés conservés du sillon paraissaient indispensables à la fonction catalytique. Cette hypothèse fut confirmée par la suite.

Comme les virus de la grippe ne se transmettent pas facilement d'une cellule à l'autre sans la neuraminidase, un médicament capable de bloquer le sillon devrait inhiber la neuraminidase de tous les virus de grippe.

L'obstruction du sillon

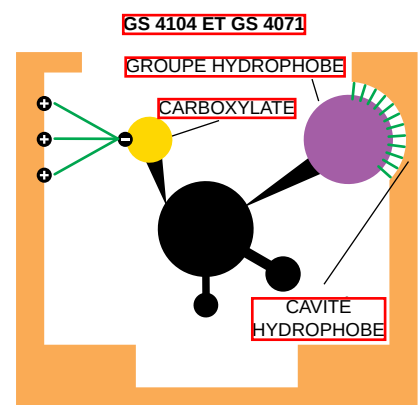
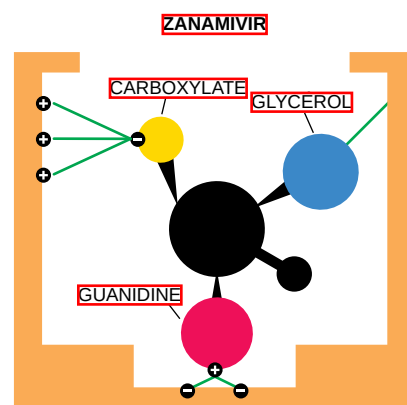
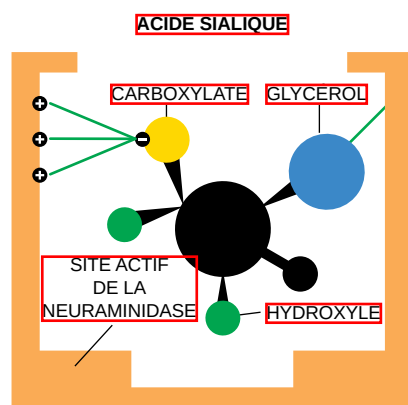
L'équipe de P. Colman identifia alors, dans le site actif, les acides aminés qui clivent l'acide sialique. Elle rechercha également les acides aminés qui, dans le sillon, ne se lient pas à l'acide sialique, mais où pourrait se fixer le futur médicament. Ainsi, ces biologistes identifièrent trois acides aminés chargés positivement, qui se liaient à un groupe chargé négativement (le groupe carboxylate $-COO^-$) de l'acide sialique.

Ils repérèrent aussi, au fond du sillon, une petite cavité où apparaissent deux acides aminés chargés négativement. Ces acides aminés (des groupes glutamate) n'établissaient

aucun contact avec l'acide sialique, mais ils étaient présents dans toutes les molécules de neuraminidase virale. Un groupe hydroxyle ($-OH$) de l'acide sialique était orienté vers le bas, vers cette cavité, mais ne l'atteignait jamais.

En remplaçant ce groupe hydroxyle par un groupe plus gros et chargé positivement, obtiendrait-on une liaison forte? Un tel groupe positif semblait devoir se localiser dans la petite cavité, au fond du site actif, et s'y immobiliser, en se liant aux molécules de glutamate chargées négativement de la cavité.

En 1993, Mark von Itzstein et ses collègues de l'Université de Melbourne trouvèrent qu'en substituant un groupe guanidine (à la fois volumineux et chargé positivement) au groupe hydroxyle de l'acide sialique, ils obtenaient un puissant inhibiteur de la neuraminidase grippale. Comme cet inhibiteur agissait peu sur les enzymes voisines fabriquées par les bactéries et par les mammifères, on pouvait espérer qu'il ne perturberait pas les cellules humaines. Des études sur des animaux et des essais préliminaires chez l'homme montrèrent alors que la substance – le zanamivir – prévenait l'apparition des symptômes de la grippe chez des personnes infectées après l'administration du zanamivir et qu'elle atténuait les symptômes chez les personnes qui commençaient à se traiter après avoir été infectées. Toutefois, pour être efficace, ce produit ne devait pas être administré par voie buccale ; il devait être inhalé par le



4. DE NOUVEAUX MEDICAMENTS bloquent le site actif de la neuraminidase en s'y liant plus que l'acide sialique. Quand un virus attaque une cellule, l'acide sialique (à gauche) est maintenu dans le site, un sillon, surtout grâce à ses groupes glycérol et carboxylate, qui forment des liaisons (traits verts) avec les acides aminés du site actif. Le zanamivir (au centre) se lie plus fortement au site actif grâce à d'autres liaisons : le groupe hydroxyle d'un dérivé de l'acide sialique est remplacé par un gros groupe

guanidine chargé positivement, qui se fixe solidement à deux acides aminés chargés négativement situés au fond du sillon. Le GS 4104 est converti en GS 4071 dans l'organisme. La molécule résultante (à droite) conserve les liaisons carboxylate établies par l'acide sialique, mais elle a aussi un groupe hydrophobe qui, dans le sillon de liaison, provoque la formation d'une cavité hydrophobe qui maintient le médicament en place par des forces attractives hydrophobes (les petits traits verts).

nez ou aspiré par la bouche, pour agir sur le système respiratoire.

C'est le groupe guanidine qui fait du zanamivir un inhibiteur si efficace, mais c'est aussi lui qui rend le produit sans effet quand il est administré sous forme de comprimés.

Avant d'atteindre les régions de l'organisme où il agit, un médicament ingéré doit traverser les cellules du revêtement intestinal et atteindre le sang. Malheureusement, les molécules chargées traversent difficilement les membranes cellulaires lipidiques,

perméables surtout aux molécules non chargées.

Comme l'inhalation est un moyen commode d'administrer un médicament agissant dans les voies respiratoires, les Laboratoires *Glaxo Wellcome* ont entrepris de nouveaux tests du

Des vaccins plus efficaces

La grippe ne serait-elle pas mieux jugulée par un vaccin «universel», capable de prévenir une infection en stimulant l'organisme pour qu'il prépare une réaction immunitaire qui le protégerait contre n'importe quelle souche de virus de la grippe ? Si, mais un tel vaccin n'existe pas encore.

Aujourd'hui, les immunologistes cherchent à raccourcir les délais de production des vaccins, afin qu'une campagne de vaccination soit rapidement mise en place en cas d'épidémie grave. Ils voudraient mettre au point des vaccins dont l'administration ne nécessiterait plus d'injections, améliorer l'acceptabilité des vaccins et augmenter la couverture vaccinale des enfants. En effet, si les personnes âgées sont le plus malades, ce sont surtout les enfants qui assurent la transmission de la maladie.

Les vaccins contre la grippe se sont généralisés depuis les années 1940. Aujourd'hui, la chaîne de fabrication commence par l'analyse d'échantillons de virus de la grippe collectés par 110 sites de surveillance, répartis dans le monde entier. Chaque année, en février, l'Organisation mondiale de la santé identifie trois souches – deux de type A et une de type B – qui semblent devoir être les principales responsables des gripes de la saison à venir (de novembre à mars dans l'hémisphère Nord) ; ces trois souches entreront dans la composition du vaccin.

Pour fabriquer un vaccin, on pourrait cultiver à grande échelle les souches sélectionnées, les inactiver pour qu'elles ne puissent pas déclencher d'infection, puis les rassembler en une seule préparation. Cependant, les souches sélectionnées se multiplient lentement au laboratoire, ce qui rend la production de masse difficile. Pour tourner cette difficulté, les biologistes insèrent, dans une forme de virus de grippe qui se multiplie rapidement en laboratoire, des protéines stimulant le système immunitaire (l'hémagglutinine et la neuraminidase), lesquelles proviennent de la surface des souches sélectionnées. Ensuite, ils infectent des embryons de poulet avec le virus modifié à croissance rapide et le virus sélectionné. Les particules virales fabriquées par les embryons se multiplient rapidement ; ils portent des spicules d'hémagglutinine et de neuraminidase des souches supposées responsables des épidémies de l'année à venir. Ces virus à croissance rapide sont ensuite isolés, puis confiés aux fabricants de vaccins, qui en assurent la production au moyen d'un grand nombre d'embryons de poulet.

Auparavant, le vaccin était constitué d'un mélange de formes inactivées des trois types de souches sélectionnées. Aujourd'hui,

la plupart des fabricants préparent le vaccin à partir des protéines extraites des virus. Les protéines déclenchent les réactions immunitaires, mais ne sont absolument pas infectieuses. Dans les deux cas, les vaccins stimulent le système immunitaire, lui font fabriquer des anticorps qui se fixent sur les particules virales infectieuses portant ces protéines, lesquelles sont alors éliminées.

D'autres vaccins contiennent des virus vivants atténués, qui ont l'avantage de déclencher la production d'anticorps, mais aussi de globules blancs, nommés lymphocytes T, qui repèrent et éliminent les cellules infectées. Ils ne s'attaquent pas seulement aux seules souches reconnues par les anticorps spécifiques, mais aussi à des souches voisines. Ils resteraient donc efficaces si les molécules de surface d'une souche virale changeaient légèrement.

Un vaccin à base de virus vivant atténué, administré sous forme d'aérosol nasal, a été testé chez l'homme et, notamment, chez les enfants ; il sera probablement commercialisé d'ici un à deux

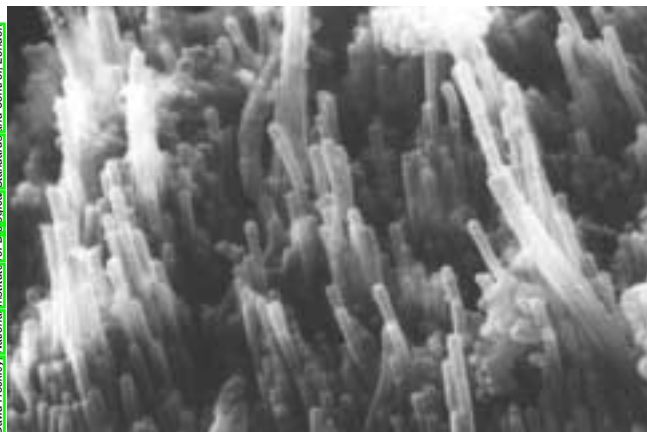
ans. Malheureusement, on ne sait pas fabriquer rapidement les vaccins à base de virus vivant atténué, de sorte qu'on ne pourrait sans doute pas les utiliser lors d'une pandémie soudaine.

Pour raccourcir la durée de production, on cherche des méthodes qui éviteraient d'avoir recours à tant d'œufs fécondés. On pourrait insérer des gènes d'hémagglutinine et de neuraminidase provenant des souches sélectionnées dans une autre sorte de virus, telle qu'un baculovirus, qui, contrairement aux virus de la grippe, se multiplie très bien en culture. En se multipliant, les virus génétiquement modifiés fabriqueraient de grandes quantités de protéines de la grippe, qui seraient purifiées et utilisées dans les vaccins. On saurait préparer et distribuer des vaccins recombinants en deux mois (trois mois au plus), mais on doit d'abord en confirmer l'efficacité.

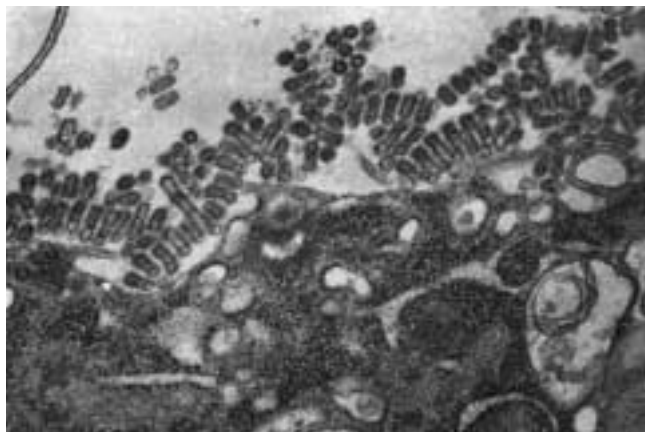
Une stratégie encore plus rapide consisterait à utiliser de l'ADN nu : les gènes de l'hémagglutinine et de la neuraminidase, introduits dans des anneaux d'ADN nommés plasmides, seraient injectés dans la peau ou dans les muscles, et absorbés par les cellules environnantes, lesquelles se mettraient à produire des protéines du virus de la grippe. Ces protéines seraient alors présentées à la surface des cellules qui les fabriquent, où les cellules du système immunitaire les repéreraient. Des anticorps et des lymphocytes T capables de neutraliser les virus libres et d'éradiquer toutes les cellules infectées seraient produits. Les vaccins contre la grippe à ADN nu sont efficaces sur des animaux, mais doivent encore être testés sur l'homme.



UNE VACCINATION ANNUELLE est généralement la meilleure façon d'éviter la grippe. Pour certains, les piqûres seront un jour remplacées par un vaccin administré par un aérosol nasal.



5. DE NOUVELLES PARTICULES VIRALES quittent parfois la cellule infectée sous forme de filaments (à gauche) ; parfois aussi, elles sont sphériques ou de forme intermédiaire. Les particules s'agglutinent sur la



surface de la cellule (les petites tiges et les sphères en haut de la micrographie de droite) quand leurs molécules de neuraminidase sont inactivées ; les particules virales cessent d'infecter d'autres cellules.

zanamivir chez l'homme. Toutefois, certaines personnes préférèrent prendre des comprimés, et les Laboratoires *Gilead Sciences* se sont associés aux Laboratoires *Hoffman-La Roche* pour rechercher un inhibiteur de la neuraminidase administrable par voie orale. De surcroît, un médicament circulant dans le sang combattrait n'importe quel type de virus de la grippe très pathogène infectant des cellules autres que celles des voies respiratoires.

La deuxième voie

Après avoir synthétisé et testé de nombreux composés, les pharmacologues en trouvèrent un qui était aussi puissant que le zanamivir et qu'ils nommèrent GS 4071. Il contient l'un des principaux groupes de liaison de la neuraminidase, également présent dans le zanamivir : un groupe carboxylate chargé négativement et se liant à des acides aminés chargés positivement du site actif de l'enzyme. En outre, l'interaction du GS 4071 et du site actif fait tourner l'un des acides aminés du sillon, ce qui fait apparaître une nouvelle cavité hydrophobe (qui ne se lie pas à l'eau ni aux molécules chargées) : cette dernière devient un site de fixation d'une séquence également hydrophobe (une chaîne de carbone et d'hydrogène) du médicament.

Ce produit donnait de bons résultats *in vitro*, empêchant la multiplication du virus sans endommager les cellules saines. En revanche, chez l'animal, le médicament ne passa pas la barrière intestinale pour atteindre le sang, à cause du groupe carboxylate chargé négativement. Heureusement, une petite retouche (la mise en place d'un masque

sur le groupe chargé négativement) y remédia : la molécule obtenue, nommée GS 4104, traversait la barrière intestinale et passait dans le sang ; puis des enzymes du sang et du foie éliminaient le masque. Revenue à sa forme originale, GS 4071 inhibe la neuraminidase et la dispersion des particules virales dans les voies respiratoires des animaux testés. Comme le zanamivir, il semble bien fonctionner chez l'homme.

Les derniers comptes rendus des essais cliniques du zanamivir et du GS 4104 ont confirmé les résultats préliminaires : quand le traitement commence moins d'un jour et demi après l'apparition des symptômes, le zanamivir inhalé et le GS 4104 administré par voie buccale réduisent d'environ deux à trois jours la durée de la maladie et atténuent la gravité des symptômes. Lors d'un essai avec le GS 4104, par exemple, les symptômes ont été réduits de 25 à 60 pour cent. En outre, ces médicaments diminuent de plus de moitié le risque d'infections bactériennes secondaires et potentiellement mortelles, telles les bronchites. Ces complications sont la principale cause des décès survenant à la suite d'une grippe, chez les personnes âgées ou qui sont déjà malades.

Le zanamivir sous forme injectable semble également efficace et serait aussi un médicament préventif : lors d'un essai avec du zanamivir, deux pour cent des personnes prenant la substance ont eu la grippe, contre six pour cent de ceux qui ne prenaient rien. Des résultats comparables ont été obtenus avec le GS 4104. Aucun de ces produits n'a eu d'effet secondaire grave.

Fortes de ces résultats, les Laboratoires *Glaxo Wellcome* ont demandé en

Europe, en Australie, au Canada et aux États-Unis l'autorisation de mise sur le marché de la forme de zanamivir administrée par aérosol, et les mêmes démarches devraient être entreprises prochainement pour le GS 4104. D'autres inhibiteurs de la neuraminidase ont donné de bons résultats sur l'animal ; les Laboratoires *Johnson & Johnson* les étudient aujourd'hui.

Épargner quelques jours de maladie et alléger les symptômes grippaux semblent être des progrès bien minces, mais l'intérêt est pourtant notable. La fatigue et les autres symptômes ressentis au cours des derniers jours d'une grippe sont essentiellement dus à l'activité d'arrière-garde du système immunitaire, lorsque ce dernier a presque complètement éliminé le virus de l'organisme. Les médicaments contre la grippe n'ont pas d'action sur cette activité. En revanche, en inhibant la multiplication virale, ils réduisent la durée et la gravité de la première phase (et aussi la plus pénible) d'une grippe.

Plus le traitement commence rapidement, meilleurs sont les résultats, parce que la quantité de virus dans l'organisme est inférieure, plus facilement maîtrisable, et que les médicaments ne réparent pas les lésions tissulaires causées par le virus avant le début du traitement. Pour utiliser au mieux ces produits, on devrait pratiquer des tests rapides de détection d'une infection, avant même l'apparition des symptômes. On pourrait appliquer chaque matin sur la langue une petite bandelette d'un papier qui détecterait les virus de la grippe. Si la bandelette se colore, c'est la preuve d'une contamination, que l'on combattrait par un médicament

Les causes de la virulence

La grippe tue surtout les personnes dont le système immunitaire est déjà déficient, par exemple des personnes âgées ou déjà malades. Pourtant, elle tue aussi parfois des personnes jeunes et en pleine santé aussi rapidement et aussi implacablement que s'il s'agissait de personnes affaiblies.

Tel fut le cas en 1918 : la pandémie de grippe espagnole fit plus de victimes que la Première Guerre mondiale. Au cours de cette pandémie, même des soldats robustes périrent : pris de malaises dans la matinée, ils s'alitaient dans l'après-midi, et certains mouraient la nuit même. En 1997, à Hongkong, sur les 18 personnes atteintes par un nouveau virus, six périrent ; certaines des victimes étaient jeunes et bien portantes jusqu'alors.

Pourquoi certaines souches sont-elles si virulentes ? Les plus meurtrières semblent capables d'infecter des tissus différents de la cible usuelle des virus de la grippe, c'est-à-dire les voies respiratoires chez les mammifères et le tube digestif chez les oiseaux. Pour élucider les mécanismes de la virulence, les biologistes tentent de comprendre pourquoi certaines souches deviennent pan-tropiques, c'est-à-dire qu'elles se mettent à attaquer tous les types cellulaires.

En 1983, l'un d'entre nous (R. Webster) et ses collègues de l'hôpital de Memphis ont constaté qu'un virus responsable d'une maladie gastro-intestinale banale chez des poulets, en Pennsylvanie, s'était mis, soudain, à tuer des élevages entiers : un unique acide aminé avait été remplacé par un autre, dans une protéine virale de surface (une hémagglutinine). Grâce à cette infime modification, le virus se répliquait dans tous les organes des oiseaux et y créait des lésions.

Ultérieurement, on a découvert pourquoi ce minuscule changement de structure avait eu un tel effet sur l'activité virale : quand un virus de la grippe pénètre pour la première fois dans une cellule, il y est d'abord séquestré dans une sorte de cage intracellulaire (nommée endosome). Il parvient néanmoins à se multiplier, parce que les molécules d'hémagglutinine de la surface virale favorisent la fusion de la membrane virale et de l'endosome. Au moment de la fusion, les gènes viraux et les protéines s'échappent de l'endosome et se mettent à fabriquer de nouvelles copies du virus en



LA PANDEMIE DE GRIPPE ESPAGNOLE qui commença en 1918 tua plus de 20 millions de personnes. Une aide alimentaire a été prodiguée aux orphelins dont les parents étaient morts de la grippe, comme ici à Cincinnati.

grande quantité. L'hémagglutinine ne facilite la fusion que si elle a été coupée en deux parties avant que le virus ne pénètre dans la cellule. Ce clivage est réalisé par une famille d'enzymes (les sérine protéases), surtout fabriquées dans le tube digestif des oiseaux et dans les voies respiratoires des mammifères.

La substitution d'un acide aminé, dans le virus d'oiseau devenu mortel, avait modifié le site de clivage de l'hémagglutinine, laquelle était devenue sensible à d'autres enzymes (les protéases de type furine) présentes dans tous les tissus de l'organisme. C'est ce nouveau site de clivage qui a permis au virus d'infecter tous les tissus de l'organisme.

La pandémie humaine de 1918 fut-elle mortelle parce que la souche virale portait une forme mutante d'hémagglutinine, susceptible d'être clivée par des protéases présentes hors du système respiratoire humain ? Pour vérifier cette hypothèse, Jeffery Taubenberger et ses collègues de l'Institut de pathologie de l'armée américaine ont étudié du matériel génétique prélevé sur trois victimes de cette ancienne pandémie : deux soldats (dont des prélèvements de tissus avaient été conservés) et une Inuit dont le corps avait été conservé dans le permafrost, en Alaska, jusqu'en août 1997.

Ils ont alors établi la séquence des acides aminés de l'hémagglutinine virale, et ils achèvent la séquence de la neuraminidase. Toutefois, le site de clivage de la molécule d'hémagglutinine n'avait rien de particulier, et J. Taubenberger n'a pas détecté de mutation de la neuraminidase qui aurait provoqué l'activité virale généralisée. Peut-être une mutation particulière de la neuraminidase permet-elle l'accumulation des sérine protéases qui clivent les molécules d'hémagglutinine de tissus ne fabriquant pas ces enzymes.

Ainsi, les causes de l'extrême virulence de la pandémie de 1918 restent mystérieuses. En revanche, les biologistes ont une hypothèse sur le caractère mortel de la souche virale apparue à Hongkong en 1997 : ce virus, apparu chez des oiseaux, présentait une forme d'hémagglutinine très sensible aux clivages.

Il reste à démontrer que cette forme d'hémagglutinine est responsable de la virulence. C'est en espérant découvrir d'autres explications que les biologistes continuent d'examiner méticuleusement les gènes viraux.



DES POULETS furent livrés à Hongkong en février 1998 pour remplacer une partie des millions d'animaux qui avaient été tués pour enrayer la transmission à l'homme d'un virus de grippe mortel. Le sang de ces oiseaux était testé par des équipes sanitaires officielles.

antigrippal. Certains médecins commencent à utiliser des kits de détection rapide ; les fabricants pourraient en faire des produits grand public.

On devra s'assurer que l'infection contractée est bien une grippe, et non un simple rhume, car les médicaments contre la grippe n'ont aucun effet sur le rhume, dû à d'autres types de virus. Administrés contre un rhume, une allergie ou une infection bactérienne dont les symptômes sont voisins de ceux de la grippe, ils seraient sans effet.

Des interrogations demeurent

Bien que les inhibiteurs de la neuraminidase soient prometteurs, on ignore encore si l'inhibition de la réplication virale et la réduction des complications épargneront réellement des vies.

De surcroît, de nombreux virus et bactéries deviennent résistants à tous les médicaments : les micro-organismes luttent pour leur survie, et ceux qui parviennent à modifier le médicament et à l'inactiver lui échappent et survivent. Plusieurs micro-organismes sont devenus résistants à l'amantadine et à la rimantadine, par exemple. Les nouveaux médicaments contre la grippe échapperont-ils à ce problème ?

Peut-être. Les biologistes qui ont essayé de fabriquer des souches du virus de la grippe résistant au zanamivir et au GS 4104 ont eu bien des difficultés. Quelques souches deviennent résistantes quand les acides aminés du site actif de la neuraminidase sont modifiés, mais ces changements diminuent la stabilité et l'efficacité de l'enzyme, ce qui compromet la survie du virus dans l'organisme.

D'autres souches deviennent résistantes, parce que la composition chimique de leur hémagglutinine est transformée. Nous l'avons vu, la neuraminidase élimine l'acide sialique des nouvelles particules virales, de sorte qu'elles ne s'agglutinent pas sous l'effet de l'hémagglutinine et vont infecter d'autres cellules. Les modifications de la composition de l'hémagglutinine réduisent son affinité pour l'acide sialique, ce qui évite à la neuraminidase d'intervenir. Le second groupe de mutants n'a montré aucune résistance aux médicaments, chez l'animal. La faiblesse de la liaison entre l'hémagglutinine et l'acide sialique réduit vraisemblablement le pouvoir infectieux des souches en réduisant leur ancrage sur les cellules.

Les inhibiteurs de la neuraminidase ne sont pas les seuls médicaments étudiés. Les chimistes essaient depuis longtemps de mettre au point des médicaments dont la cible serait le site de liaison de l'acide sialique sur l'hémagglutinine, mais sans succès. L'amantadine et la rimantadine, déjà sur le marché, se sont révélées efficaces avant que l'on ne découvre leur mécanisme d'action. Aujourd'hui, on sait qu'elles perturbent l'activité d'une protéine virale nommée M2, qui fonctionne comme un canal ionique. Voilà pourquoi ces médicaments sont inefficaces contre les virus de type B : ceux-ci ne portent pas de molécule M2. Parallèlement à la recherche de nouveaux médicaments, l'amélioration des vaccins contre la grippe se poursuit.

Souvent, entre deux pandémies de grippe surviennent des épidémies plus localisées. Chaque année, la grippe touche entre 5 et 15 pour cent de la population française. Durant l'hiver 1989-1990, une épidémie grave a sévi en France, entraînant quelque 20 000 décès dus aux complications. Cette surmortalité atteint 4 000 personnes les années où la maladie n'est pas trop grave.

Ces statistiques devraient s'alléger au cours des prochaines années, lorsque de nouveaux médicaments contre la grippe seront apparus et que les vaccins seront davantage utilisés et produits plus rapidement.

Graeme LAVER est professeur de biochimie et de biologie moléculaire à l'Université de Canberra. Norbert BISCHOFBERGER est vice-président du département de recherche des Laboratoires *Gilead Sciences*. Robert WEBSTER dirige le service de virologie et de biologie moléculaire à l'Hôpital St. Jude Children's, à Memphis.

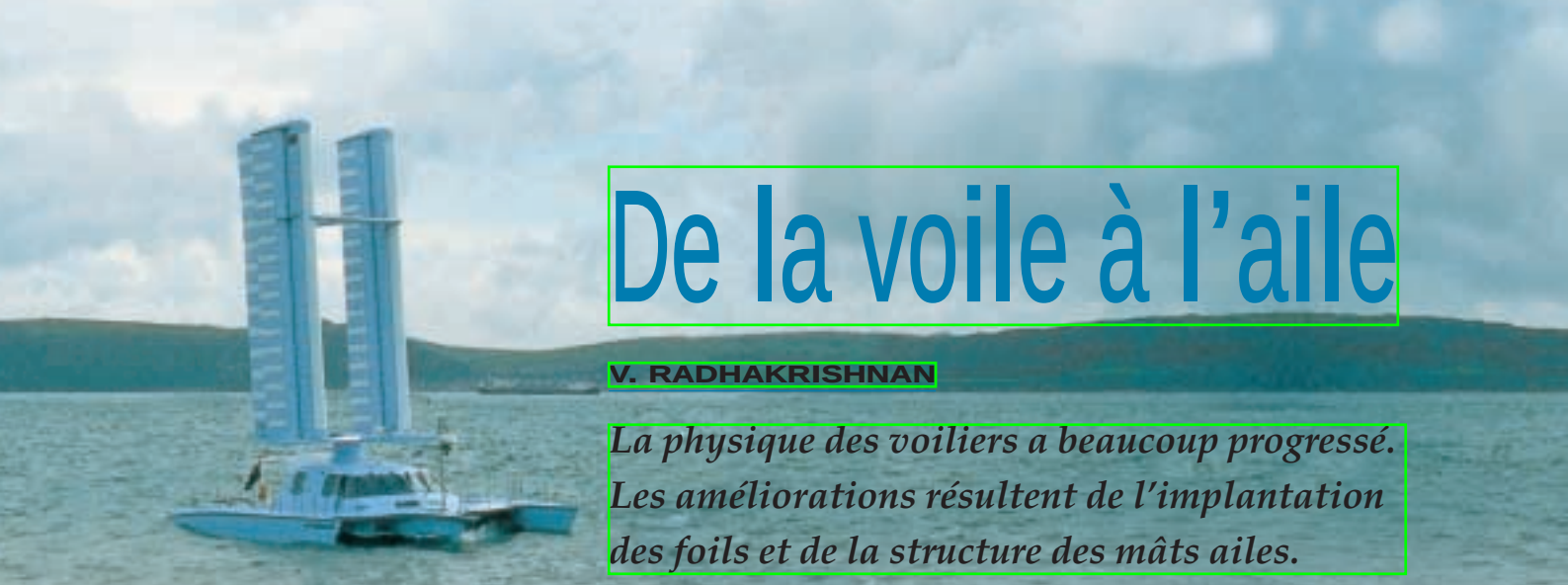
Richard COLLIER, *The Plague of the Spanish Lady*, Atheneum, 1974.

Alfred W. CROSBY, Jr., *Epidemic and Peace*, 1918, Greenwood Press, 1976.

Edwin D. KILBOURNE, *Influenza*, Plenum Medical Book Company, 1987.

Frederick G. HAYDEN et Peter PALESE, *Influenza Virus*, in *Clinical Virology*, sous la direction de Douglas D. Richman, Richard J. Whitley et Frederick G. Hayden, Churchill Livingstone, 1997.

Textbook of Influenza, sous la direction de Karl G. Nicholson, Robert G. Webster et Alan Hay, Blackwell Science, 1998.



De la voile à l'aile

V. RADHAKRISHNAN

La physique des voiliers a beaucoup progressé. Les améliorations résultent de l'implantation des foils et de la structure des mâts ailes.

Les deux tiers de notre planète sont recouverts de mers balayées par les vents et les marins ont exploité la force du vent pour voyager sur l'eau. Aussi la navigation à voile fut-elle longtemps le seul moyen de découvrir, puis de relier, des contrées lointaines. Aujourd'hui, nous franchissons les océans en les survolant de très haut, et la direction et la force des vents d'altitude affectent peu les durées de traversée. Toutefois ces deux modes de transport exploitent les mêmes phénomènes physiques, l'action d'un fluide sur une surface, voile, aile ou dérive.

Sur le Nil, il y a quatre milliers d'années, les conditions de navigation étaient particulièrement favorables : le Nil s'écoule du Sud vers le Nord, et les vents soufflent en sens inverse. Aussi les marins égyptiens remontaient-ils le courant toutes voiles dehors ; vers le Nord, ils carguaient la voile pour descendre le fleuve en profitant du courant. Dans ce dernier cas, les marins immergeaient des planches perpendiculairement à la direction du courant, augmentant ainsi la surface sur laquelle agit le mouvement de l'eau : la poussée du courant devait être supérieure à l'action opposée du vent sur la portion émergée du navire. Cette pratique montre que, dans un système où interagissent un solide, un liquide et un gaz, la vitesse et la direction du solide – le bateau – sont déterminées par les forces qui agissent au-dessus et au-dessous de la ligne de flottaison.

Les forces qui freinent le mouvement du bateau sont essentiellement la résistance visqueuse provenant du frottement de l'eau sur la carène, la traînée due à la forme de la coque, et la résistance de vague. Les deux premières résistances croissent comme le carré de la vitesse du bateau, mais les architectes

navals limitent leurs effets en construisant des coques lisses et effilées. La troisième composante, la vitesse de vague, est un handicap majeur. La longueur de la vague créée par le mouvement du bateau est proportionnelle au carré de sa vitesse. La vague limite la vitesse du bateau à la valeur pour laquelle la vague a la même longueur que la coque : le bateau doit alors remonter en permanence la pente créée par la vague qui résulte de l'accumulation de l'eau à l'avant et de la dépression à l'arrière. Ce phénomène, la résistance de vague (aussi dénommée résistance de carène), découvert au siècle dernier par l'ingénieur anglais William Froude, explique pourquoi les transatlantiques qui dépassaient les quarante nœuds étaient si longs, et pourquoi également tout voilier conventionnel de dix mètres de long, même par vent de vingt nœuds, atteint tout juste sept nœuds (un nœud est environ égal à 0,5 mètre par seconde, soit 1,8 kilomètre par heure).

Sur les hydrofoils la résistance de vague est réduite par la surélévation dynamique de l'embarcation ; la poussée vers le haut est due à la poussée du bateau sur des foils inclinés de type patins. La poussée vers le haut n'est plus uniquement la poussée d'Archimède, c'est principalement la poussée verticale (la portance) exercée sur une petite surface immergée : sur le nouvel *Hydroptère* (voir la figure 2), la résistance de vague est fortement réduite.

Les Vikings savaient que leurs bateaux devaient être longs, lisses et élancés pour « remuer moins l'eau », mais je les soupçonne d'avoir davantage navigué à la rame qu'à la voile. Les progrès vinrent des Chinois, puis des Arabes, qui construisirent et voyagèrent avec de véritables embarcations à voile. Ces marins avaient compris que

les voiles ne se comportaient pas comme des feuilles ballottées par le vent dont on ne peut maîtriser la destination, et ils savaient naviguer vent debout : leurs voiliers pouvaient aller de A à B même quand le vent soufflait de B vers A.

Pour comprendre le pourquoi et le comment de la navigation contre le vent, nous examinerons l'aérodynamique des voiles, mais pas seulement les voiles, car, pour extraire l'énergie motrice du vent, nous devons « mettre un pied dans l'eau ». Imaginez une éolienne portée par un ballon : elle ne produit de l'électricité que si le ballon est arrimé au sol. Si on libère le ballon, il dérive à la vitesse du vent ; l'éolienne ne ressent alors aucun vent apparent et ne tourne plus. Il en va de même de la voile du bateau.

La voile carrée

L'imposante voilure des grands navires d'autrefois était, pour l'essentiel, constituée de voiles carrées suspendues à des vergues. Une voile carrée fonctionne comme un parachute et engendre une force, la traînée de la voile, orientée dans le sens du vent. Avec un tel gréement, quelle que soit votre destination, il faut un vent arrière raisonnablement fort, car à mesure que vous accélérez, le vent apparent faiblit : la poussée du vent, proportionnelle au carré de cette vitesse apparente, diminue, tandis que la traînée sur la coque augmente plus vite que le carré de la vitesse de l'eau. Par vent modéré, pour approcher la vitesse limite de vague du navire, il faut déployer l'énorme surface de toile des grands voiliers. Ces voiles, équivalent des gigantesques spinnakers modernes, jouent le même rôle, au-dessus de l'eau, que la dérive transverse immergée par les Égyptiens pour profiter du courant.



1. LES TROIS-MATS à la formidable voilure présentaient des dangers. Les trois-mâts étaient les plus grands bateaux et les plus rapides au début du xx^e siècle. Ils restaient contrôlables, mais leur vitesse était limitée par la résistance de carène sur la partie immergée de la coque. Quand le vent soufflait fort, la vitesse ne pouvait augmenter pour diminuer le vent apparent, et la force exercée sur les voiles augmentait jusqu'à briser les mâts ; aussi les marins devaient rapidement carquer les voiles. Par gros temps, l'opération était difficile et périlleuse.



2. L'HYDROPTÈRE permet d'atteindre, à quatre mètres au-dessus de l'eau, une vitesse de 40 nœuds pour seulement 25 nœuds de vent réel. Les coques sortent de l'eau grâce à la poussée verticale des

plans porteurs immergés, les hydrofoils. Au lieu de pousser des tonnes d'eau, l'hydroptère égratigne la surface des océans : la limite liée à la vague de carène est notablement diminuée.

Hélas, quand la vitesse limite du bateau est atteinte, le vent continue à pousser voiles et mâts ; cette confrontation paradoxale entre «une force irrésistible et un objet inamovible» peut amener la rupture du mât. Quand le vent augmente par trop, il faut vite carguer les voiles, manœuvre dangereuse comme en témoigne la perte moyenne d'un membre d'équipage, passé par dessus bord, lors de chaque contournement du cap Horn.

La précipitation avec laquelle on réduit ou abat une voile, est une obsession nécessaire, aujourd'hui comme hier ; hélas, une pièce de toile battant au vent lors d'une tempête est un objet démoniaque, car incontrôlable. Nombre de marins sont morts en tentant de maîtriser une voile par vent violent. Je suis passablement irrité par le romantisme associé au «bon temps de la marine à voile». La conception des navires imposait aux équipages des performances physiques inouïes ; pour que les marins accomplissent ces tâches, la hiérarchie imposait une discipline de fer d'une rigueur inhumaine.

Au contraire, sur les jonques chinoises, un ingénieux mécanisme de type store vénitien, permettait à un seul homme, debout sur le pont, de hisser et d'abattre les voiles. Pour comprendre comment les marins apprirent à naviguer contre le vent, nous allons maintenant relier l'hydrodynamique à l'aéronautique.

La poussée sur une voile

De nombreux physiciens s'interrogèrent sur l'intensité et sur la direction de la force engendrée par un fluide s'écoulant dans une direction faisant un petit angle avec une lame solide.

Selon Newton, cette force était négligeable pour de petits angles, croissant seulement comme le carré du sinus de l'angle entre la direction du vent et la lame. Dans un article d'une remarquable perspicacité rédigé il y a plus d'un siècle, Lord Rayleigh réfuta cette loi et affirma que la force était bien supérieure. Il écrivait en 1876 : «Le fait que la résistance au mouvement [...] d'une lame dans un fluide au repos puisse être accrue considérablement par la superposition d'un mouvement en biais présente un grand intérêt. Par exemple, ce fait se révélera d'une importance vitale pour le problème du vol artificiel.»

Il calcula une force bien plus élevée aux petits angles, valeur que l'on sait aujourd'hui être encore supérieure. Elle est correctement donnée par la théorie des écoulements sur les lames solides, théorie élaborée par les physiciens depuis le début du XX^e siècle. C'est cette force qui permet à un oiseau de descendre en planant plus lentement qu'un parachute dont l'aire serait égale à celle des ailes de l'oiseau. Et c'est ce qui maintient les avions dans le ciel avec une force proportionnelle à l'aire de l'aile.

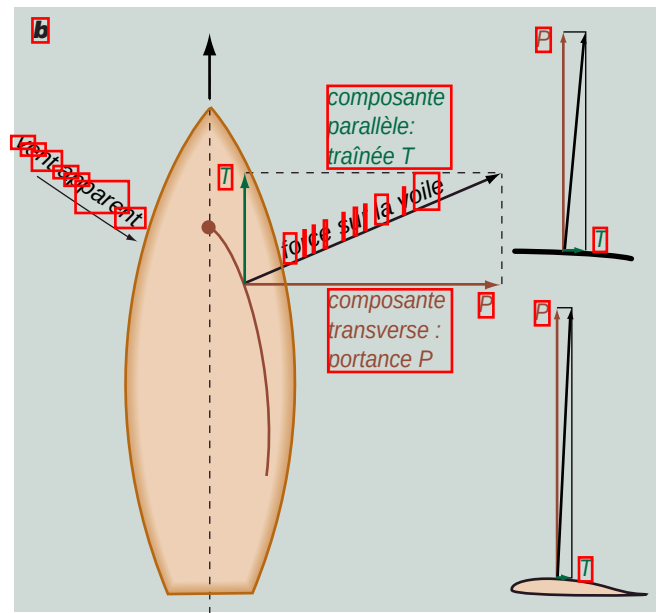
Pour revenir à notre problème, c'est cette portance perpendiculaire à l'écoulement de l'air sur la voile qui permet au navire d'avancer contre le vent. La composante transverse de cette force, bien plus importante que la composante orientée vers l'avant, tend à pousser le navire latéralement. Ainsi, toute embarcation naviguant à la voile est dotée d'un dispositif immergé qui s'oppose au mouvement latéral, tout en facilitant le mouvement vers l'avant. C'est pour remplir cette fonction que les Chinois ont inventé les dérives latérales utilisées aujourd'hui encore aux Pays-Bas sur les navires traditionnels. La même fonction peut être obtenue à l'aide d'ailerons, fixes ou rétractables, de dérives ou de quilles, placés sur les planches à voile, les canots et les voiliers.

Lord Rayleigh et William Froude avaient compris que la force qui empêche le bateau de chasser latéralement n'est pas la traînée de la dérive qui se déplace latéralement dans l'eau, mais la portance engendrée par son mouvement vers l'avant dans une direction qui forme un petit angle avec son plan de symétrie.

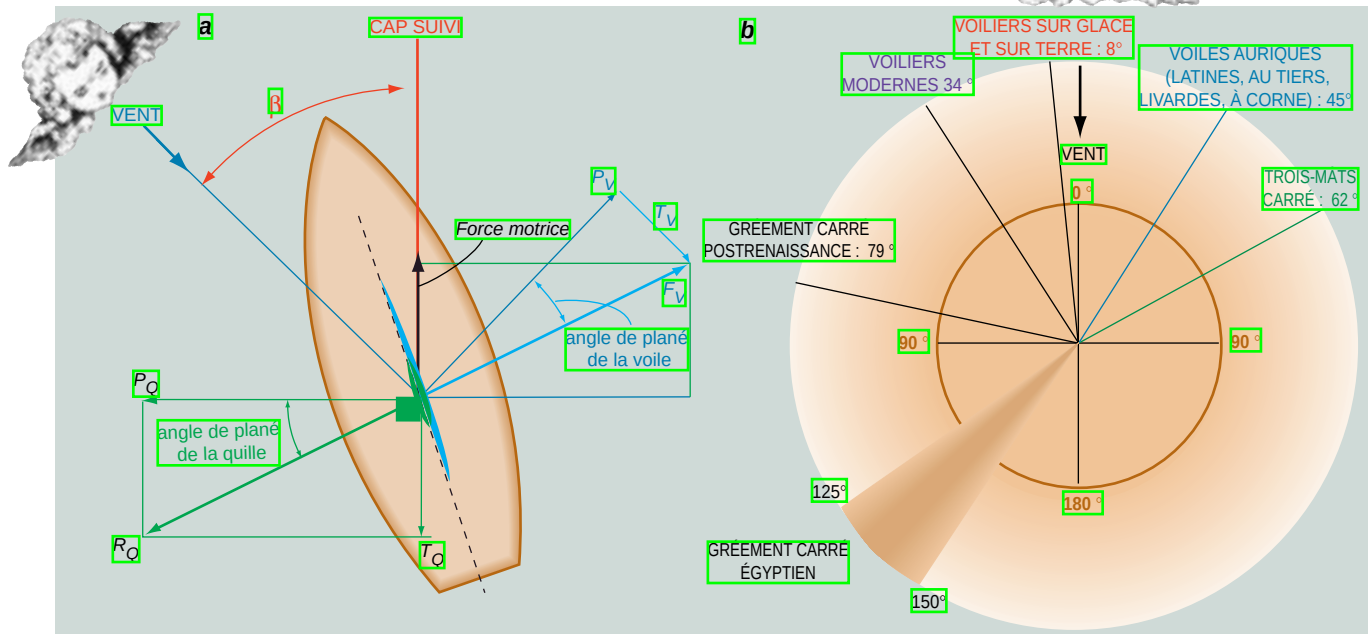
Cette dérive fonctionne comme un hydrofoil vertical plongé dans l'eau, à l'instar de la voile qui se comporte comme un airfoil vertical dans l'air. Ces forces horizontales, longitudinale et transverse s'exerçant sur ces foils, sont dénommées traînée et portance.



3. LA VOILE PRINCIPALE d'une jonque chinoise (a) pouvait être hissée ou abattue depuis le pont par un seul homme. Ces jonques furent les premières embarcations à remonter au vent. Composantes de la poussée de la voile sur une embarcation remontant au vent (b). Pour



contrer la grande composante latérale, il faut recourir à un dispositif immergé, une dérive. Portance et traînée s'exerçant sur une lame incurvée et sur un airfoil (c) pour un angle au vent inférieur à 4 degrés. La lame et l'airfoil ont même rapport longueur/largeur, égal à 6.



4. FORCES QUI S'EXERCENT SUR LA VOILE ET SUR LA QUILLE. (a). L'écoulement de l'air autour de la voile (en bleu) crée une force de portance P_V , perpendiculaire à la direction du vent, et une traînée T_V dans la direction du vent. La force résultante sur la voile F_V se décompose aussi en une composante orientée dans l'axe du cap, la force motrice, et une composante de dérive, perpendiculaire au cap. Cette dérive est compensée par la portance P_Q engendrée par l'écoulement de l'eau autour de la quille (il faut pour cela que la quille

ait un angle d'attaque par rapport à l'écoulement de l'eau, donc que l'axe du bateau ne soit pas parallèle au cap). Toutefois cet écoulement crée aussi une traînée T_Q dans l'axe du cap, qui s'oppose à l'avancée du bateau. Cette traînée équilibre la force motrice. Il en résulte (théorème de Lancaster) que la somme des angles de plané de la voile et de la quille est égale à l'angle β entre le cap et le lit du vent. Le plus petit angle β sous lequel un bateau peut remonter au vent est représenté (b) pour différentes embarcations.

Airfoils et hydrofoils

De multiples facteurs déterminent les performances d'un airfoil ou d'un hydrofoil. Nous n'en mentionnerons que trois : la symétrie, la forme (la section) et le rapport longueur sur largeur.

Les oiseaux et la plupart des avions ont des ailes dont on peut difficilement confondre les faces supérieure et inférieure. Apparemment, les oiseaux n'ont pas besoin de voler sur le dos, pas plus que les avions de ligne. Mais les avions d'acrobaties aériennes ont des ailes symétriques qui restent efficaces dans les deux positions de vol. L'angle d'attaque correspond à l'inclinaison de l'aile par rapport à la direction du flux d'air.

Pour les bateaux, il est clair que le vent peut frapper la voile d'un côté ou de l'autre. La dérive, située sous la coque du bateau, doit s'opposer à un déplacement latéral, vers la droite comme vers la gauche. Aussi les dérives, fixées à la coque ou abaissées en son centre, sont-elles symétriques ; en revanche, les dérives latérales, situées sur chaque bord du bateau, peuvent être asymétriques. Les navires hollandais possèdent des dérives latérales images miroir l'une de l'autre, afin d'être plus efficaces.

Une voile en toile, et donc bidimensionnelle, s'incurve aussi facilement dans un sens que dans l'autre. Cette souplesse d'utilisation a pour contrepartie la diminution de l'efficacité de la voile par rapport à un airfoil véritablement tridimensionnel et présente, nous l'avons vu, des dangers. En ce qui concerne le rapport longueur sur largeur, la physique nous enseigne qu'une voile longue et mince est plus efficace, ce qui explique pourquoi la grande voile triangulaire a remplacé les anciennes voiles rectangulaires.

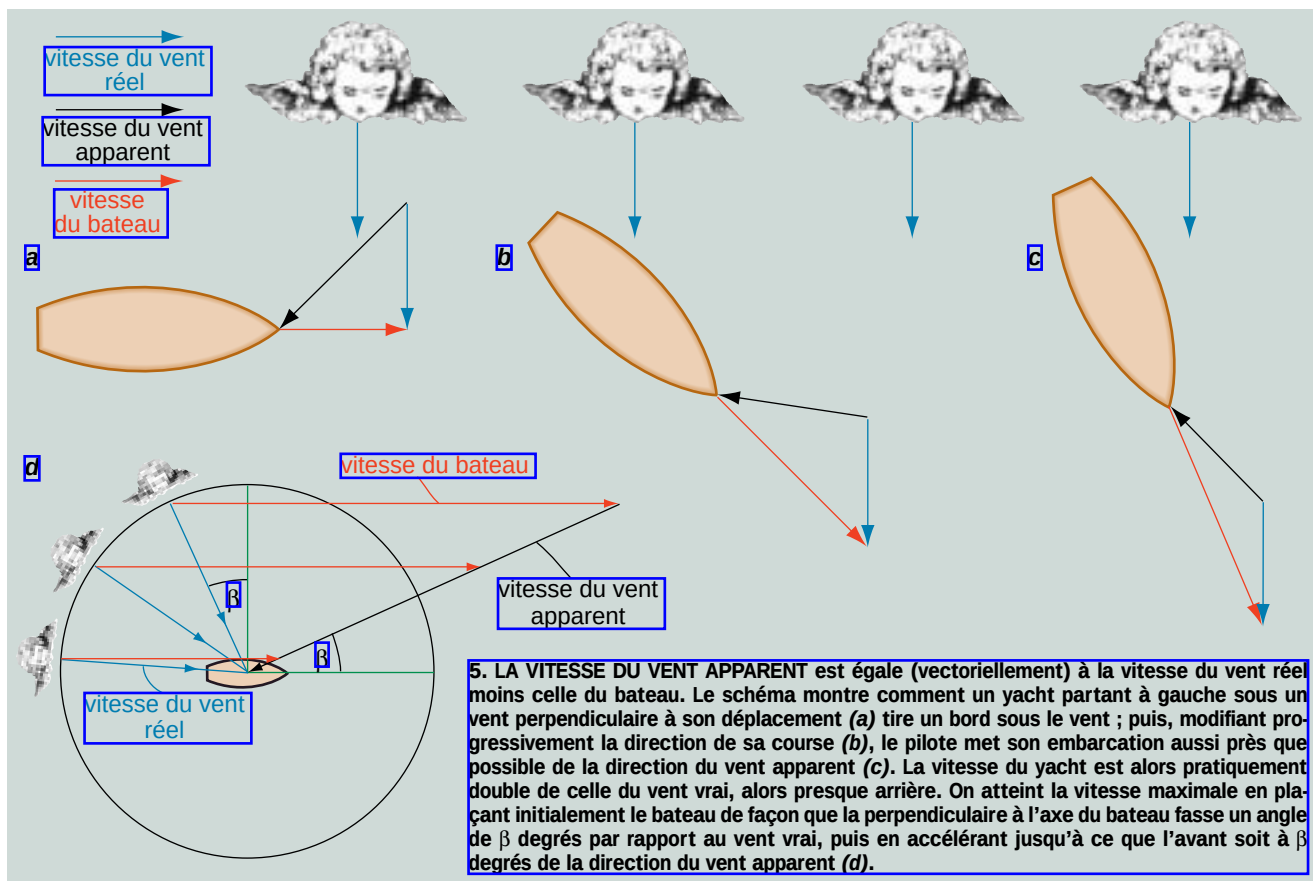
La mesure absolue de la qualité d'un foil est sa finesse, c'est-à-dire le quotient de la force transverse par la force longitudinale, correspondant à l'angle d'attaque optimal, habituellement de quelques degrés. Ce rapport, également appelé rapport portance/traînée indique qu'une surface courbe, une voile par exemple, est moins performante qu'un véritable airfoil rigide. Si vous pilotez un avion monomoteur, et que l'engin tombe en panne, cette finesse détermine le nombre de kilomètres dont vous disposez, à une altitude d'un kilomètre et en l'absence de vent pour trouver une piste d'atterrissage d'urgence. Dans le cas d'un voilier, il existe une finesse associée à la voile et une finesse déterminée par la performance de l'hydrofoil

correspondant au système dérive-carène. Ces deux finesesses déterminent le comportement du voilier.

La théorie des ailes fut développée au début de ce siècle, notamment par Frederick William Lanchester, un mathématicien amateur qui élaborait en solitaire la théorie des écoulements sur les «airfoils». Il fut le premier à expliquer correctement la traînée engendrée par les ailes réelles en la reliant à la cascade de vortex se développant à leurs extrémités. Industriel entreprenant, il construisit aussi une usine de fabrications d'automobiles en Angleterre.

La raison pour laquelle je tiens Lanchester en si haute estime est qu'il a posé en quelques lignes, et bien avant tout le monde, les fondements de la théorie de la navigation à voile. En 1907, il écrit : «Le problème de la mécanique de la navigation à voile se réduit à une association de foils où celui opérant dans l'air (une envergure de voile) et celui opérant dans l'eau (la quille ou la dérive) exercent l'un sur l'autre une réaction.

L'angle minimum par rapport au vent déterminant la course optimale du navire est la somme des angles de plané au-dessus et en dessous de l'eau.» Le brillant théorème de Lanchester montre immédiatement que la performance d'un voilier se caractérise par un seul



nombre, l'angle β . La figure 4b donne les valeurs de cet angle pour divers voiliers. Les performances exceptionnelles des yachts à glace s'expliquent simplement par le fait que les patins empêchent tout mouvement latéral et que l'angle β dépend uniquement de la voile. Un char à voile possède aussi un très petit angle β : parce qu'il est posé sur des roues, le quotient résistance au mouvement latéral / résistance au mouvement avant est extrêmement élevé.

La navigation réelle

Revenons sur l'eau. Il est clair que l'engin à voile idéal se composerait uniquement d'un foil dressé verticalement dans l'air et d'un autre plongé dans l'eau. La meilleure approximation de cet engin idéal est bien entendu la planche à voile. Ingénieuse, portable, peu coûteuse et riche en sensations, elle a mis à la portée de millions de gens un sport de voile autrefois réservé aux seuls milliardaires.

Nous avons vu qu'un voilier peut naviguer pour tout angle au vent supérieur à β , et nous allons maintenant examiner plus en détail l'effet du vent apparent sur la vitesse du voilier. Lorsque le voilier navigue vent arrière,

la vitesse du vent apparent est inférieure à celle du vent vrai. Au contraire, pour certaines allures vent debout, la vitesse du vent apparent dépasse celle du vent vrai. La navigation de course exige ainsi que l'on maximise le vent apparent pour rendre maximale la vitesse du voilier. Toutefois, plus le vent apparent augmente, plus il arrive par l'avant. Quelle est alors l'angle limite ? C'est l'angle β , le plus petit angle au vent pour lequel un voilier peut naviguer : la vitesse maximale est atteinte lorsque le vent apparent est opposé au sens de la marche ! Nous verrons que cette conclusion étonnante amène d'autres surprises.

Les véliplanchistes et les pilotes de yachts à glace, comme tous ceux dont la vitesse de l'engin n'est pas limitée par la vitesse de vague, savent tout cela et utilisent ces connaissances pour tirer leurs bords *sous le vent*. Partant avec le vent de travers et obliquant progressivement dans le sens du vent à mesure qu'ils accélèrent, ils se retrouvent au près par rapport au vent apparent, alors que le vent vrai vient de derrière. Si le vent souffle de A vers B, les conducteurs peuvent partir de A, virer de bord à mi-chemin, puis arriver en B avant l'air avec lequel il était parti. Cette

stratégie montre qu'une petite voile qui se comporte comme un airfoil et engendre une portance, peut conduire une embarcation en un point situé droit sous le vent plus vite que ce vent.

Un spinnaker ou tout autre dispositif donnant une traînée ne peut, au mieux, qu'approcher la vitesse du vent et devrait avoir des dimensions extravagantes pour que la coque soit propulsée avec un vent apparent proche de zéro. Une autre leçon est que les navires rapides tirent généralement des bords bien plus ouverts à cause de la plus grande différence entre les vents vrai et apparent. On considère trop souvent que les performances des catamarans sont médiocres au vent comparés aux bateaux plus lents dont les bords font des angles plus petits. L'angle entre les bords n'atteint la valeur minimale 2β que pour les navires dont la vitesse est négligeable comparée à la vitesse du vent vrai.

Si l'objectif est la vitesse, l'angle β détermine aussi la vitesse maximale que vous pouvez atteindre par rapport au vent et la direction dans laquelle vous devez naviguer pour atteindre cette vitesse. La cosécante de β représente la valeur maximale du rapport vitesse du bateau / vitesse du vent, valeur

atteinte lorsque le vent vrai est à β degrés sur l'arrière. Le vent apparent se trouve alors exactement à β degrés sur l'avant. La faible valeur de l'angle β pour les chars à voile évoluant sur les lacs asséchés de Californie leur permet d'atteindre la vitesse record de 160 kilomètres/heure ; la même raison explique pourquoi des yachts à glace ont dépassé les 180 kilomètres/heure sur la glace. L'endroit idéal pour établir des records de vitesse sur engins à voile est une étendue d'eau balayée par un vent pratiquement perpendiculaire aux trajectoires et dépourvue de vagues ralentissant ces trajectoires.

En Angleterre, à Weymouth, une bande de terre sépare l'océan du port, arrêtant ainsi les vagues tout en laissant passer le vent. Chaque année, en octobre, époque à laquelle souffle souvent un vent très violent, des amateurs venant des quatre coins du globe s'y retrouvent pour tenter, à bord d'étranges engins, de naviguer aussi vite que possible. Cette *Speedweek*, ainsi qu'on la dénomme, est organisée par l'*Amateur Yacht Research Society* (AYRS), une remarquable association qui, durant les quarante dernières années a promu les diverses innovations apparues en navigation à voile, notamment le développement des multicoques.

Les ailes de Phoebus

Au cours des compétitions qui s'y déroulent, les planches à voile, photographie dominant leurs concurrents. Le vainqueur dans la catégorie masculine dépasse 50 kilomètres/heure sous un vent de 30 kilomètres/heure. La figure 7a montre deux planches à voile reliées par un pont, l'idée étant d'obtenir ainsi un meilleur moment antigite que celui offert par le seul poids du véliplanhiste. La photographie 7b est celle d'un trimaran équipé d'une voile de type polynésien. Les planches sont censées planer au-dessus de l'eau, les ailerons de leur partie inférieure fournissant la résistance latérale dont nous avons évoqué plus haut la nécessité. La troisième embarcation (figure 7c) possède une aile asymétrique réellement tridimensionnelle, autrement dit un véritable airfoil, munie d'un dispositif inverseur haut-bas lors des changements de bord. Un petit aileron blanc situé à l'arrière fonctionne exactement comme le gouvernail de profondeur d'un avion : placé sous un certain angle, il maintient automatiquement l'aile dans la direction désirée

par rapport au vent apparent. C'est sur ce principe que repose la propulsion de la plupart des «bateaux à ailes».

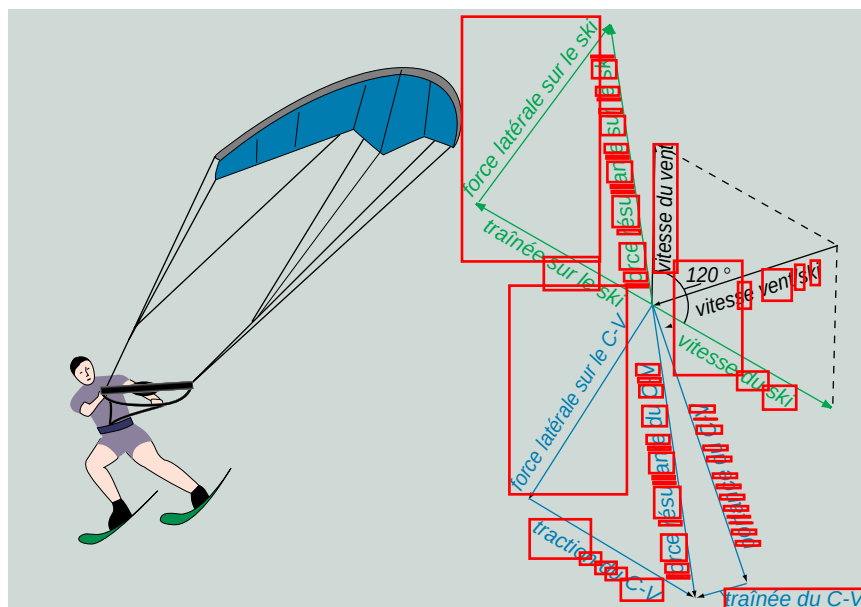
On assiste depuis peu à un retour des voiliers dans les courses de vitesse, dominées depuis 20 ans par les planches à voile. Un hydrofoil trimaran à ailes, baptisé *Yellow Pages Endeavour*, a en effet atteint 46,52 nœuds sous un vent de 18 à 20 nœuds. On pourrait penser que les ailes sont réservées à des prototypes de compétition, et que la voile traditionnelle restera encore, et pour longtemps, la seule praticable et sans danger. Je m'inscris en faux contre cette allégation, et je vais essayer de vous convaincre de la justesse de ma vision.

Naviguer comme un avion

L'un des membres les plus éminents de l'*Amateur Yacht Research Society*, John Walker, construisit, il y a plus d'un quart de siècle, un navire équipé de quatre ailes. Une vingtaine d'années de recherches plus tard, il construisit le prototype plus élaboré, équipé de deux ailes, une sorte de gréement biplan. Ce navire traversa l'Atlantique dans les deux sens et se sortit sans dommage d'un ouragan. Un ordinateur règle l'orientation d'un aileron derrière les deux ailes, le vent fait le reste. La photographie 7d est celle de la toute dernière et plus belle création du spécialiste Walker ; à l'instar des avions, celle-ci a aujourd'hui évolué vers une configuration monoplane. L'aile plus petite, en arrière, est ici encore la dérive, dont l'orientation ajuste la direction du vent à la direction

de course souhaitée ; et là aussi cette orientation est déterminée par un ordinateur alimenté par des panneaux solaires recevant leur énergie du soleil, comme le vent. Ces panneaux solaires sont visibles à l'avant de l'aile principale sur la photographie prise d'avion. Le problème de la symétrie a été résolu à l'aide d'un volet mobile situé sur le bord d'attaque, semblable à ceux que vous voyez sortir des ailes d'un avion de ligne juste avant l'atterrissage. Ce volet peut être orienté d'un côté ou de l'autre de l'aile et engendre un énorme accroissement de poussée.

Toute la partie «avion» est libre de pivoter sur un support clairement visible, et le petit moteur qui fixe l'angle de la dérive est lui aussi alimenté par des panneaux solaires. Bien entendu, il y a un système de secours, lui-même relayable par un contrôle manuel en cas de besoin. Tout est contrôlé par un microprocesseur. Il y a un levier pour enclencher les mouvements avant et arrière, situé à gauche du volant, dans un cockpit qui ressemble désormais à celui d'un avion. Comme tout multicoque qui se respecte, lorsqu'il est face au vent, il navigue lui aussi à la verticale, et non penché sur le côté. Sa version monoplane est construite en série à Plymouth, en Grande-Bretagne. Ces ailes n'ont pas besoin d'être affalées à l'accostage ; libres de pivoter sur elles-mêmes et de s'aligner au vent, elles présentent moins de fardage que le mât et le gréement nus d'un voilier classique, et ne cliquettent pas lorsque le vent souffle. En outre, elles se satisfont des



6. LE DISPOSITIF KITESKI : la force d'un vent de 72 km/h permet une vitesse de 90 km/h.



7. LES PLANCHES A VOILE dépassent 50 kilomètres heure pour un vent soufflant à 30 kilomètres heure. Une double planche à voile est plus stable et tout aussi efficace qu'une planche simple (a). Un tri-



maran avec hydrofoil muni d'une voile polynésienne (b). Catamaran doté d'une véritable aile d'avion (c) : cette aile étant asymétrique, il faut la renverser verticalement lorsqu'on vire de bord. L'aileron

vents ordinaires et n'ont pas besoin, de vent trop forts pour fonctionner de façon optimale.

Le plaisir améliorable de la voile

On l'a souvent dit, la navigation à voile est l'art de capter l'énergie du vent pour propulser un navire sur l'eau. Dans le cas des voiliers, la puissance disponible est proportionnelle à l'aire de la surface interceptant le vent et au cube de la vitesse du vent apparent. Or les vitesses des vents varient au moins d'un facteur 10 et la puissance disponible, pour le meilleur ou pour le pire, varie donc d'un facteur mille ou plus. Aussi doit-on modifier beaucoup la voilure et utiliser tout un jeu de voiles.

J'espère n'offusquer personne en disant qu'un marin abaissant une voile pour en hisser une autre me fait penser à un automobiliste ou à un cycliste qui s'arrêterait pour changer la dimension de ses roues au pied d'une colline, puis ferait l'opération inverse une fois parvenu au sommet. Avant les dérailleurs, les cyclistes du tour de France retournaient en haut des côtes leur roue pour changer de pignon. Seul le foc à enrouleur, suffisamment rapide est comparable avec un changement de vitesse manuel sur une voiture ou sur une bicyclette. Les mâts qui soutiennent les voiles, les haubans et les barres de flèche qui maintiennent le mât, les centaines de mètres de cordages pour hisser les voiles, les incliner dans la bonne orientation par rapport au vent

et les abaisser, les poulies, les taquets, les ridoirs, les guides de drisse, les espars et tout ce qui se trouve sur le pont ne servent à ajuster que deux et seulement deux misérables paramètres : l'aire et l'angle de la voilure. En outre, les voiles étant habituellement montées de sorte que leurs points de pivotement soient aussi loin que possible du centre de force, il faut, pour les régler, disposer de winches coûteux et de muscles de rugbyman. Ajoutez à cela les centaines de termes nautiques et les dizaines de nœuds qu'il faut connaître et vous aurez une idée de l'esprit tordu qu'il faut pour jouir du plaisir d'être poussé par le vent.

Vous pouvez donc imaginer le malaise qu'a dû éprouver l'establishment, soucieux de ses intérêts financiers, en apprenant soudainement qu'un petit malin mettait sur le marché un engin à voiles baptisé *Blue Nova* (voir la photographie en première page de l'article), capable de traverser les océans. Ce trimaran atteint des vitesses doubles des embarcations de même gabarit, dans des conditions de stabilité telles que votre apéritif ne verse pas, et peut être tout aussi vite démarré ou stoppé que son moteur. Rien de surprenant donc à ce que l'influente revue britannique *Yachting World* ait contesté avec une hargne particulière les performances du trimaran révolutionnaire. À tort : au terme d'un long procès en diffamation qui fut une victoire inhabituelle du droit sur l'argent et l'establishment, la Société *Walker Wingsail* reçut de la Cour suprême britannique un dédommagement d'un million et demi de livres.

Les voiliers traditionnels ont le pittoresque des moulins à vent hollandais, mais, si vous voulez utiliser sérieusement et en toute sécurité la force du vent pour faire avancer une embarcation sur l'eau, vous devez transformer les moulins à vent en éolienne moderne. Dans son roman pour enfants *Wind in the Willows*, Kenneth Grahame fait dire à M. Mole que rien, absolument rien, n'est aussi agréable que de s'affairer autour d'un bateau. Je ne saurais être davantage d'accord, mais je suis cependant convaincu que la conception de la plupart des navires ouvre des perspectives de plus grande envergure.

Stabilité, sécurité, innovation

Lorsqu'un voilier remonte au vent, il subit une énorme force latérale engendrée par l'airfoil. Nous avons vu également que la dérive latérale due à cette force est contrebalancée par l'action d'un hydrofoil situé sous la ligne de flottaison, mais qu'étant donné la distance entre ces deux objets un couple important tend à incliner le voilier dans le sens du vent.

Une façon de contrer ce moment consiste à se pencher de l'autre côté, ce qui est considéré par nombre de marins comme une énorme source de sensations, une particularité intrinsèque et essentielle de la navigation à la voile. Pour les bateaux plus gros, la solution traditionnellement adoptée en Occident consistait à fixer un énorme poids à la base de la quille, qui se transformait



c blanc situé à l'arrière de l'aile, fonctionnant comme un gouvernail de profondeur d'un avion, permet d'ajuster l'angle au vent de l'aile principale. Zefyr (d) est la dernière version monoplan de Walker Wing-



d sail. Cette vue d'avion de Zefyr permet de voir les panneaux solaires installés à l'avant de son aile. Ils alimentent en énergie l'ordinateur de bord et le petit moteur qui détermine l'orientation de la dérive.

alors en pierre tombale lorsqu'une voie d'eau perçait la coque. Outre cette diminution de la sécurité, les performances du navire étaient limitées par la longueur de la carène (en vertu de la loi de Froude) : dépasser la vitesse de vague équivalait à courir avec un boulet attaché à la cheville.

Mais le pire est que, contrairement au lest humain (ou tout autre lest mobile) capable de fournir un (contre) moment de gîte même lorsque le navire est horizontal, l'action du poids fixé à la base du navire n'est proportionnelle qu'au sinus de l'angle de gîte. Aussi le bateau navigue-t-il dans une position artificielle hautement inconfortable pendant des jours, voire des semaines.

En revanche, les embarcations polynésiennes et mélanésiennes, grandes ou petites, qui utilisent des balanciers ou des doubles coques pour assurer leur stabilité, restent horizontales et sont insubmersibles. Durant des siècles, elles ont permis d'accomplir de vastes périples. On reconnaît, parfois avec beaucoup de réticences, que ces précurseurs des multicoques actuels présentent à de nombreux égards des qualités de navigation supérieures.

Une bien meilleure manière de contrecarrer le moment de gîte exercé par la voile serait d'engendrer un tel moment à l'aide d'un hydrofoil convenablement incliné et décalé par rapport à l'axe longitudinal de rotation du navire. Cet équilibre est réalisable même pour un angle de gîte nul et peut être ajusté pour suivre les variations de la vitesse du vent qui affectent à la fois la

vitesse du bateau et le moment de gîte. Les hydrofoils multicoques sont habituellement conçus de cette manière, ce qui leur permet d'atteindre en toute sécurité des vitesses fantastiques tout en gardant leur quille verticale!

Nous avons mentionné qu'il faut du vent pour extraire de l'énergie du mouvement relatif de l'air et de l'eau. Le vent est la seule chose qui soit imposée ; le choix de la forme des voiles ou du navire, autrement dit des portions situées au-dessus et en dessous de la ligne de flottaison, ne dépend que de l'inventivité du concepteur. Un certain nombre d'expériences dans le domaine des vaisseaux à voiles futuristes ont déjà été effectuées. Nous allons les évoquer en conclusion.

La gîte d'un voilier tient en général au fait que la voile est fixée sur le mât, lui-même rigidement fixé au bateau. On peut assouplir cette contrainte et transformer la voile en un cerf-volant relié au navire par de simples cordages en un point situé légèrement au-dessus de la ligne de flottaison. Il n'y a alors plus de mât tiré sur le côté et responsable de la gîte. Cette forme de navigation à voile est utilisée par exemple lorsqu'une personne chaussée de skis nautiques tient un énorme cerf-volant dont elle contrôle la position à l'aide d'un cordage. Un tel dispositif, baptisé KITESKI, permet d'atteindre des vitesses supérieures à 72 kilomètres/heure sous fort vent. La figure 6 montre les diverses forces en action sur ce système lorsque les skis ont une vitesse d'environ 90 kilomètres/heure.

Le lien avec l'eau n'est pas nécessairement un corps glissant à sa surface, comme des skis ou des coques, mais pourrait être un sous-marin guère plus soumis à la résistance de vague que les dauphins ou les requins. Le marin ou le pilote se trouverait dans le sous-marin. Dans une option plus intéressante encore, le pilote est suspendu à un cerf-volant, ou monté à bord d'un ballon ou d'un objet volant analogue, relié à une sorte d'ancre traînant dans l'eau à l'extrémité d'un câble. Didier Costes a déposé plusieurs brevets sur de tels dispositifs baptisés *Chiens de mer*. Un aviateur survolant une masse d'eau et contraint de quitter son avion en sautant en parachute pourrait larguer un tel dispositif au bout d'une corde avant d'atteindre la surface de l'eau et utiliser la force exercée par le vent sur son parachute pour se maintenir hors de l'eau. En outre, cet «aquaviateur» pourrait, en contrôlant le dispositif au dessus de lui et celui en dessous, se diriger vers un lieu où il pourrait atterrir.

Nombre de telles innovations sont actuellement au même stade que l'étaient, il y a quelques dizaines d'années, les multicoques, les hydrofoils et les ailes. Grâce à notre imagination féconde nous pouvons rêver d'un avenir prometteur.

V. RADHAKRISHNAN est Directeur Emeritus du Raman Research Institute à Bangalore.

Les ordinateurs passeront l'an 2000

PETER DE JAGER

De nombreux informaticiens avaient négligé le changement prochain de millénaire : ils n'ont utilisé que les deux derniers chiffres pour indiquer les années. Les corrections qui s'imposent aujourd'hui sont les plus longues et les plus coûteuses de l'histoire de l'informatique.



Dans *Alice au pays des merveilles*, le Chapelier fou demande : «Votre montre vous indique-t-elle quelle année nous sommes?» Alice répond : «Bien sûr que non, mais c'est parce que nous restons très longtemps la même année.» Les informaticiens ont longtemps raisonné comme Alice : pourquoi les dates dans les ordinateurs et dans les programmes indiqueraient-elles le siècle où nous sommes, alors que nous restons si longtemps dans le même siècle? Ils ont donc représenté les années avec deux

chiffres seulement : 55 pour 1955, et 23/10/76 pour le 23 octobre 1976.

Il y a quelques décennies, ils avaient d'excellentes raisons pour procéder ainsi : les ressources informatiques étaient restreintes, la mémoire des ordinateurs coûtait cher, les données étaient enregistrées sur des cartes perforées à 80 colonnes seulement, et la saisie des dates avec deux chiffres en moins faisait gagner du temps. L'absence de normes a favorisé la pérennisation de cette pratique même quand les ressources informatiques sont devenues pléthoriques, car nous avons été nombreux à croire (à tort) que les programmes que nous écrivions seraient hors d'usage bien avant le nouveau millénaire.

Le «bogue de l'an 2000» est directement imputable à cette négligence. Les ordinateurs sont aujourd'hui truffés de représentations ambiguës de dates. Comment sauront-ils si 00 signifie 1900 ou 2000? La confusion a déjà provoqué des erreurs. En 1993, la Société *Boeing* en a relevées dans un programme qui traite des commandes dont le délai d'exécution est de sept ans. Un programme de la Société *Amway*, qui fabrique du savon et des produits d'hygiène, a rejeté des matières premières qu'il considérait, à tort, comme périmées depuis presque un siècle. Des caisses enregistreuses se sont bloquées lorsque des clients ont utilisé leur carte de crédit, dont la durée de validité expirait en 00. Selon une étude effectuée il y a un an, plus de 40 pour cent des sociétés ont déjà souffert au moins une fois du bogue de l'an 2000.

Comment ces problèmes apparaissent-ils? Supposons un dépôt sur un compte d'épargne effectué en 1999, et un retrait en 2000. Si le programme qui gère les comptes de la banque calcule les intérêts acquis en soustrayant 99 de 00, l'ordinateur considère que la durée de dépôt est de -99 ans.

D'autres erreurs sont plus graves : les compagnies d'assurances doivent archiver les contrats annuels qui n'ont pas été consultés depuis plus de cinq ans. Pour identifier les polices inutiles, certaines utilisent des programmes qui se fondent sur la dernière date à laquelle elles ont été consultées : on ajoute cinq aux deux chiffres de l'année et, si le résultat est inférieur à l'année en cours, on archive le contrat. Ainsi, si le dernier accès date de 1993, 93 plus 5 est inférieur à 99, et le contrat est archivé. Toutefois, si le dernier accès date de 1996, le programme calcule 96 plus 5, soit 01, qui est inférieur à 99 : le contrat est indûment archivé. De telles erreurs semblent caricaturales, mais elles se sont déjà produites.

Le bogue de l'an 2000 peut aussi avoir des conséquences fatales. Si un médecin code par deux chiffres seulement l'année de naissance d'un enfant dans un programme qui détermine le dosage de médicaments, il risque d'administrer une dose recommandée pour un centenaire, probablement mortelle pour le nourrisson.

Voilà l'essence du bogue de l'an 2000 : on a mal codé les années, et les problèmes commencent à surgir dans tous les domaines. De nombreuses entreprises ont simplement

Quelques erreurs qui se sont déjà produites

La Société d'assurance-vie *Unum* a perdu 700 enregistrements d'une base de données de ses courtiers, parce qu'un ordinateur a confondu 00 et 1900.

Une centenaire, Mary Bandar, a reçu une convocation de la maternelle de Winona, au Minnesota.

En 1993, la Société *Boeing* a subi les conséquences d'une erreur dans un système de gestion des commandes : celles qui étaient planifiées sept ans à l'avance n'étaient pas enregistrées.

Dans une usine de la Société *Amway*, un système informatique commandant le mélange de produits chimiques a rejeté un lot de composés parce qu'il considérait que la date de péremption était 1900.



remplacé les programmes défectueux par d'autres où le codage a été amélioré, mais, pour les systèmes qui contiennent des puces électroniques (voir l'encadré de la page 82), cette stratégie a parfois été la seule possible. Mais remplacer les myriades de logiciels utilisés coûterait trop cher et prendrait trop de temps. Comment éviter les catastrophes?

2 + 2 = 4

La solution la plus évidente est l'ajout des deux chiffres manquants. Toutefois, sans parler de la difficulté technique du remplacement de milliards de données dans les fichiers des sociétés multinationales, la mise en œuvre de cette solution nécessite une reconnaissance des dates. Cette difficulté est considérable : avant d'ajouter deux chiffres aux années, on doit d'abord repérer les chiffres qui indiquent une date. Or les ordinateurs ne savent pas quelle information représentent les chiffres qu'ils enregistrent. La signification des données est attribuée par les humains et n'est compréhensible que d'eux. Les programmeurs n'ont pas suivi de normes lorsqu'ils ont créé les noms identifiant les dates : ceux-ci sont explicites, tels DATE_DE_NAISSANCE

ou DATE_DEBUT_EMPLOI, ou non, tels SNARK ou WUMPUS.

On ne peut pas non plus se fier totalement à l'information numérique. L'une des méthodes consiste à passer au crible les données et à choisir les triplets de colonnes avec des valeurs comprises entre 1 et 31, puis entre 1 et 12, puis entre 0 et 99 : on suppose que la dernière colonne contient une indication d'année. Malheureusement, cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée. Les valeurs comprises entre 0 et 99 peuvent représenter des

pourcentages. En outre, les deux derniers chiffres des années sont souvent noyés dans d'autres données, par exemple dans de longs numéros de série.

Des informaticiens ont mis au point des programmes de recherche automatique des dates. Parmi les plus perfectionnés, certains utilisent un raisonnement déductif et atteignent des pourcentages de réussite étonnants, mais ils commettent tous quelques erreurs.

En outre, le dépistage des dates n'est que la première étape de la correction.



L'extension des années à quatre chiffres oblige les programmeurs à refaire la mise en page des rapports, des formulaires ou des affichages d'écran. En outre, les logiciels qui utilisent les données des programmes corrigés doivent aussi être modifiés, même s'ils ne contiennent pas de dates. Ainsi, dans une base de données d'une entreprise où les noms des employés sont enregistrés dans les colonnes 1 à 30, leurs dates de naissance dans les colonnes 31 à 36, les salaires dans les colonnes 37 à

42, et ainsi de suite, si on allonge les dates de naissance pour loger les quatre chiffres des années, les informations relatives aux salaires et toutes les données suivantes seront décalées de deux colonnes vers la droite. On devra donc modifier tous les programmes qui récupèrent ces informations.

Les évolutions rapides de l'informatique compliquent aussi l'ajout des deux premiers chiffres aux années. Les programmeurs travaillent, en général, sur le «code source» des programmes,

qu'ils écrivent dans des langages relativement compréhensibles, tels le COBOL et le langage C. Le code source est ensuite traduit, par un programme nommé compilateur, sous une forme purement numérique, nommée module objet, que l'ordinateur exécute. Or, les compilateurs évoluent rapidement, et des techniques de programmation acceptées par un compilateur d'il y a quelques années peuvent être rejetées par les compilateurs d'aujourd'hui : d'anciens codes sources corrigés ne sont plus compilés correctement en un nouveau module objet, à moins d'être modifiés encore plus profondément.

Pis encore, de nombreuses entreprises ont perdu des parties de leurs codes sources. Bien que le volume de programme perdu reste en général inférieur à trois ou quatre pour cent, l'absence de cette partie est parfois très gênante, car elle impose la modification fastidieuse des modules objets. Les programmeurs doivent alors recréer le code source, soit à partir de documents de travail (mais la documentation manque souvent), soit à partir du module objet (un travail comparable à la reconstitution d'un cochon à partir d'une saucisse).

Enfin, lorsque le code source a été modifié et recompilé, on doit le tester à nouveau. Les révisions de logiciels introduisant presque toujours de nouveaux bogues, la vérification des programmes modifiés constitue aujourd'hui le plus gros du travail de leur mise en conformité.

Au début des années 1990, l'extension des années à quatre chiffres semblait être la meilleure solution contre le bogue de l'an 2000, mais la nécessité de recompiler tout programme qui se réfère à une date dans un fichier quelconque, même s'il ne réalise pas de calcul de dates, a rendu cette méthode trop onéreuse et trop longue pour la plupart des entreprises (cette modification reporte en outre le problème à l'an 10 000, mais cette fois nous avons le temps).

Une fenêtre pour l'avenir

Une autre solution consiste à enseigner aux ordinateurs que, lorsqu'une valeur désigne une année, 00 signifie 2000. Les programmeurs ont mis en œuvre cette idée par une technique nommée fenêtrage. Ils séparent les nombres de 00 à 99 en deux groupes, de part et d'autre d'un nombre pivot : les années dont les deux derniers chiffres sont

Le contentieux

Des caisses enregistreuses informatisées d'un hypermarché du Michigan tombaient en panne lorsque des clients utilisaient une carte de crédit qui expirait en 00. L'hypermarché a intenté un procès au fabricant des caisses.



PI DESI SYRRE

1. LES PROGRAMMEURS s'activent pour corriger les problèmes du bogue de l'an 2000. Dans cette «usine» informatique de Caroline du Nord, plus de 250 informaticiens corrigent des millions de lignes de programmes chaque mois. La majeure partie de ce travail concerne les 500 entreprises les plus riches des États-Unis.

supérieurs ou égaux à ce pivot sont attribuées au siècle en cours (si le pivot est 45, par exemple, 68 devient ainsi 1968) ; les autres années sont attribuées au XXI^e siècle (13 devient 2013).

Pour appliquer cette technique, on doit d'abord chercher dans le code source tous les calculs qui utilisent des dates, puis les modifier convenablement. Les données n'étant pas modifiées, le fenêtrage nécessite moins de travail que l'extension à quatre chiffres ; c'est aujourd'hui la technique la plus utilisée.

Le fenêtrage a toutefois des inconvénients. Il est évidemment inapplicable pour les données qui s'étendent sur plus de 100 ans, telles les dates de naissance et les baux de longue durée. En outre, le choix de pivots différents pour deux programmes qui échangent des informations est source d'erreur. Ainsi, 25 peut être un bon pivot pour un programme qui traite les factures d'une société fondée en 1928, tandis que le programme qui gère les projections des ventes à long terme dans la même société pourrait utiliser un pivot de 70 : si ces deux programmes communiquent, l'année 2031 risque de devenir 1931, ou *vice versa*, ce qui peut perturber les calculs.

Pour compliquer les choses, les programmeurs ont aussi depuis longtemps utilisé des fenêtres déplaçables, c'est-à-dire des pivots qui changent en fonction du temps. Cette stratégie est valable pour certains types de programmes, tels ceux qui traitent les hypothèques de 30 ans sur l'immobilier. Pour de telles applications, le pivot pourrait être fixé à 40 ans à compter de l'année en cours. Manifestement, il est impératif de conserver une trace des pivots déplaçables, afin d'éviter tout éventuel conflit avec d'autres systèmes. En outre, les programmeurs doivent tenir compte du fait que la représentation de l'année 1968 dans un programme avec un pivot de 70 nécessitera une adaptation supplémentaire du logiciel (car 68 signifie 2068 dans ce cas).

Les cycles du calendrier

Une troisième technique de résolution du bogue de l'an 2000 utilise l'arithmétique élémentaire. Considérons le calcul $00 - 99 = -99$. Si l'opération représentait 2000-1999, alors la réponse -99 serait fautive. Toutefois, $00 - 99$ est équivalent à $(00 + 7) - (99 + 7)$. Si cette expression est calculée avec des nombres à deux chiffres, elle donnera

$5 - 4 = 1$. Ainsi l'ajout de 7 à 00 et à 99 décale les deux dates dans le même siècle, de sorte que le calcul 2000 - 1999 peut s'effectuer correctement sur deux chiffres seulement.

Cependant, les dates sont plus que de simples nombres. Le 1^{er} janvier 2000 est un samedi, mais pas le 1^{er} janvier 2007. La solution consistant à ajouter 7 à toutes les années n'est pas admissible pour les programmes qui distinguent les différents jours de la semaine : on doit affiner la méthode. Comme une année normale a 365 jours, et que 364 est un multiple de sept, le jour de la semaine auquel tombe une date donnée se décale d'un jour par an, sauf en cas d'année bissextile ; sans ces dernières, on retrouverait les mêmes dates aux mêmes jours tous les sept ans. Comme la périodicité des années bissextiles est de quatre ans, le cycle est en fait de 28 ans (et, heureusement, 2000 est aussi une année bissextile, contrairement à 1900, 1800 et 1700, qui ne l'étaient pas) : le 1^{er} janvier 2000 sera donc un samedi, comme l'était le 1^{er} janvier 1972 et comme

D'autres dates à problème

Le 22 août 1999, le système de positionnement par satellite (GPS) reviendra à la semaine 0 après 1 023 semaines de fonctionnement.

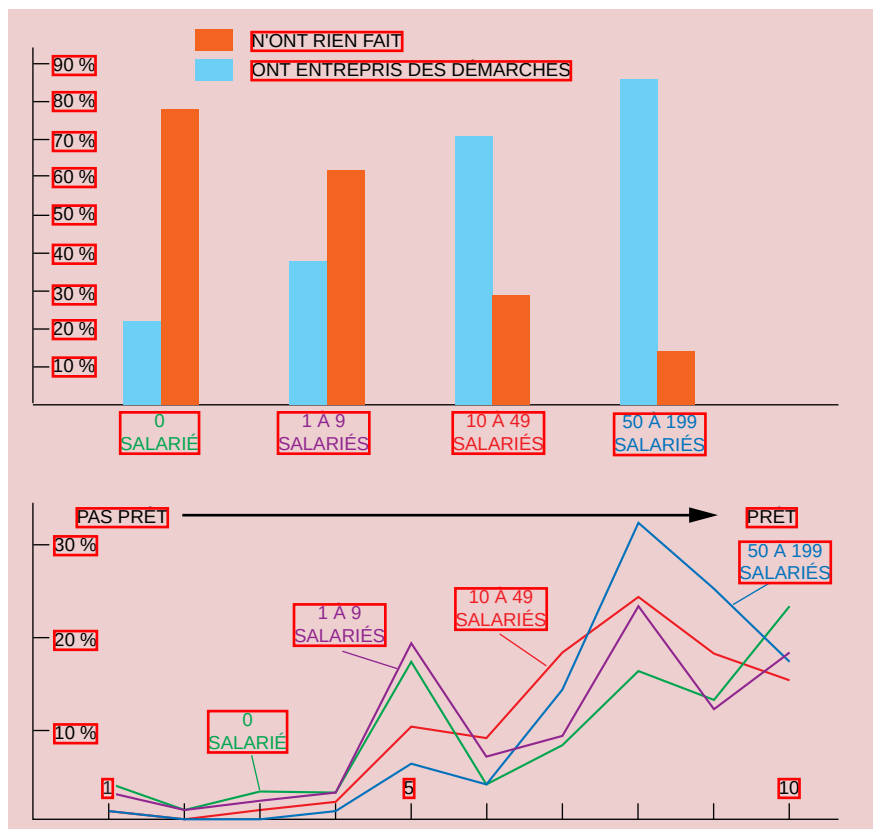
Le 19 janvier 2038, les systèmes Unix se dérègleront, car on sera 2³¹ secondes après leur date de mise en service, le 1^{er} janvier 1970.

Le 6 février 2040, les anciens ordinateurs *Macintosh* reviendront à la date du 1^{er} janvier 1904, soit 2³² secondes en arrière.



le sera le 1^{er} janvier 2028. Dans la technique dite d'«encapsulation», on ajoute donc 28 aux deux derniers chiffres des années avant de procéder à des calculs ; puis, une fois les calculs effectués, on retranche 28.

Bien que l'encapsulation résolve de nombreux problèmes, son emploi est compliqué dans certains calculs. Ainsi, quand un programme fonctionne en



2. LA PRÉPARATION DES PETITES ET MOYENNES ENTREPRISES FRANÇAISES pour le passage à l'an 2000 a été évaluée en décembre 1998 par l'IFOP pour le ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. Les plus grosses entreprises sont celles qui ont le plus souvent entrepris des démarches pour adapter leurs systèmes techniques et informatiques (*en haut*). En revanche, toutes tailles confondues, ces entreprises estiment majoritairement qu'elles seront plutôt prêtes (*en bas, on leur a demandé de se noter de un à dix, de pas prête du tout à complètement prête*). Leurs dirigeants restent lucides : très peu osent affirmer qu'ils passeront l'an 2000 sans dommages.

Le bogue au Japon

Le Japon a été critiqué pour son inaction face au problème de l'an 2000.

Il a pourtant des raisons d'être serein : de nombreuses entreprises utilisent le système impérial des dates de l'ère Heisei, dans laquelle 1999 est Heisei 11.



parallèle avec d'autres et qu'il envoie des informations pendant ses propres calculs (comme dans l'exemple du programme de projection des ventes, qui utilise des informations d'un programme de facturation), les résultats sont parfois combinés et recombinaison à différents intervalles, d'où la nécessité pour les programmeurs de déterminer quand il faut ajouter et soustraire 28, et d'en garder les traces.

En outre, l'encapsulation ne fonctionne pas quand les dates sont associées à d'autres valeurs. Ce cas se rencontre notamment dans les fichiers de numéros de série de produits : dans 7289-47-99-5, par exemple, 99 est l'année de péremption, et le dernier chiffre, 5 est le dernier chiffre de la somme de 7289, de 47 et de 99 ; il sert à vérifier l'ensemble de la séquence. De tels chiffres de «contrôle» sont souvent utilisés pour la vérification des cartes de crédit, des codes-barres et des numéros de Sécurité sociale. L'ajout de 28 aux deux chiffres de l'année empêcherait une telle validation des calculs.

Les trois techniques d'extension des dates, de fenêtrage et d'encapsulation ont résolu plus de 95 pour cent des bogues de l'an 2000 dans les logiciels existants. De nombreuses grandes entreprises, qui utilisent des milliers de

programmes informatiques, ont appliqué des solutions mixtes. Les informaticiens ont employé des outils informatiques pour automatiser les trois solutions, mais des erreurs subsistent.

Il est piquant de constater que la prise en compte du changement de siècle par certains logiciels bien faits complique les corrections du bogue de l'an 2000 ! Les programmeurs ont utilisé leurs propres techniques de fenêtrage ou d'encapsulation pour anticiper le changement de siècle. Si l'on corrige automatiquement ces logiciels, on introduira des erreurs, des doubles fenêtrages, des additions d'années pivots, ou des combinaisons d'encapsulation et de fenêtrage sur les mêmes données.

La détection de ces programmes, ou de ces morceaux de programmes, déjà corrigés peut être difficile, notamment si le code source est écrit de façon

Des problèmes enfouis partout

Dans certains appareils de radiothérapie, une puce informatique déterminait la dose à administrer au patient en calculant la décroissance d'activité des radioéléments au cours du temps. Comme les calculs étaient faits sur les deux derniers chiffres des années, l'appareil ne calculait pas correctement la radioactivité des échantillons après l'an 2000. Heureusement, le fabricant s'est rendu compte du problème et a contacté ses clients pour retirer le produit.

Le bogue de l'an 2000 menace surtout les puces préprogrammées qui ont été intégrées dans divers équipements électroniques, notamment des machines industrielles, des appareils de surveillance, des feux de circulation, des alarmes, des outils de navigation et d'innombrables produits de consommation (horloges pour automobiles, montres, magnétoscopes, fours à micro-ondes). Le Groupe Gardner, une société américaine de conseil, estime que 32 à 40 milliards de telles puces équipent les usines, les sociétés et les foyers du monde entier.

Bien sûr, beaucoup de systèmes fonctionnent indépendamment de la date, et ils ne pâtiront pas du changement d'année, et même ceux qui ont besoin de la date ne seront pas tous en panne. Néanmoins, ce faible pourcentage représente tout de même quelques millions de systèmes.

La prévision du nombre exact d'appareils menacés est difficile parce que même les ingénieurs expérimentés savent mal prévoir les pannes des systèmes intégrés. Des équipements qui *a priori* ne semblent pas dépendre de la date pour fonctionner sont parfois sensibles au problème : un appareil pourrait, pour des raisons de sécurité, cesser de fonctionner le 1^{er} janvier 2000, parce que la dernière inspection semble, par erreur, dater de près d'un siècle. Dans un système de surveillance qui signale les situations d'urgence, des messages critiques datés 00 pourraient être ignorés et éliminés de l'écran de surveillance par des messages «plus récents» datés de 99.

Les ordinateurs personnels sont parmi les produits les plus faciles à corriger. La plupart de ceux qui ont été achetés avant 1996 ne posent pas de problème : le 1^{er} janvier 2000, beaucoup repasseront automatiquement en 1980, date de réinitialisation. Des logiciels corrigent ce défaut.

Malheureusement, d'autres corrections ne sont pas aussi simples. Un grand nombre de sociétés qui ont fabriqué des systèmes intégrés ne sont plus en activité ou, si elles le sont toujours, les concepteurs des produits défectueux sont partis, et la documentation correspondante manque, ou est incomplète. De surcroît, certains systèmes bogués ont été installés sur des sites d'accès difficile, telles des plates-formes pétrolières en mer.

La solution la plus simple est le remplacement des puces fautives et, notamment, des horloges (qui conservent l'heure en mémoire à l'aide d'un oscillateur à quartz), des microprocesseurs et des contrôleurs (qui pilotent les systèmes). Parfois on peut retirer certains composants des cartes mères et y insérer les nouveaux composants où sont implantés les logiciels révisés. Très souvent, toutefois, on doit remplacer la totalité de la pièce.



Kenneth Kizer, du Service de santé des anciens combattants américains, a alerté le Congrès des États-Unis en juillet 1998 : en raison du bogue de l'an 2000, certains matériels médicaux, notamment des défibrillateurs cardiaques, ne fonctionneront pas correctement.

peu explicite et avec peu de commentaires. On peut passer des heures à chercher ce qu'un programme d'une dizaine de lignes de code seulement est censé accomplir. Des programmes de correction automatiques risquent de supprimer aveuglément des morceaux de code, sans chercher à comprendre leur utilité.

D'autres sources de confusion compliquent le problème. Ainsi les programmeurs utilisent souvent 99 ou d'autres nombres plus grands écrits seulement avec des 9 pour marquer la fin d'un fichier ou d'un enregistrement destiné à être effacé ou archivé. Un programme de recherche des dates risque de confondre avec 1999, septembre 1999, etc. Par exemple, j'ai vu des logiciels de saisie de commande qui invitaient le vendeur à entrer 99 dans la case réservée à l'année pour effacer la commande client correspondante : de tels programmes doivent maintenant être réécrits.

Les années bissextiles compliquent aussi la tâche des informaticiens. La Terre tournant autour du Soleil en un peu moins de 365,25 jours (le chiffre exact est 365,242199), les années bissextiles ne suivent pas exactement un cycle de quatre ans : le calendrier prévoit ainsi que les années multiples de 100, telles 1700 et 1800, ne soient pas bissextiles, sauf celles qui sont divisibles par 400. Ainsi, il y aura un 29 février en 2000 (même s'il n'y en avait pas en 1900), ce qui compliquera d'autant la situation pour les programmes qui ne tiennent pas compte de ce fait.

Tous n'en mourront pas, mais tous seront frappés

La situation est si variée que l'inquiétude règne. Les experts débattent, et le public doute. Au cours d'une récente conférence, un intervenant affirmait que « nous perdrons peut-être la capacité de produire du courant électrique à tout jamais ». D'autres pensent que le bogue de l'an 2000 est un problème que l'on aura résolu en un week-end.

Le bogue et la finance

Anticipant sur les réserves d'argent liquide que fera la population, le conseil de la Réserve fédérale américaine a prévu d'augmenter de 50 milliards de dollars le volume de monnaie en circulation.



Le bogue de l'an 2000 aux États-Unis

	Situation favorable	Situation attendue	Situation défavorable
Logiciels ayant des problèmes de passage à l'an 2000	10 millions	12 millions	15 millions
Pourcentage de problèmes liés à l'an 2000 qui ne seront pas résolus à temps	5 %	15 %	25 %
Incidents liés au passage à l'an 2000			
Énergie	5 %	15 %	75 %
Transports	5 %	12 %	50 %
Téléphone	5 %	15 %	65 %

Brian Christie, données Software Productivity Research/Management Systems

Ces deux opinions sont naïves. La première ignore la capacité d'adaptation des individus et des sociétés. Elle ignore que les organisations et les institutions financières ont déjà préparé efficacement l'arrivée du 1^{er} janvier 2000. Pendant l'été 1998, la Bourse de New York a simulé son état au 3 janvier 2000 et n'a détecté que des problèmes mineurs. Des tests complémentaires sont prévus pour le printemps 1999.

Inversement, ceux qui dédaignent le problème ignorent la vulnérabilité technique de certains équipements. Dans les gros systèmes fortement connectés, des pannes isolées peuvent rapidement se propager et engendrer des catastrophes. Au printemps 1998, une panne du satellite de communication *Galaxy IV* a ainsi mis hors service des millions d'appareils de radiomessagerie. De même, la rupture d'un câble à Auckland, en Nouvelle-Zélande, a suffi pour provoquer une surcharge du système et priver la ville de courant électrique pendant six semaines.

Contrairement à ces événements inattendus, le bogue de l'an 2000 est prévu. À ce jour, les informaticiens du monde entier modifient la plupart des logiciels existants. À la banque canadienne *CIBC*, 1 000 personnes travaillent sur le projet (le budget atteint 120 millions d'euros). De même, la Société *AT&T* a déjà dépensé plus de 500 millions d'euros pour lutter contre le bogue, et la Société *Citicorp* va en déboursier 650 millions.

Les efforts sont considérables, mais on sait bien que la plupart des grands projets informatiques ne sont pas terminés dans les délais et que, parmi les programmes qui seront rectifiés à

temps, peu fonctionneront parfaitement. N'oublions pas les débâcles informatiques du passé, notamment les Jeux olympiques d'Atlanta ou l'ouverture de l'aéroport international de Denver. Les installations de systèmes informatiques complexes exempts d'erreurs et prêts à temps sont rares. Or l'an 2000 surviendra, que les travaux soient achevés ou non.

Si l'on tient compte notamment de la quantité de travail déjà effectuée, ainsi que des mesures d'urgence qui seront prises, on prévoit de graves perturbations pendant environ un mois. Des problèmes variés, de la simple contrariété à des ennuis plus graves, continueront à surgir tout au long de l'année 2000.

Peter de JAGER est consultant en informatique.

Leon KAPPELMAN, *Year 2000 Problem : Strategies and Solutions from the Fortune 100*, International Thomson Computer Press, 1997.

W. ULRICH et I. HAYES, *The Year 2000 Software Crisis: Challenge of the Century*, Prentice Hall, 1997.

Peter de JAGER et Richard BERGEON, *Countdown Y2K : Business Survival Planning for the Year 2000*, John Wiley & Sons, 1998.

Howard RUBIN et Brian ROBBINS, *Evaluating Success of a Y2000 Project*, Economics Press, 1998.

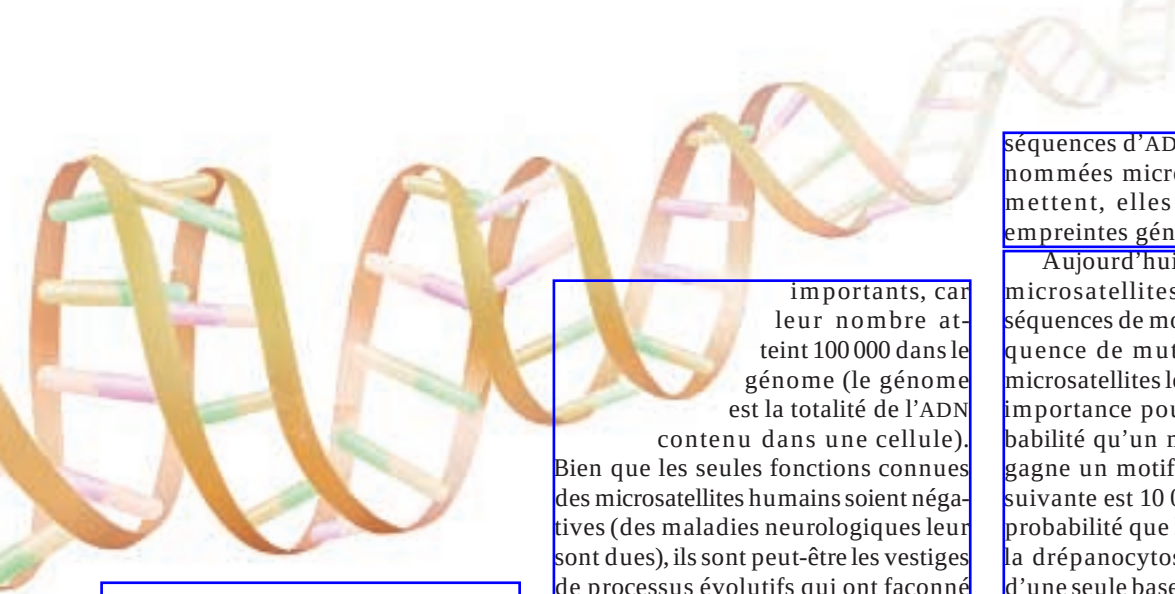
Michael D. SCOTT et Warren S. REID, *Year 2000 Computer Crisis : Law, Business, Technology*, Glasser LegalWorks, 1998.

Capers JONES, *The Year 2000 Software Problem : Quantifying the Costs and Assessing the Consequences*, Addison-Wesley, 1998.

ADN et évolution

RICHARD MOXON • CHRISTOPHER WILLS

*Des séquences répétées dans l'ADN
interviennent dans l'adaptation des bactéries
à leur environnement et, également,
dans l'apparition de maladies humaines.*



Le code génétique humain est porté par l'acide désoxyribonucléique, ou ADN : c'est une chaîne d'environ trois milliards de paires de groupes chimiques nommées bases. Ces dernières sont de quatre types : ce sont l'adénine (A), la cytosine (C), la guanine (G) et la thymine (T). Cependant, seulement 10 à 15 pour cent de ces bases constituent les séquences nommées gènes, que les cellules utilisent pour synthétiser des protéines. Certaines des séquences restantes gouvernent des fonctions essentielles, telles l'activation ou l'inhibition de gènes, ainsi que le maintien de la structure des chromosomes. À quoi sert tout le reste ?

Une partie est composée de régions étranges, connues sous le nom d'ADN satellite : ces « bégaiements génétiques » sont formés de la répétition d'une combinaison des quatre bases de l'ADN, par exemple ATTGAGTTGAGTTGAG... Ces dernières années, les généticiens ont découvert que les microsatellites, des satellites contenant les séquences répétées les plus courtes, ont un rôle important et de nombreuses fonctions : la nature répétitive des microsatellites les rend particulièrement sujets à des augmentations ou à des réductions de longueur qui ont parfois de lourdes conséquences pour l'organisme les possédant. Ainsi, chez certaines bactéries pathogènes, une variation du nombre de répétitions favorise l'apparition de nouvelles propriétés et la survie en cas de modifications de l'environnement. Chez l'être humain aussi, certains microsatellites ont certainement des effets

importants, car leur nombre atteint 100 000 dans le génome (le génome est la totalité de l'ADN contenu dans une cellule). Bien que les seules fonctions connues des microsatellites humains soient négatives (des maladies neurologiques leur sont dues), ils sont peut-être les vestiges de processus évolutifs qui ont façonné notre espèce.

Alors que certains cherchent pourquoi le génome humain contient autant de séquences répétées d'ADN, de nombreux biologistes espèrent utiliser des microsatellites pour diagnostiquer des maladies neurologiques et identifier les personnes à risque, ou pour dépister des cancers précoces : leur longueur varie très tôt au cours du développement de certains cancers (voir l'encadré de la page 88). De surcroît, la police scientifique utilise les variations interindividuelles de la longueur des microsatellites pour identifier les criminels et établir des paternités (voir l'encadré de la page 87).

L'ADN satellite a été identifié pour la première fois dans les années 1960, lorsque des biologistes ont observé qu'après centrifugation, dans certaines conditions, l'ADN en solution se sépare en deux ou plusieurs couches : une bande principale contenant les gènes ; des bandes secondaires, nommées satellites, composées de longues séquences d'ADN répété. En 1985, à l'Université de Leicester, Alec Jeffreys a découvert d'autres régions répétitives plus courtes, qu'il a nommées minisatellites. A. Jeffreys et ses collègues ont montré que la longueur de ces minisatellites est de 15 ou plus, et que le nombre de répétitions des divers minisatellites diffère selon les individus ; la technique d'identification des empreintes génétiques utilisée par la police et par les tribunaux est fondée sur cette découverte. À la fin des années 1980, diverses équipes ont isolé des satellites composés de répétitions de

séquences d'ADN encore plus courtes, nommées microsatellites, et qui permettent, elles aussi, d'établir des empreintes génétiques.

Aujourd'hui, on réserve le nom de microsatellites aux répétitions de séquences de moins de six bases. La fréquence de mutation très élevée des microsatellites leur confère une grande importance pour l'évolution. La probabilité qu'un microsatellite perde ou gagne un motif d'une génération à la suivante est 10 000 fois supérieure à la probabilité que le gène responsable de la drépanocytose subisse la mutation d'une seule base qui provoque la maladie (la drépanocytose, ou anémie falciforme, résulte de la modification de la structure de l'hémoglobine, qui fragilise les globules rouges). En outre, bien que la mutation de la drépanocytose se corrige rarement spontanément, les microsatellites retrouvent parfois leur longueur initiale en quelques générations seulement.

Des microbes «astucieux»

Le rôle des microsatellites en médecine fut découvert en 1986 : à l'Institut Max Planck de Tubingen, Thomas Meyer et ses collègues étudiaient *Neisseria gonorrhoeae*, la bactérie responsable de la blennorrhagie, une maladie sexuellement transmissible. Sur sa membrane externe, *Neisseria gonorrhoeae* possède des protéines, qui appartiennent à une famille de 12 membres, nommées protéines Opa en raison de l'opacité des colonies de bactéries qu'elles produisent ; elles sont codées par des gènes Opa. Grâce à ces protéines Opa, les bactéries adhèrent aux cellules épithéliales, telles celles qui tapissent les voies respiratoires, puis elles les infectent. Cependant, les protéines Opa permettent aussi aux cellules immunitaires de phagocyter les bactéries qu'elles portent. Les biologistes allemands découvrirent que chacun des gènes Opa contient un microsatellite composé de nombreuses copies du motif CTCTT.

La variation du nombre de répétitions du motif dans les microsatellites résulte des fréquentes erreurs de réplication de l'ADN et, particulièrement, de ce que l'on nomme le dérapage réplicatif. Avant de se diviser, une cellule duplique son ADN. Cette opération est complexe, car les échelons de l'échelle vrillée qui constitue l'ADN sont des paires de bases dont l'appariement est très spécifique : l'adénine s'apparie toujours

CE MICROSATELLITE (région plus foncée) est une séquence spécifique de l'ADN. Comme le reste de la molécule, elle est caractérisée par l'enchaînement de bases (CAAT représente la succession cytosine, adénine, adénine et thymine), mais elle contient cinq répétitions du même motif. Chaque séquence CAAT d'un brin est appariée avec une séquence complémentaire de GTA (guanine, thymine, thymine et adénine) sur le brin opposé. Les séquences répétées, ou motifs, des microsatellites peuvent contenir jusqu'à six bases, et chaque séquence peut être répétée un grand nombre de fois.

avec la thymine, et la cytosine toujours avec la guanine. Au cours de la réplication de l'ADN, l'échelle se fend en son milieu, séparant les bases de chaque paire, tandis que des enzymes nommées ADN polymérases fabriquent le complémentaire de chaque brin (voir l'encadré ci-dessous). À mesure que les deux

nouveaux brins sont synthétisés, ils s'apparient avec le brin dont ils sont complémentaires : deux molécules d'ADN identiques à la première sont ainsi fabriquées. Le dérapage répliatif se produit quand un de ces brins se décale et conduit les motifs répétés des microsatellites à s'apparier avec un autre motif

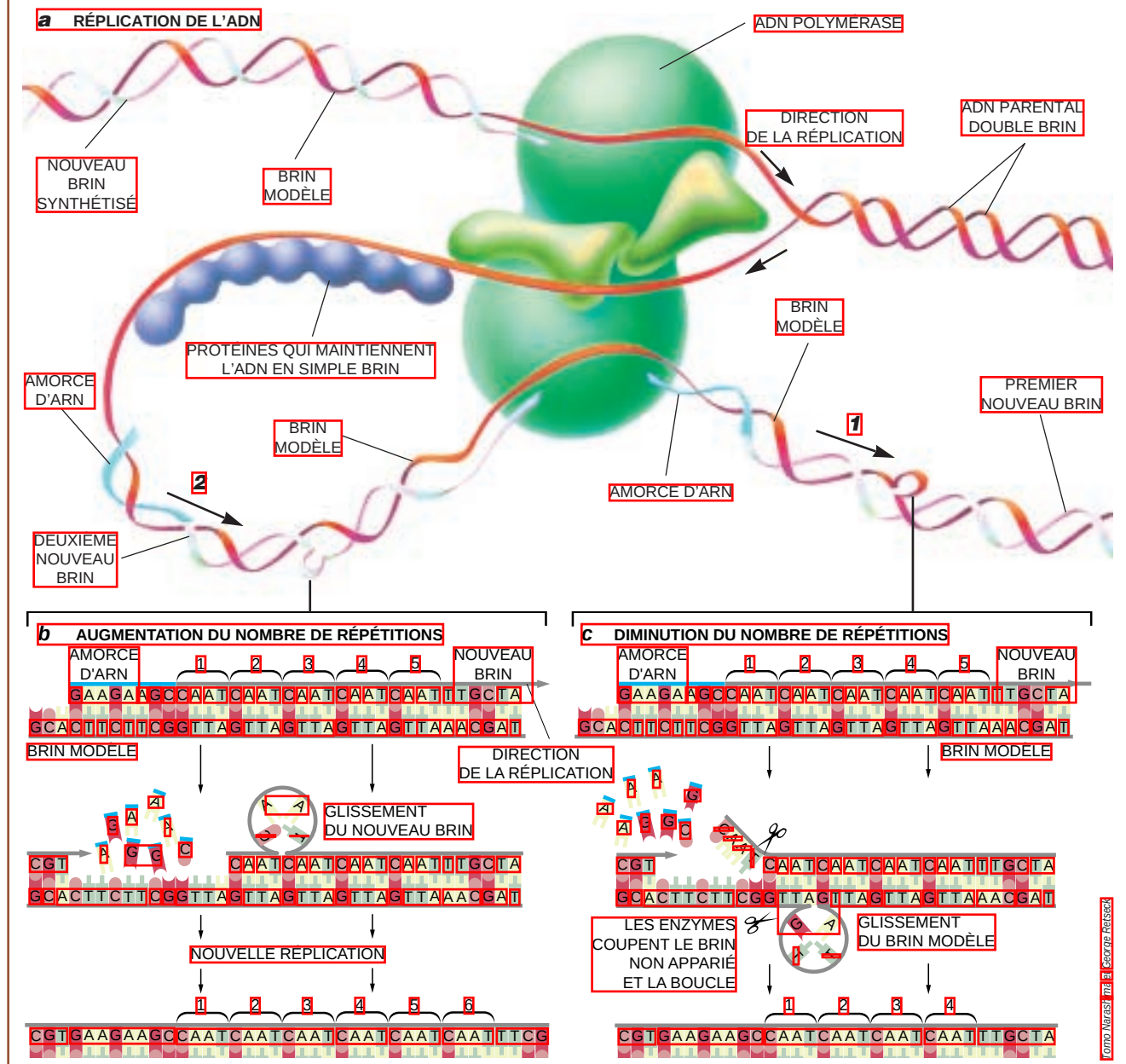
que celui qui a été copié : l'ADN polymérase ajoute, ou supprime, une ou plusieurs copies de la répétition sur le nouveau brin d'ADN.

Ces dérapages sont fréquents chez *Neisseria gonorrhoeae*. À chaque division, une cellule fille sur 100 à 1 000 porte une mutation qui modifie le

Le dérapage répliatif

Ce phénomène est une modification du nombre de répétitions d'un microsatellite lorsque la cellule duplique son ADN avant de se diviser. Pendant la réplication de l'ADN (a), les enzymes ADN polymérases séparent, puis copient les deux brins de l'hélice d'ADN parental. L'une des copies est faite par morceaux : une ADN polymérase synthétise un court morceau (1), commençant avec une amorce d'ARN, puis progresse pour produire un deuxième court morceau (2). Quand l'ADN polymérase a terminé le second morceau,

l'amorce d'ARN est enlevée, et les deux segments sont reliés. L'augmentation du nombre de répétitions d'un microsatellite se produit lorsque le nouveau brin se décale en arrière d'une répétition, lors de son appariement avec le brin matrice d'origine : l'ADN polymérase ajoute une répétition supplémentaire dans le brin en formation pour combler la lacune. Une diminution se produit lorsque le brin matrice se décale et entraîne les enzymes de réparation à couper une répétition.



nombre de répétitions *CTCTT*. Cette modification perturbe les gènes *Opa*, car l'information génétique est composée de «mots» de trois bases, nommés codons. Lors de la synthèse des protéines à partir des gènes, chaque codon stipule l'ajout d'un acide aminé spécifique à la chaîne protéique en croissance. Une augmentation ou une réduction du nombre de répétitions altère la signification des codons qui la suivent.

La délétion d'un motif *CTCTT* dans un gène *Opa* provoque la production d'une protéine plus courte, qui n'adhère plus aux cellules épithéliales ou immunitaires ; la bactérie porteuse de cette protéine raccourcie ne pénètre pas dans ces cellules. Cependant, des dérapages ultérieurs peuvent rétablir la séquence initiale du gène *Opa*, qui code alors pour une protéine à nouveau fonctionnelle.

Ce changement réversible a été découvert chez de nombreuses bactéries pathogènes. En activant ou en inhibant ses différents gènes *Opa* par des dérapages d'une génération à l'autre, *Neisseria gonorrhoeae* augmente ses chances de survie, car lorsque les bactéries envahissent un nouvel hôte, leurs capacités d'adhérence sont utiles, mais, à d'autres moments, l'absence d'interactions avec les cellules de l'hôte leur évite la destruction par les cellules immunitaires.

De telles variations des molécules de surface des bactéries ont également été bien étudiées chez la bactérie *Hemophilus influenzae*, dont les souches de type *b* sont la cause principale de la méningite bactérienne, infection cérébrale extrêmement grave (jusqu'à la découverte d'un vaccin, à la fin des années 1980, un enfant de moins de cinq ans sur 750 contractait une méningite à *Hemophilus influenzae*).

La membrane externe de cette bactérie est parsemée de lipides et de glucides liés en complexes nommés lipopolysaccharides. Grâce à certaines molécules, nommées phosphocholines, insérées dans les lipopolysaccharides, la bactérie *Hemophilus influenzae* adhère aux cellules humaines du nez et de la gorge, où elle se développe normalement sans provoquer de symptômes. Toutefois, au moins trois des gènes nécessaires à la production des lipopolysaccharides contiennent des microsatellites formés de la répétition de la séquence *CAAT*. La présence de phosphocholine dans les lipopolysaccharides d'*Hemophilus influenzae* dépend des modifications du nombre de répétitions de *CAAT* dans ces gènes.

À l'Université de Pennsylvanie, Jeffrey Weiser a montré que les souches d'*Hemophilus influenzae* qui ont de la phosphocholine dans leurs lipopolysaccharides (les souches ChoP+) colonisent mieux le nez et la gorge que les souches qui en sont dépourvues (souches ChoP-). En revanche, ces dernières résistent mieux à la destruction par les composants immunitaires du sang ou de la lymphe. Les bactéries passent d'un état à l'autre, selon qu'elles se développent sans perturbation dans les voies respiratoires, ou qu'elles se propagent vers d'autres sites par voie sanguine, où elles sont attaquées par le système immunitaire.

La plupart des bactéries *Hemophilus influenzae* présentes chez l'humain sont de souche ChoP+, sensibles à l'attaque immunitaire. Le dérapage réplicatif suscite inévitablement des variantes ChoP- qui, en général, ne persistent pas dans les voies respiratoires, car elles adhèrent moins aux cellules

de l'organisme qu'elles colonisent. Lors d'une infection virale de cet organisme, l'inflammation de la muqueuse nasale augmente l'exposition des bactéries aux protéines de défense du système immunitaire. Les variantes ChoP- sont alors avantagées, car elles repoussent les attaques. Lorsque l'infection virale diminue, les mutants ChoP+ engendrés par un nouveau dérapage réplicatif prédominent à nouveau.

Capables de s'activer ou de se désactiver facilement, des gènes tels que les gènes *ChoP* sont des «gènes de secours» : grâce à leur présence dans le génome, au moins quelques bactéries d'une population s'adaptent aux nouveaux environnements. Ils codent des caractères variés : la reconnaissance par le système immunitaire, la mobilité générale, les mouvements vers des signaux chimiques (chimiotaxie), l'adhérence à des cellules et la capacité de les infecter, l'absorption de nutriments, la sensibilité aux antibiotiques... Bien que les «gènes de

Qui est le père ?

Utilisés dans les enquêtes policières (détermination d'empreintes génétiques), les microsatellites le sont aussi par les biologistes qui se préoccupent de la conservation des espèces en voie de disparition.

Les microsatellites permettent d'établir des cartes d'identité génétique, parce que la longueur des séquences d'ADN des microsatellites diffère selon les individus. Pour établir les cartes, les biologistes utilisent des enzymes qui produisent des millions de copies exactes de divers microsatellites pour chaque individu, puis ils séparent ces copies sur un gel entre les bords duquel on applique un champ électrique. Le motif de bandes obtenu ressemble beaucoup à un code à barres, et il est presque aussi caractéristique de chaque individu que le sont les empreintes digitales.

Pascal Gagneux et David Woodruff, de l'Université de San Diego, et Christophe Boesch, de l'Université de Bâle, ont utilisé les microsatellites pour explorer les habitudes reproductrices d'un groupe de chimpanzés sauvages qui vit dans la forêt Taï, en Côte-d'Ivoire. Ils ont ramassé des poils dans les nids temporaires que les animaux construisent dans les arbres et ont extrait l'ADN des cellules de la racine des poils. En comparant l'empreinte génétique des microsatellites des mâles, des femelles adultes et de 13 jeunes, les biologistes ont découvert que sept des jeunes ne pouvaient avoir pour père un des mâles du groupe. Bien que les



LES CHIMPANZES FEMELLES vont souvent s'accoupler discrètement avec des mâles hors de leur propre groupe. Ce comportement a été déduit des tests d'empreintes génétiques fondés sur les microsatellites.

zoologistes ne les aient jamais vu faire, certaines des chimpanzés femelles se sont faufilees dans la forêt environnante pendant la nuit pour un rendez-vous amoureux avec des mâles d'autres groupes proches.

De telles aventures nocturnes expliquent peut-être comment de petits groupes de chimpanzés conservent une grande diversité génétique ; celle-ci est précieuse, parce qu'elle accroît la résistance aux maladies et contribue à la survie de l'espèce.

Aujourd'hui toutefois, les groupes de chimpanzés, de plus en plus rares, sont séparés par de plus grandes distances : la capacité des femelles à trouver des mâles d'autres groupes et à apporter ainsi de nouveaux gènes dans leur groupe se restreindra considérablement.

secours» ne constituent qu'une faible proportion de l'ADN bactérien, ils procurent une grande flexibilité de fonctionnement : avec seulement dix gènes de ce type sur les 2 000 qu'il renferme en moyenne, le génome d'une bactérie présenterait 2^{10} , soit 1 024 combinaisons différentes de gènes activés et

désactivés. Grâce à cette diversité, au moins une bactérie survit au système immunitaire ou aux autres défenses des organismes infectés ; cette bactérie peut alors engendrer une nouvelle colonie.

La pathogénie, se retournant contre une bactérie qui tue l'organisme où elle vit, est une contrepartie du

polymorphisme bactérien : en raison des mutations, des souches d'*Hemophilus influenzae* s'écartent parfois de leur niche écologique habituelle, pénétrant alors dans les cellules qui tapissent les voies respiratoires ou intestinales et provoquant des infections mortelles. Néanmoins, la rareté

Dépister le cancer

Les microsatellites amélioreront bientôt le dépistage précoce du cancer. On détecte aujourd'hui jusqu'à une seule cellule cancéreuse parmi 10 000 cellules normales en recherchant des mutations de gènes, tels les gènes *p53* et *ras* (certaines formes de ces gènes prédisposent au cancer). Toutefois, ces mutations ne se produisent pas dans tous les cancers, ni même dans tous les cancers d'un même type.

Les microsatellites fournissent une autre méthode de dépistage précoce du cancer, car la fréquence d'augmentation ou de réduction des microsatellites est bien plus importante dans certaines cellules cancéreuses que dans les cellules normales. De telles modifications,

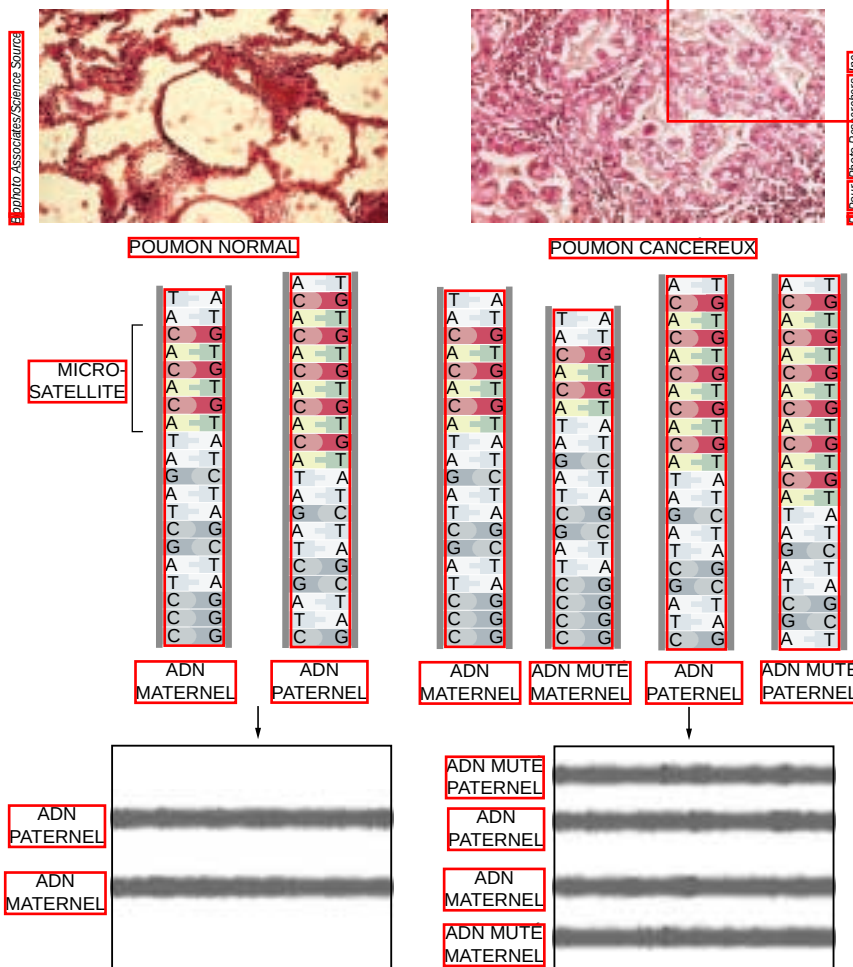
qui portent souvent sur de nombreux microsatellites différents, sont facilement détectables. Cette méthode permet aujourd'hui de déceler une cellule cancéreuse parmi environ 500 cellules normales.

Les modifications des microsatellites dans les cellules cancéreuses furent découvertes en 1993 par Manuel Perucho, de l'Institut de recherches biologiques de La Jolla, en Californie. Étudiant la forme héréditaire d'un cancer du côlon, il observa que la longueur des microsatellites de cellules cancéreuses était différente de celles des cellules normales du même patient. On a ensuite montré qu'une des anomalies qui provoquait ces modifications se situe dans un gène codant une enzyme responsable de la correction de la longueur des microsatellites. La perte du gène fonctionnel augmenterait vraisemblablement la probabilité de rencontrer des erreurs non corrigées.

Enfin, Richard Boland, de l'Université de San Diego, et d'autres généticiens ont inséré un chromosome humain porteur d'un gène normal de réparation de l'ADN dans des cellules cancéreuses cultivées en laboratoire. Ils ont observé que le gène introduit ralentissait la fréquence de mutation des microsatellites des cellules cancéreuses.

Toutefois, les souris génétiquement modifiées nommées «knock-out» ne possèdent pas le gène codant l'une des principales protéines de réparation ; elles ne vivent que peu de temps et présentent de nombreux types de cancers. Pourtant les mutations de leurs microsatellites ne sont plus fréquentes dans aucune de leurs cellules cancéreuses. L'instabilité des microsatellites semble être plus un symptôme que la cause du cancer. Ces changements ne formeraient qu'une partie des nombreuses modifications génétiques qui se produisent en cascade dans tout le génome d'une cellule, lors du processus de cancérisation.

Néanmoins, cette association est suffisamment fréquente pour que l'instabilité des microsatellites fournisse aux médecins un nouvel outil de dépistage. Des essais cliniques concluants de dépistage précoce, à l'aide de microsatellites, ont été d'abord effectués pour des cancers colorectaux et pour des cancers de la vessie. Ils sont aujourd'hui utilisés pour de nombreux autres types de cancers. Cependant, ces tests ne sont encore utilisés que dans des recherches. On espère qu'ils serviront aussi à déterminer le type de cancers dont souffrent les malades.



CE TEST DE DEPISTAGE du cancer examine les variations de longueur des microsatellites, tels ceux qui sont composés des répétitions de la séquence CA (cytosine, adénine). Les cellules pulmonaires normales (à gauche) ont, par exemple, des régions de répétitions de CA de deux longueurs différentes (l'une héritée de la mère, et l'autre du père) qui peuvent être séparées sur un gel à l'aide d'un champ électrique. On peut dépister les tumeurs primitives formées à la fois de cellules normales et de cellules cancéreuses, comme dans le cancer du poumon (à droite), car les microsatellites, allongés ou raccourcis, forment d'autres bandes sur un gel.

de tels événements rend supérieur le bénéfice des «gènes de secours» pour la survie des espèces bactériennes.

Les microsatellites de ces bactéries sont des adaptations évolutives. De telles répétitions ne surviennent vraisemblablement pas au hasard. Elles ont dû évoluer et être conservées, car elles permettent aux populations bactériennes de s'adapter rapidement aux variations environnementales.

Les microsatellites chez l'homme

Au contraire, les microsatellites semblent désavantager les organismes eucaryotes, tels que nous, dont les cellules contiennent un noyau. Aucun des microsatellites eucaryotes identifiés à ce jour ne modifie la lecture de l'ADN ou ne produit de protéines non fonctionnelles. La plupart des microsatellites sont à l'extérieur des gènes. Parmi les dix pour cent de microsatellites présents dans les gènes, la quasi-totalité (excepté dans certains cancers ; voir l'encadré de la page 88) sont des répétitions de triplets qui ont tendance à s'allonger ou à se raccourcir par unités de trois bases. De même que l'ajout ou la soustraction du mot «qui», dans une phrase, perturbe peu sa compréhension, la taille des répétitions de triplets peut varier sans que l'information génétique soit altérée : ayant la longueur d'un codon, ces modifications ne provoquent que l'insertion ou la délétion de quelques acides aminés répétés, sans modifier le reste de la séquence.

À quoi servent alors les microsatellites dans les organismes supérieurs ? Les eucaryotes ont plus de microsatellites que les bactéries, et beaucoup sont situés dans des gènes, ou près des gènes de régulation de processus cellulaires fondamentaux. Toutefois, nous n'avons aujourd'hui que quelques soupçons concernant leurs rôles.

Les rares effets connus des microsatellites eucaryotes sont surtout nuisibles. Ainsi, la maladie de Huntington (une dégénérescence du cerveau, caractérisée par une démence et une perte progressive du contrôle moteur) est provoquée par une version défectueuse d'un gène codant une protéine, la huntingtine, de fonction encore inconnue. Le gène normal de cette protéine contient un long microsatellite à répétitions de triplets qui code une chaîne de glutamines (des acides aminés) près du début de la protéine.

Le nombre de glutamines présentes au début de la protéine huntingtine est généralement compris entre 10 et 30. Cependant, les personnes atteintes de la maladie de Huntington – ou celles qui le seront – ont une série plus longue, d'au moins 36 glutamines. L'héritage d'un exemplaire seulement du gène défectueux, de la mère ou du père, suffit à provoquer la maladie. La manière dont la longue série de glutamines contribue à la maladie de Huntington reste mystérieuse.

Une dizaine de maladies à répétitions de triplets sont aujourd'hui connues ; la plupart sont des maladies neurologiques rares. Près de la moitié des répétitions pathogènes sont à l'intérieur de gènes et, pour la plupart, codent la glutamine. Les autres sont suffisamment près des gènes pour perturber leur fonction.

Ainsi, l'amyotrophie spino-bulbaire résulte de l'allongement d'un microsatellite à l'intérieur d'un gène qui code le récepteur des androgènes (des hormones masculines), sur le chromosome sexuel X. Des hommes possédant plus de 40 triplets successifs dans leurs gènes contracteront la maladie. Par ailleurs, en 1997, Eu Leong Yong et ses collègues de l'Hôpital de Singapour ont montré que des séquences de seulement 28 à 40 répétitions dans le gène du récepteur aux androgènes prédisposent les hommes porteurs à la stérilité. Enfin, d'autres équipes de recherche ont montré que les hommes possédant 23 répétitions, ou moins, ont des risques accrus de cancer de la prostate. Toutefois, ces cas sont rares.

La capacité d'évoluer

Pourquoi avons-nous ces «bombes génétiques à retardement» dans notre génome ? Pourquoi autant de nos maladies dues à des répétitions de triplets concernent-elles les fonctions neurologiques, et pourquoi aucune de ces maladies n'est-elle connue chez les autres primates ? Ces maladies qui semblent typiquement humaines sont-elles une contrepartie génétique de l'évolution rapide de notre cerveau ? Certains longs microsatellites présents dans certains gènes, ou près d'eux, ont-ils contribué à l'apparition de nos fonctions cérébrales, et auraient-ils persisté tout au long de l'évolution malgré les maladies provoquées par leur développement parfois trop important ?

En 1989, l'un d'entre nous (C. Wills) a proposé que certains gènes aient la capacité d'évoluer : ce serait un avantage en cas de changement de l'environnement, dû au réchauffement ou au refroidissement du climat. Les «gènes de secours» des bactéries sont de bons exemples de gènes capables d'évoluer. Leur fréquence de mutations élevée permet aux bactéries de s'adapter rapidement aux variations prévisibles de l'environnement, puis de retrouver leur état antérieur quand réapparaissent les conditions initiales.

Les microsatellites eucaryotes exercent peut-être une forme de régulation plus subtile que celle fournie par les «gènes de secours» des bactéries. Chez l'homme, on a découvert que la présence de microsatellites dans des gènes influe sur la vitesse de production de nombreuses protéines, telles celles qui participent au métabolisme de l'hémoglobine ou à la synthèse des neuromédiateurs (les composés qui transportent les messages entre les cellules nerveuses). À l'Université de l'Illinois, David King a comparé ces microsatellites à des «boutons de réglage» qui auraient évolué pour agir à la manière de thermostats de la fonction des gènes, augmentant ou réduisant la quantité de protéines produites selon les besoins.

L'équipe de Walter Schaffner, à Zurich, a montré que l'addition de microsatellites qui codent des séries de glutamines ou de prolines (un autre acide aminé) au début d'un gène augmente parfois sa capacité à produire des protéines. Cette forme de régulation des gènes est-elle apparue au cours de l'évolution des organismes pluricellulaires complexes parce qu'elle est moins perturbatrice que l'activation des «gènes de secours» ?

Richard MOXON travaille sur les maladies infectieuses à l'Université d'Oxford. Christopher WILLS est professeur de biologie à l'Université de San Diego.

E.R. MOXON et al., *Adaptive Evolution of Highly Mutable Loci in Pathogenic Bacteria*, in *Current Biology*, vol. 4, n° 1, pp. 24-33, 1^{er} janvier 1994.

D.G. KING, M. SOLLER et Y. KASHI, *Evolutionary Tuning Knobs*, in *Endeavour*, vol. 21, n° 1, pp. 36-40, 1997.

P. GAGNEUX, D.S. WOODRUFF et C. BOESCH, *Furtive Mating in Female Chimpanzees*, in *Nature*, vol. 387, pp. 358-359, 22 mai 1997.

La protection des jeunes chez les insectes

DOUGLAS TALLAMY

Les insectes de certaines espèces risquent leur vie pour protéger leur progéniture.



Photographies de Ken Prestor-Matman

1. UNE «CRECHE» DANS LA FORET TROPICALE BRESILIENNE : des fourmis s'occupent de jeunes membracides (*Aetalion reticulatum*), pendant que leurs mères surveillent des œufs fraîchement pondus. Les fourmis se nourrissent d'une sécrétion sucrée des larves, le miel-lat ; en retour, elles les protègent des prédateurs.

Sur une feuille, une femelle de l'espèce des punaises tingides, du genre *Gargaphia* surveille ses œufs et ses larves. Féroce ennemie de *Gargaphia*, une punaise de la famille des nabidés s'approche en brandissant à la manière d'une licorne son rostre rigide et pointu, et s'attaque à toutes les larves. La mère *Gargaphia*, dépourvue de telles armes, détourne l'agresseur en battant des ailes et en grimpant sur son dos pendant que les larves rescapées se précipitent sur la nervure médiane de la feuille. Elles s'enfuient par la

tige et se cachent dans une jeune feuille encore repliée. Quand la mère parvient à s'échapper, elle suit ses larves et se place sur le pétiole de la feuille, d'où elle peut intercepter le prédateur qui les poursuit. Parfois, quand elle parvient à repousser l'attaquant, elle guide ses larves vers une autre feuille en apportant une brindille qui sert de pont. Cependant, la mère est souvent tuée par l'ennemi : son sacrifice laisse aux larves le temps de s'enfuir.

Le naturaliste suédois Adolph Modeer a décrit pour la première fois

des soins parentaux chez les insectes en 1764. Il observa les femelles de la punaise à bouclier européenne *Elasmucha grisea*, qui restent fermement sur leurs œufs et préfèrent affronter les prédateurs plutôt que de s'envoler. Toutefois, jusqu'en 1971, de nombreux entomologistes doutaient que certains insectes prennent soin de leur progéniture. Ceux qui admettaient cette idée pensaient que ces mœurs étaient l'apanage des insectes aux comportements très complexes.

Certes, un tel comportement ressemble à celui d'espèces considérées



comme «évoluées», tels les oiseaux et les mammifères, mais le phénomène est également courant parmi les invertébrés, tels les mollusques, les vers, les rotifères (des vers microscopiques qui ont deux couronnes de cils autour de la bouche) ou les méduses. On le trouve aussi chez les arthropodes : les soins parentaux sont la règle chez les chilopodes (les mille-pattes), les araignées, les scorpions, les pycnogonides (des arthropodes vivant dans la mer, qui portent leurs œufs sur leurs pattes) et les crustacés, qui sont vraisemblablement les plus proches parents des insectes. Les espèces d'insectes prodiguant des soins parentaux sont relativement rares ; elles sont dispersées, apparemment au hasard, dans 13 ordres. C'est probablement la preuve que le comportement s'est perdu au cours de l'évolution.

Les conséquences écologiques des soins parentaux sont parfois très importantes. Pourquoi ces soins ont-ils persisté, alors que la stratégie la plus simple, celle de la plupart des insectes, consiste à produire de très nombreux œufs qui sont ensuite abandonnés ? Selon Edward Wilson, ce comportement est plus fréquent quand les ressources sont abondantes (la compétition est alors intense) ou, au contraire, lorsque la nourriture est rare, lorsque les conditions physiques sont particulièrement difficiles, ou encore en cas de forte prédation.

Un monde riche et rude

Les nécrophores (des coléoptères charognards) et les bousiers sont adaptés à la compétition pour des ressources particulièrement nourrissantes, mais éphémères, que sont les charognes ou les excréments, par une forme spécifique de soins parentaux. La femelle seule, ou parfois les deux parents, cachent la nourriture dans une cavité souterraine, afin de la protéger des concurrents et de la dessiccation. Par exemple, les couples de nécrophores enterrent parfois les cadavres de petits rongeurs et creusent à l'intérieur une cavité en forme de coupe, pour abriter et nourrir les jeunes ; l'alimentation de ces derniers est complétée par des liquides régurgités par les parents. Michelle Scott, de l'Université du New Hampshire, et Gonzalo Halffter, de l'Institut d'écologie de Veracruz, ont montré que le mâle de telles espèces protège sa prise et sa progéniture.

Sehirus, une punaise fouisseuse, nourrit aussi ses jeunes en apportant des graines à ses larves fragiles, cachées dans une cavité du sol. Les parents peuvent aussi transformer la nourriture pour leurs jeunes. Ainsi, le membricide *Umbonia* entaille des écorces afin de mettre à la disposition de ses minuscules larves les vaisseaux du phloème, qui transportent les nutriments dans la plante. Les insectes xylophages transforment le bois indigeste, coriace et pauvre en azote, en une

forme utilisable par les jeunes. Par exemple, la blatte *Cryptocercus*, vivant dans le bois en décomposition, ainsi qu'un coléoptère de la famille des paspalidés, nourrissent les jeunes par leur anus avec des fibres de bois macérées, des protozoaires qui colonisent l'intestin et décomposent la cellulose, des fèces et des sécrétions intestinales riches en azote. Les scolytes (des coléoptères qui vivent dans l'écorce des arbres) creusent des tunnels où ils déposent leurs œufs, et ils ensemencent les copeaux de bois avec des champignons qui transforment la cellulose en une forme assimilable par les larves.

Le plus souvent, les insectes qui dispensent des soins parentaux protègent uniquement les œufs. Cependant, les parents de certaines espèces défendent aussi les jeunes. Les parents et la progéniture doivent alors communiquer et coordonner leurs mouvements. Par exemple, la punaise *Gargaphia*, les mouches à scie, des chrysomèles et les coléoptères mycétophages (qui mangent des champignons) protègent leurs larves tout en cherchant de la nourriture. Une mère ne surveille efficacement ses jeunes que s'ils restent groupés ; elle les conduit comme un berger conduit son troupeau. En de rares occasions, le père participe aussi à la protection des jeunes, et l'espèce peut alors occuper un milieu inhospitalier : ainsi les gros œufs de certaines punaises aquatiques sont menacés de dessiccation hors de l'eau, et de noyade



2. LES LARVES DES PUNAISES du genre *Gargaphia* s'abritent des prédateurs dans les replis de jeunes feuilles (à droite). Parfois, la mère doit affronter des prédateurs qui mangent les larves, telle cette larve d'un névroptère (ci-dessus, à droite).



dans l'eau ; les œufs doivent être constamment humidifiés et aérés. La femelle du béliostome *Lethocerus* (une punaise aquatique géante) dépose les œufs sur une brindille au-dessus de l'eau. Le mâle ne cesse alors de plonger, puis de s'égoutter au-dessus des œufs pour les humidifier ; il chasse également les prédateurs. Le mâle béliostome *Belostoma* porte les œufs que la femelle lui a collés sur le dos, et il flotte à la surface de l'eau pour les exposer à l'air. Pendant des heures, il remue ses pattes postérieures ou effectue des tractions agrippé à une brindille, afin de créer un courant d'eau aérée sur les œufs. Le staphylin *Bledius*, le carabe *Bembidion* et le coléoptère des marais *Heterocerus* empêchent également leurs œufs de se noyer dans les vasières : quand la marée monte, ils bouchent les ouvertures étroites des cavités d'incubation où les œufs sont placés, et ils enlèvent les bouchons quand la mer se retire.

Le coût des soins

Pourquoi certains insectes prodiguent-ils leurs soins aux jeunes, alors que d'autres espèces, même fortement apparentées, se reproduisent dans des conditions identiques en utilisant d'autres stratégies ? Une analyse des avantages et des inconvénients explique les diverses stratégies.

Les parents pâtissent parfois gravement, jusqu'à en mourir, de la protection qu'ils assurent contre les prédateurs. De tels risques sont difficiles à quantifier, et les données sont rares. Néanmoins, j'ai mesuré les chances de survie de *Gargaphia* à l'attaque d'une araignée (de la famille des salticides) : les femelles qui gardaient les larves avaient une probabilité de survie trois fois inférieure à celles qui étaient dépourvues de telles responsabilités.

Les soins aux jeunes sont également pénalisants, parce qu'ils confinent les parents à la zone restreinte du nid (sauf lorsque les œufs sont portés par l'un des parents). La production des œufs impose une dépense notable d'énergie, et la mère qui monte la garde auprès de sa première ponte ne peut chercher la nourriture qui lui permettrait de pondre à nouveau. Lorsqu'on empêche expérimentalement des femelles *Gargaphia* de surveiller leurs œufs, elles pondent plus de deux fois plus d'œufs que les femelles qui gardent les œufs.



3. LES LARVES DE CHRYSOMÉLES DU BRÉSIL *Acromis sparsa* se bousculent pour être en sécurité sous le corps de leur mère, où elles se disposent en anneau. L'extrémité anale de leur corps porte des crochets sur lesquels elles agitent leurs excréments, qui repoussent les prédateurs dès la première bouchée. La mère surveille ses œufs (en médaillon).



4. LA PUNAISE D'Australie *TECTOCORIS DIOPHTHALMUS* défend agressivement son unique ponte, sa seule chance de succès reproductif.

Le coût biologique des soins parentaux a suscité des comportements de parasitisme. Par exemple, certaines femelles des genres *Gargaphia* et *Polyglypta* (un membracide) cherchent à pondre leurs œufs parmi ceux d'autres individus de leur espèce. Quand elles y parviennent, elles peuvent pondre de nouveau presque immédiatement, alors que les mères «receveuses» ne peuvent recommencer une nouvelle ponte qu'à l'éclosion des premiers œufs (chez

Polyglypta) ou quand les larves deviennent adultes (chez *Gargaphia*). Pour une femelle *Gargaphia* qui n'a pas déposé ses œufs parmi d'autres, la meilleure stratégie n'est la défense vigoureuse des jeunes que lorsqu'elle est âgée, c'est-à-dire quand sa mort a peu de conséquence, ou quand ses larves sont assez développées pour avoir des chances de parvenir à maturité.

À l'Université du Michigan, Catherine Bristow a découvert une autre

minimisation du coût biologique : la femelle du membracide *Pubilia* reste avec ses jeunes jusqu'à ce que des fourmis découvrent le groupe et commencent à se nourrir de la sécrétion sucrée (le miellat) produite par les larves. La mère abandonne alors les larves aux soins des fourmis, qui les défendent des prédateurs.

Pour les mâles, la protection des jeunes est un comportement excessivement coûteux. Le sperme n'est physiologiquement pas cher, et la réduction des apports nutritionnels due à la garde des jeunes ne limite pas la production du sperme. Néanmoins, quand un mâle surveille une ponte, il ne peut plus féconder d'autres femelles et engendrer d'autres jeunes.

De surcroît, les soins paternels sont souvent un investissement douteux pour la plupart des mâles, en raison de l'incertitude sur la paternité des œufs : les femelles stockent le sperme et peuvent, à l'intérieur de leur organisme, choisir le sperme d'un mâle plutôt que celui d'un autre mâle.

Aussi les soins exclusivement paternels sont-ils très rares chez les insectes. On ne les rencontre que dans trois familles de punaises : chez les béliostomes, chez quelques espèces de réduves (des punaises prédatrices) et chez les punaises coréides. Par exemple, le mâle du réduve *Rhinocoris* s'exhibe lorsqu'il garde des œufs. Les femelles du voisinage semblent alors admettre qu'un mâle ayant déjà des œufs à sa charge est un mâle performant, et elles vont alors le trouver pour s'accoupler. Comme les femelles ne s'accouplent qu'avec des mâles qui ont la garde d'œufs (sauf en début de saison, quand peu d'œufs ont été pondus), les mâles se disputent la protection des pontes. Ce type de comportement est bénéfique, car les femelles pondent juste après l'accouplement – et parfois pendant celui-ci –, permettant ainsi aux mâles de s'occuper d'œufs dont ils sont très certainement les géniteurs.

Chez les punaises aquatiques et chez les réduves, la proportion de femelles à la recherche de mâles est élevée. Lisa Thomas, de l'Université de Cambridge, a découvert que le réduve du Kenya *Rhinocoris tristis* vit uniquement sur une légumineuse du genre *Stylosanthes*, dont il boit le nectar des fleurs et dont il exclut les autres insectes. Les femelles trouvent facilement les mâles qui gardent les œufs, de sorte que, dans ce cas, les mâles ne



5. LA MANTE RELIGIEUSE KENYANE *OXYOPHTHALMELLUS SOMALICUS* (à gauche) s'est placée à la base d'une brindille, d'où elle intercepte les prédateurs intéressés par ses nymphes. La mante religieuse *Galepsus* (en haut), qui vit également au Kenya, a camouflé son oothèque (poche d'œufs) afin qu'elle se confonde avec la surface de l'écorce. Néanmoins, elle monte la garde, pour le cas où sa ruse viendrait à échouer.



6. CE MALE BÉLOSTOME *ABEDUS HERBERTI* d'Arizona transporte les œufs qu'il a fécondés et qui ont été collés sur son dos par la femelle. Il maintient les œufs humides et aérés.

souffrent pas d'être confinés à la plante. Robert Smith, de l'Université d'Arizona, explique de même les rassemblements de bélostomes dans les mares : les mâles n'ont pas besoin d'errer, puisque les femelles viennent à eux.

Le dernier recours

Malgré ces exemples, de nombreux insectes évitent de s'occuper de leurs jeunes, qu'ils protègent de façons variées. Certains cachent les œufs à l'aide d'ovipositeurs perforants (des appendices en forme d'épée, utilisés pour la ponte), d'autres recouvrent les œufs d'un revêtement impénétrable. Certaines espèces ne «mettent pas tous leurs œufs dans le même panier» : elles les dispersent ainsi dans le temps et dans l'espace. Cette dernière stratégie est efficace : quand un prédateur découvre l'une des pontes, il n'accède qu'à une petite fraction du nombre total d'œufs déposés par la mère. Lorsqu'on empêche une femelle *Gargaphia* de protéger sa ponte (souvent supérieure à 100 œufs), 56 pour cent des œufs sont détruits par les prédateurs avant d'éclore. En revanche, la punaise

Corythucha ciliata, en déposant 33 petites pontes sur différentes feuilles, ne perd que 16 pour cent de ses œufs.

Pourquoi certains insectes continuent-ils de prodiguer des soins à leur progéniture ? L'importance du coût des soins parentaux dépend de la perte de fécondité correspondante. Quand l'arrivée de l'hiver ou la limitation des ressources diminuent la future production d'œufs, les soins parentaux deviennent parfois un comportement valable.

Par exemple, les femelles de la punaise fouisseuse *Parastrachia japonensis* n'élèvent leurs jeunes que sur les fruits tombés des arbres *Schoepfia*. Elles doivent limiter leur reproduction à la courte période d'abondance de ces fruits. La quantité de nourriture ne permet à la femelle que d'avoir une seule grosse ponte, qu'elle surveille et alimente pendant des semaines. Elle n'a pas d'autres occasions de se reproduire.

La plupart des espèces qui s'occupent de leurs jeunes n'ont qu'une ponte (cette limitation est due aux changements saisonniers, à la rareté des ressources ou à d'autres phénomènes écologiques). Les entomologistes comprennent mieux la disparité des soins

parentaux dans le monde des insectes lorsqu'ils les considèrent en termes de modes reproducteurs (une seule ponte ou plusieurs plus petites). Alors que les soins parentaux sont coûteux et inutiles pour les insectes qui ont la possibilité d'étaler la reproduction dans le temps et dans l'espace, ils peuvent constituer le seul moyen d'assurer la survie de la progéniture de ceux qui vivent dans des conditions plus rudes.

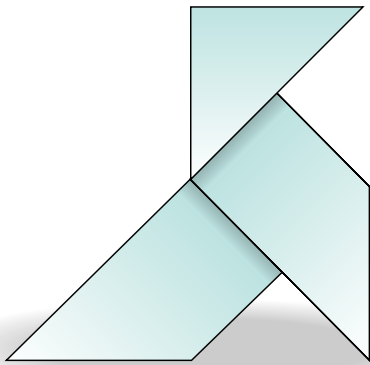
Douglas TALLAMY est professeur d'entomologie à l'Université du Delaware.

Douglas W. TALLAMY, *Insect Parental Care*, in *BioScience*, vol. 34, n° 1, pp. 20-24, janvier 1984.

D.W. TALLAMY et L.A. HORTON, *Costs and Benefits of the Egg-Dumping Alternative in Gargaphia Lace Bugs* (Hemiptera : Tingidae), in *Animal Behavior*, vol. 39, pp. 352-360, février 1990.

T.H. CLUTTON-BROCK, *The Evolution of Parental Care*, Princeton University Press, 1991.

The Evolution of Social Behavior in Insects and Arachnids, sous la direction de Jae C. Choe et Bernard J. Crespi, Cambridge University Press, 1997.



Pliages et origami

IAN STEWART

Les mathématiques jettent un pont entre un art ancien et une technique moderne.

L'origami, c'est-à-dire l'art du pliage de papier, a de nombreuses relations avec les mathématiques. Ce mois-ci, nous examinerons ses contributions à la théorie des pavages et au génie mécanique.

Je me suis intéressé à l'origami grâce à un ingénieur hongrois, Tibor Tarnai, qui a récemment publié un remarquable article sur ce sujet (*Folding of Uniform Plane Tessellations*, in *Origami Science & Art*, sous la direction de Koryo Miura, Otsu, Shiga, Japon). T. Tarnai mentionne que l'un des phénomènes que les ingénieurs s'efforcent de comprendre est celui du flambement des structures : toute structure qui est soumise à des forces excessives se déforme (flambement) ou se rompt. Le flambement de feuilles minces de métal est particulièrement intéressant, car ces structures ont une résistance considérable malgré leur faible masse. La mieux connue est la canette en aluminium pour les boissons, un chef-d'œuvre de production industrielle.

Quand un cylindre de métal est comprimé selon son axe, il reste cylindrique jusqu'à ce que les forces atteignent une valeur critique, la charge de flambement. Puis le cylindre s'écroule soudain. Au cours d'expériences de laboratoire,



1. La structure de Yoshimura correspond au mode principal de flambement d'un cylindre.

toutefois, on peut limiter la déformation, par exemple en ajustant un cylindre un peu plus petit que celui que l'on teste à l'intérieur de celui-ci. On analyse ainsi les premières étapes de la déformation.

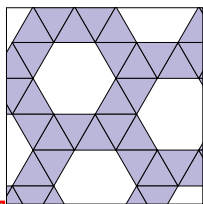
Pour un cylindre métallique, le flambement engendre une superbe struc-

ture symétrique, composée de losanges. Cette structure ressemble beaucoup à celles que l'on obtient en pliant une feuille de papier en triangles et en l'enroulant en cylindre. Le papier se déforme alors comme la feuille de métal.

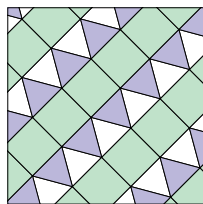
Le premier type de déformation est nommé structure de Yoshimura (voir la figure 1). On obtient la structure de Yoshimura en pavant le plan à l'aide de triangles isocèles.

T. Tarnai s'est demandé si d'autres pavages du plan pouvaient être pliés de la même façon. On sait depuis longtemps qu'il existe exactement trois types de pavages réguliers et uniformes. Par «régulier», on entend que les pavés sont tous identiques et qu'ils sont des polygones réguliers. Par «uniforme», on entend que les arrangements des pavés sont identiques à chaque sommet. Les pavages réguliers et uniformes sont ceux qui sont composés de triangles équilatéraux, de carrés ou d'hexagones.

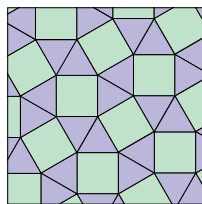
Le mathématicien suisse Ludwig Schläfli a démontré en 1850 qu'il existe, en outre, huit pavages uniformes et «semi-réguliers», où tous les pavés sont des polygones réguliers, mais pas nécessairement tous identiques. On



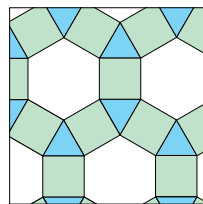
(3⁴.6)



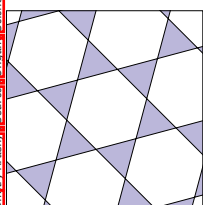
(3².4²)



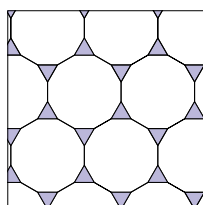
(3².4.3.4)



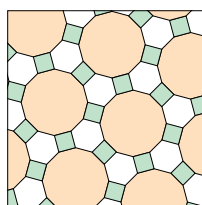
(3.4.6.4)



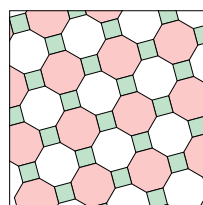
(3.6.3.6)



(3.12²)

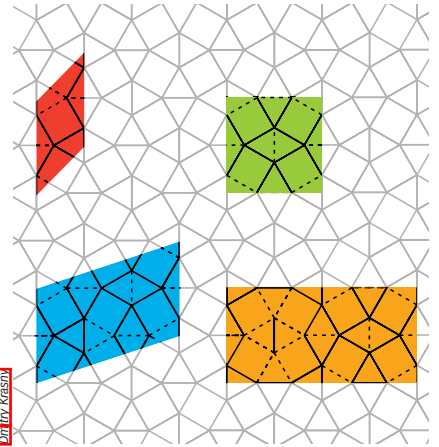


(4.6.12)



(4.8²)

2. Les huit types de pavages semi-réguliers.



3. Diagrammes de pliage du pavage (3².4.3.4).



4. Ces cylindres déformés correspondent respectivement aux pliages représentés en rouge, en vert et en orange sur la figure 3.

désigne ces pavages par leur symbole de Schläfli, qui note la nature des pavés autour de chaque sommet.

Par exemple, le nid d'abeilles est noté (6^3) : chaque sommet est à l'intersection de trois hexagones. Les deux autres pavages réguliers et uniformes sont notés (3^6) et (4^4) .

Les pavages uniformes semi-réguliers sont : $(3^4.6)$, $(3^3.4^2)$, $(3^2.4.3.4)$, $(3.4.6.4)$, $(3.6.3.6)$, (3.12^2) , $(4.6.12)$ et (4.8^2) . Par exemple, le pavage $(3.4.6.4)$ a, à chaque sommet, un triangle équilatéral, un carré, un hexagone et un autre carré (voir la figure 2). Dans la structure de Yoshimura, le pavé n'est pas un polygone régulier, de sorte qu'il n'est pas dans la liste. Il correspondrait à la formule (3^6) .

Quelles structures peuvent-elles être pliées selon les arêtes de polygones, de sorte que les faces polygonales restent parfaitement planes ? On peut certainement plier la structure (4^4) en pliant le papier selon des lignes horizontales seulement, ou selon des lignes verticales. Cependant on ne peut plier selon une ligne horizontale et selon une ligne verticale, parce que les pavés doivent se courber en dehors du plan où les plis se croisent.

En 1989, Koryo Miura a démontré qu'aucun pavage où trois arêtes se croisent à un sommet ne peut être plié, ce qui élimine les possibilités (6^3) , (3.12^2) , $(4.6.12)$ et (4.8^2) . Il est aisé de comprendre que les pavages $(3^4.6)$ et $(3.4.6.4)$ ne peuvent pas non plus être pliés.

Des droites traversent les pavages $(3.6.3.6)$ et (4^4) , qui peuvent être pliés selon ces lignes, mais, cette fois encore, les résultats sont peu intéressants. Il ne reste alors que les pavages (3^6) , $(3^3.4^2)$ et $(3^2.4.3.4)$, qui, non seulement peuvent être pliés, mais peuvent être enroulés en cylindre, comme la structure de Yoshi-

mura. Ce sont des pavages qui doivent retenir l'attention des ingénieurs.

En fait, ces trois pavages peuvent être pliés de plusieurs façons. La figure 3 montre quatre façons de plier le pavage $(3^2.4.3.4)$; les segments noirs indiquent les plis en relief, et les pointillés les plis en creux. La figure 4 représente les cylindres plissés correspondants.

La structure des lignes de pliage se répète, dans chaque cas, sur la totalité du plan. Les parallélogrammes coloriés de la figure 3 indiquent la cellule unité. La plus petite cellule unité possible (en rouge) a une superficie égale à deux carrés et trois triangles. L'un de ces carrés est coupé en deux parties qui se recolleraient en un carré si les bords opposés de la cellule unité étaient recollés. T. Tarnai suppose que c'est le seul motif de pliage possible dont la cellule unité contient deux carrés.

La deuxième cellule unité (en vert) contient quatre carrés, et l'on suppose aussi qu'elle est le seul pliage ayant cette particularité. La troisième cellule unité (en bleu) contient six carrés ; il existe plusieurs pliages de ce type, et je vous laisse en trouver d'autres. La dernière cellule unité (en orange) contient huit carrés, et il existe à nouveau plusieurs pliages de ce type. Je vous laisse également chercher les pliages correspondant à (3^6) et $(3^3.4^2)$.

Comme pour la structure de Yoshimura, certains pliages ressemblent à la surface obtenue par écrasement d'un cylindre réel. En outre, l'écrasement peut être modélisé par ordinateur ; il suffit de faire comme si les pavés plans du pavage sont liés par une sorte de matériau élastique. Les résultats sont utiles en architecture et en génie mécanique. C'est toujours un ravissement de voir comment ces mathématiques réconcilient un art ancien et une technique moderne.

- 1- plus de puissance de calcul
- 2- plus de puissance analytique
- 3- des documents plus élaborés
- 4- des graphiques plus étonnants
- 5- ajout de fonctions personnalisées
- 6- une interface visuelle intuitive
- 7- intégration Web
- 8- compatible Windows 95,98,NT

Mathcad 8

Offre de lancement:
Mathcad 8 + Treasury 8

3 750 Fht
au lieu de 4 540 Fht

French version !!!
by

SIGMA PLUS

Distributeur officiel
MATHSOFT

- . licence d'entreprise
- . support technique
- . formation-conseil-études



29 rue Lauriston
75016 PARIS
Tél: 01 44 34 80 00
Fax: 01 44 34 80 01
mathcad@sigmaplus.fr
www.sigmaplus.fr

Tél : 01 44 34 80 00



Les découpages artistiques

JEAN-PAUL DELAHAYE

Les amateurs perspicaces et avisés découvrent encore aujourd'hui de nouvelles constructions géométriques.

Les découpages géométriques passionnent professionnels et amateurs. La gageure consiste à transformer, avec le nombre minimal de coups de ciseaux et en réarrangeant les morceaux, une forme en une autre. Le grand classique du découpage est l'ouvrage de Harry Lindgren *Recreational Problems in Geometric Dissections and How to Solve Them*, paru en 1964, puis complété et republié en 1972. En dehors de sa passion pour la géométrie et son métier d'agent de brevets, Harry Lindgren fut jusqu'à sa mort, en 1992, l'ardent défenseur d'une réforme radicale de l'orthographe anglaise qu'il souhaitait fondée sur un système phonétique rigoureux. Que n'a-t-il fait école !

Depuis 1972, de nombreux ajouts ayant fait progresser l'art populaire des dissections, une nouvelle synthèse s'imposait. Le livre de Greg Frederickson paru récemment sous le titre *Dissection : Plane and Fancy* est le recueil attendu. Sa réalisation est d'une remarquable qualité, tant sur le plan des informations que l'auteur est allé rechercher patiemment dans toutes sortes de publications, pour la plupart inac-

cessibles, que pour les belles illustrations qui nous font découvrir à chaque page des constructions astucieuses et élégantes. Ce livre prouve que l'ingéniosité des amateurs de récréations mathématiques engendre des merveilles esthétiques et d'authentiques énigmes difficiles. Le découpage du croissant de lune en croix grecque et en carré (voir la figure 1) est un classique du genre perfectionné par les deux frères rivaux du découpage, Sam Lloyd (1841-1911) et Henry Dudeney (1857-1930).

Les thèmes du découpage des figures à bords arrondis et celui des polyèdres retiendront notre attention. Assez étrangement, les résultats généraux de M. Laczkovich, S. Banach et A. Tarski sur les découpages ensemblistes utilisant l'axiome du choix ne sont pas mentionnés dans le livre de G. Frederickson, qui n'a voulu retenir que les découpages effectifs. Nous les évoquerons.

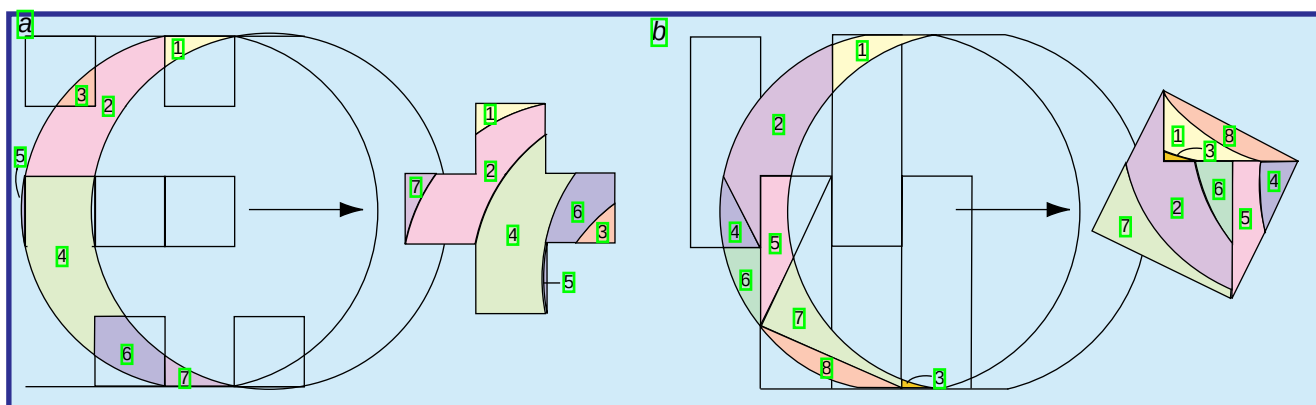
Il est évident que, si en découpant un polygone A en un nombre fini de morceaux polygonaux et en les recombinaisonnant, on reconstitue un polygone B , alors les polygones A et B ont des aires égales. Moins évidente est la propriété réciproque :

si deux polygones A et B ont des aires égales, alors on peut toujours découper le premier en un nombre fini de polygones qui se recombinaisonneront pour former le second. C'est le théorème de Wallace-Bolyai-Gerwein (démontré indépendamment plusieurs fois au XIX^e siècle) : deux polygones sont décomposables par dissection polygonale, si et seulement si, ils ont la même aire (voir la figure 2).

La démonstration générale donne des découpages comprenant un trop grand nombre de pièces, aussi en cherche-t-on d'autres plus économiques. C'est la source d'une multitude de casse-tête géométriques : les records sont régulièrement battus, parfois au grand dam des spécialistes qui pensaient impossible d'améliorer leur solution !

Tel est le cas de la transformation proposée par Lindgren du décagone en carré, qui était déjà miraculeusement réalisée avec huit pièces seulement et que l'amateur anglais Gavin Theobald améliora en un découpage de sept pièces (voir la figure 3).

Lorsque l'on considère non plus des polygones mais des figures à bords



1. Transformations du croissant de lune. Le dessin a donne une solution en sept pièces de la transformation du croissant en croix grecque. Le croissant de lune utilisé possède une hauteur égale à cinq fois la largeur. La construction résulte d'une correction apportée par G. Frede-

rickson à une solution inexacte proposée par Sam Lloyd. Le croissant de lune auquel s'intéressa H. Dudeney est légèrement différent : sa hauteur est égale à quatre fois sa largeur. Le dessin b montre un découpage en huit pièces du croissant de Lloyd conduisant au carré.

curvilignes, par exemple des arcs de cercles (voir la figure 4), le théorème de Wallace-Bolyai-Gerwein n'assure plus qu'un découpage existe, et il faut y croire pour réussir...

Pourtant l'idée des «découpages-recompositions» était une des méthodes utilisées par les Grecs pour «quarrer» des surfaces à bords curvilignes. «Quarrer» une aire signifie la calculer en ramenant la figure initiale à celle d'un carré. Ces figures aux bords curvilignes qu'on peut quarrer étaient appelées des lunules, et les Grecs savaient que certains découpages étaient difficiles, voire impossibles.

DEUX QUADRATURES DU CERCLE

Le fameux problème de la quadrature du cercle est attribué à Anaxagore. Alors qu'il était emprisonné pour avoir soutenu que la Lune ne faisait que refléter la lumière du Soleil, il se serait posé, il y a 25 siècles, la question de mettre en relation un cercle et un carré de même aire. On peut interpréter l'expression *quadrature du cercle* de deux façons différentes. La première, que nous appellerons le problème classique de la quadrature du cercle, se formule ainsi : est-il possible, en n'utilisant que la règle et le compas, de tracer un carré de la même aire qu'un cercle donné ?

Résoudre le problème équivaut à tracer à la règle et au compas un segment de longueur π à partir de la donnée d'un segment de longueur 1, ce qui ne serait possible que si π était exprimable par radicaux carrés (comme $\sqrt{2} + \sqrt{5}/1 + \sqrt{17}$). Cela impliquerait que π est solution d'une équation polynomiale à coefficients entiers, ce qui n'est pas le cas, puisque π est un nombre transcendant, comme Ferdinand von Lindemann l'a prouvé en 1882.

La seconde interprétation, que nous dénommerons problème de la quadrature du cercle par découpages, est la suivante : est-il possible de découper un cercle (on devrait dire un disque) en un nombre fini de morceaux – auxquels on n'impose pas d'être traçables à la règle et au compas – de façon qu'en recombinaison les morceaux on obtienne un carré de même aire ? Recombiner signifie déplacer les morceaux sans les déformer, en leur appliquant uniquement des translations, des rotations ou des symétries.

Ce problème, posé par le grand logicien polonais Alfred Tarski en 1952, sera résolu plus vite que son ancêtre classique. Sa solution complète est à la fois étonnante et décevante. Elle comporte deux volets.

AVEC DES CISEAUX OU AVEC DES ENSEMBLES ?

Si l'on impose aux morceaux du découpage d'être des formes géométriques limitées par des arcs de courbes régulières (cas du découpage aux ciseaux), alors L. Dubins, M. Hirsch et J. Karush ont établi en 1963 que la réponse est négative : la quadrature du cercle par découpage aux ciseaux est impossible. Il découle de leur théorème que vous ne pourrez donc pas décomposer aux ciseaux un cercle en une autre figure convexe, de type carré, triangle, œuf, ovale ou polygone régulier.

En revanche – et c'est le second volet de la réponse au problème de quadrature par découpage de Tarski –, si l'on accepte que les morceaux puissent être des sous-ensembles quelconques du disque original, alors la réponse est positive. Cela découle d'un résultat de M. Laczkovich, qui propose d'ailleurs une recombinaison du carré en n'effectuant que des translations à partir des pièces du disque découpé : la quadrature du cercle par découpage ensembliste est possible et ne nécessite que des translations. Le résultat de M. Laczkovich énonce aussi que, si deux polygones

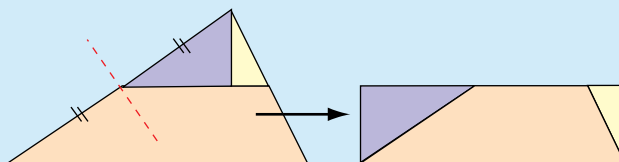
2. THÉORÈME DE WALLACE-BOLYAI-GERWEIN

Deux polygones de même aire peuvent être transformés l'un en l'autre par dissection polygonale.

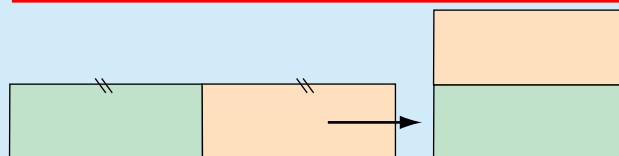
Démonstration

Pour transformer deux polygones de même aire l'un en l'autre par dissection polygonale, suivre les instructions suivantes.

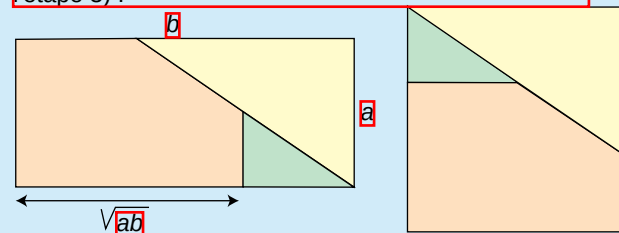
- (1) Découper le premier polygone en triangles.
- (2) Transformer chaque triangle en un rectangle (ce découpage s'applique à tout triangle, car dans tout triangle au moins l'une des hauteurs coupe le côté opposé) :



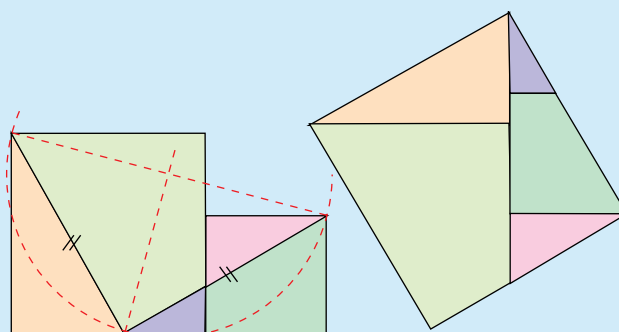
- (3) Transformer les rectangles ayant une longueur plus grande que quatre fois la largeur en rectangles ayant une longueur inférieure à quatre fois la largeur :



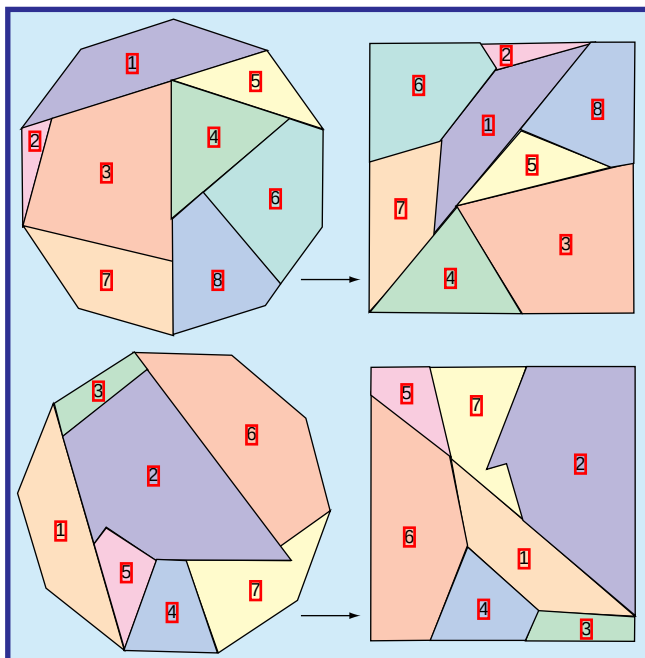
- (4) Transformer chaque rectangle en carré (cette construction ne fonctionne que si la longueur est inférieure à quatre fois la largeur, d'où la nécessité de l'étape 3) :



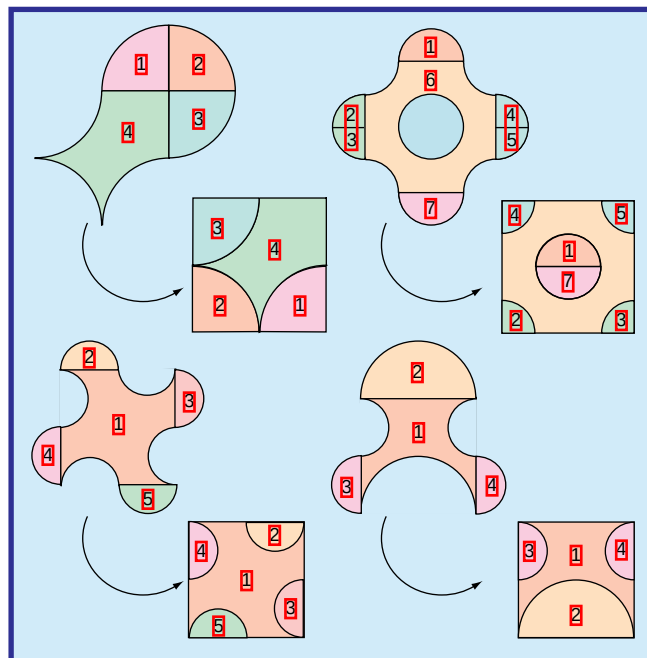
- (5) Fusionner les carrés, deux par deux, progressivement, jusqu'à avoir un unique grand carré :



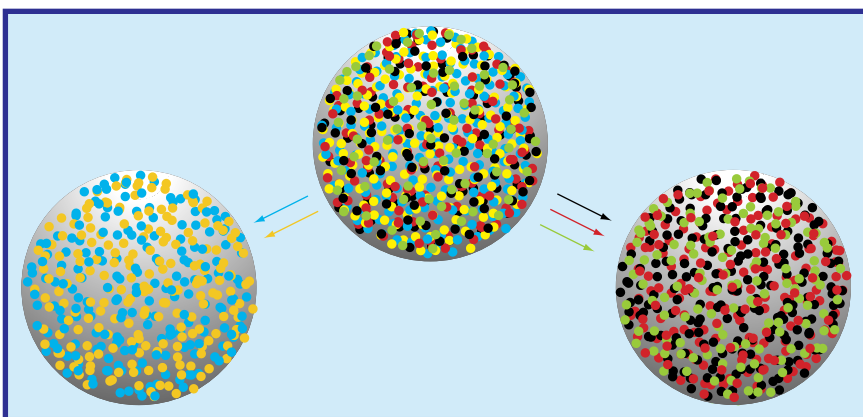
- (6) Opérer de la même façon pour le second polygone.
- (7) Superposer les découpages intervenus pour transformer le polygone 1 en carré à ceux obtenus pour transformer le polygone 2 en carré. Par construction, les pièces obtenues permettent de reconstituer le polygone 1 et le polygone 2.



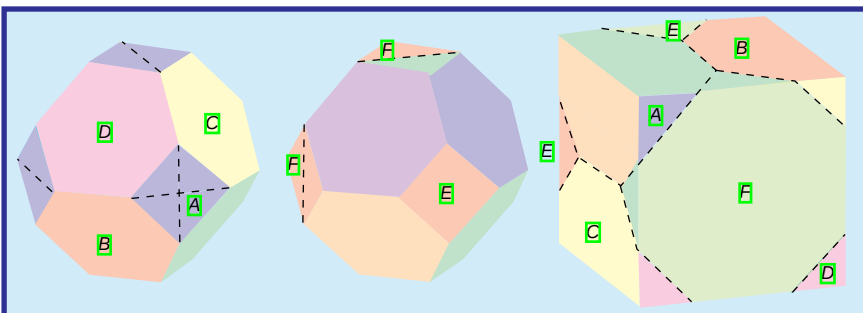
3. Record de découpage. Dans son livre de 1964, le champion mythique des découpages Harry Lindgren propose un découpage du dodéca-gone en carré n'utilisant que huit pièces. Son digne successeur, Gavin Theobald, a réussi le miracle de gagner une pièce. Il est très rare qu'on puisse établir qu'un découpage est optimal ; ici, il paraît invraisemblable qu'on puisse encore gagner une pièce, mais qui sait ?



4. Les Grecs utilisaient des découpages pour évaluer l'aire de mor-ceaux du plan, y compris ceux dont des bords sont curvilignes. Voici des formes appelées lunules dont le découpage permet de calculer l'aire en la ramenant à celle d'un carré. Hippocrate de Chio, vers 430 avant J.-C. voulait «quarrer le cercle». Pour cela, il s'intéressa à la qua-drature des lunules, qui, pensait-il, le conduirait à la solution.



5. La décomposition paradoxale de la sphère ou le paradoxe de Banach-Tarski. Une sphère pleine est composée de points jaunes, bleus, verts, rouges, noirs. Il est possible en déplaçant les points de cette sphère, stipule le théorème, de constituer une sphère pleine composée de points jaunes et bleus et une autre sphère pleine composée de points verts, rouges et noirs. Lors du déplacement, la distance mutuelle de deux points d'une même couleur ne change pas. Les mathématiciens ont démontré que le nombre de sous-ensembles est au minimum égal à 5, correspondant aux cinq couleurs représentées ici.



6. David Paterson et Anton Hanegraaf ont, indépendamment, remarqué qu'on pouvait dissé-quer un cube en six pièces pour obtenir deux octaèdres tronqués.

quelconques ont la même aire, on peut découper le premier, déplacer ses pièces en n'effectuant que des translations et recomposer le second.

GÉOMÉTRIE ENSEMBLISTE

De tels découpages théoriques n'ont aucune traduction physique, et aucune figure de cet article ne vous donnera une idée des pièces de M. Laczkovich qui réalisent la quadrature du cercle. Pourquoi ? Parce que la preuve de leur existence utilise l'axiome du choix et que les pièces des découpages sont d'une telle complexité – pire que les fractales ! – qu'on ne peut pas les représenter de façon réaliste. De surcroît, le «découpage» du disque de M. Laczkovich comporte plus de 10^{50} pièces !

On sait que l'axiome du choix fut l'objet d'âpres discussions lors de la mise au point de la théorie des ensembles et de son adoption par les mathématiciens du début du xx^e siècle. Rappelons que l'axiome du choix affirme que, si E est un ensemble non vide d'ensembles non vides alors on peut constituer un nouvel ensemble en choisissant un élément dans chaque ensemble de E . Ainsi, à partir de l'ensemble $E = \{\{a,b\},\{e,f\},\{g,h\},\{i,j\}\}$, on obtient par choix $\{a,f,h,j\}$. L'axiome du choix ne crée de difficultés que lorsque E est infini, ce qui est le cas en géométrie.

Ce n'est pas la première fois que les problèmes de découpage mettent le

mathématicien utilisateur de l'axiome du choix dans une position inconfortable : le paradoxe de Banach-Tarski est un autre exemple de cette situation. Pour l'expliquer, examinons le cas des découpages dans l'espace.

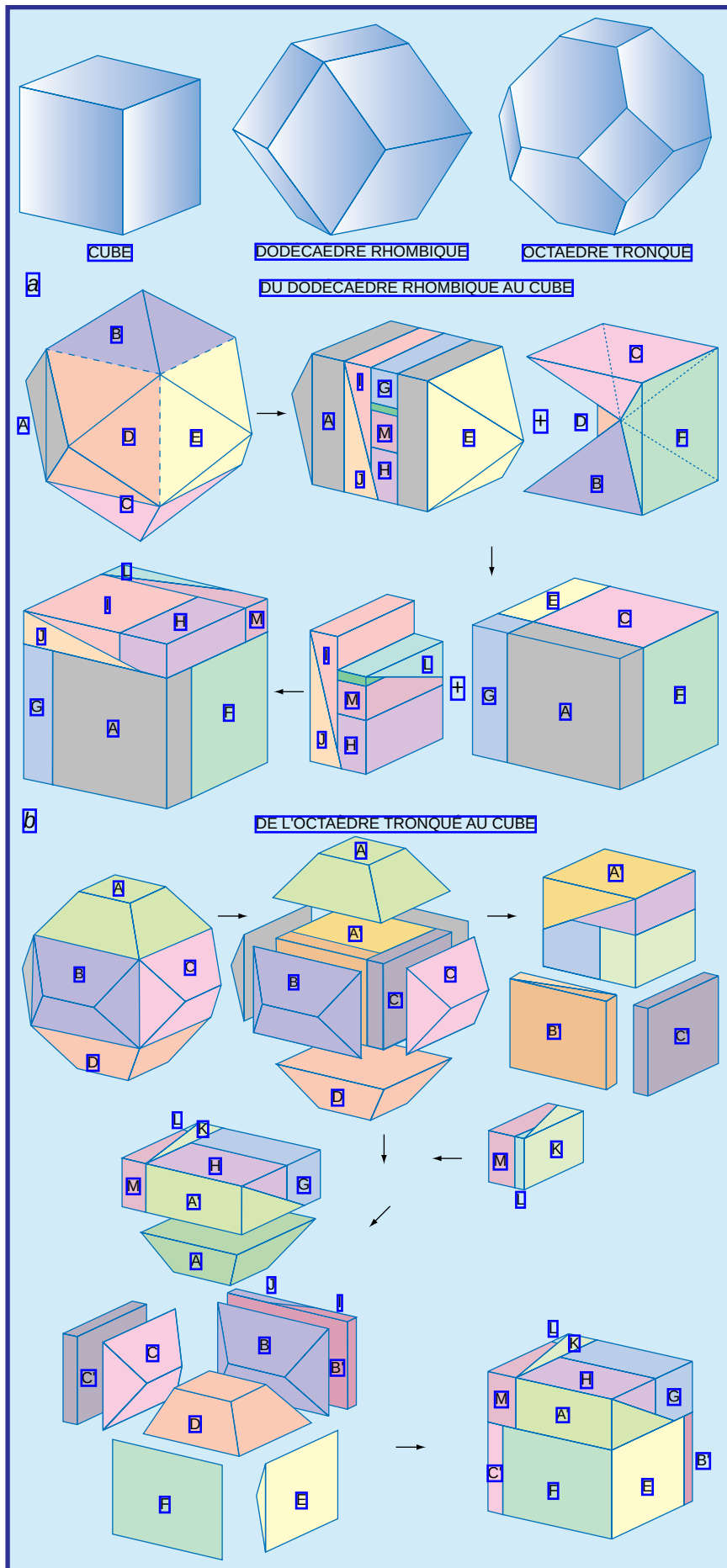
DÉCOUPAGE DANS L'ESPACE

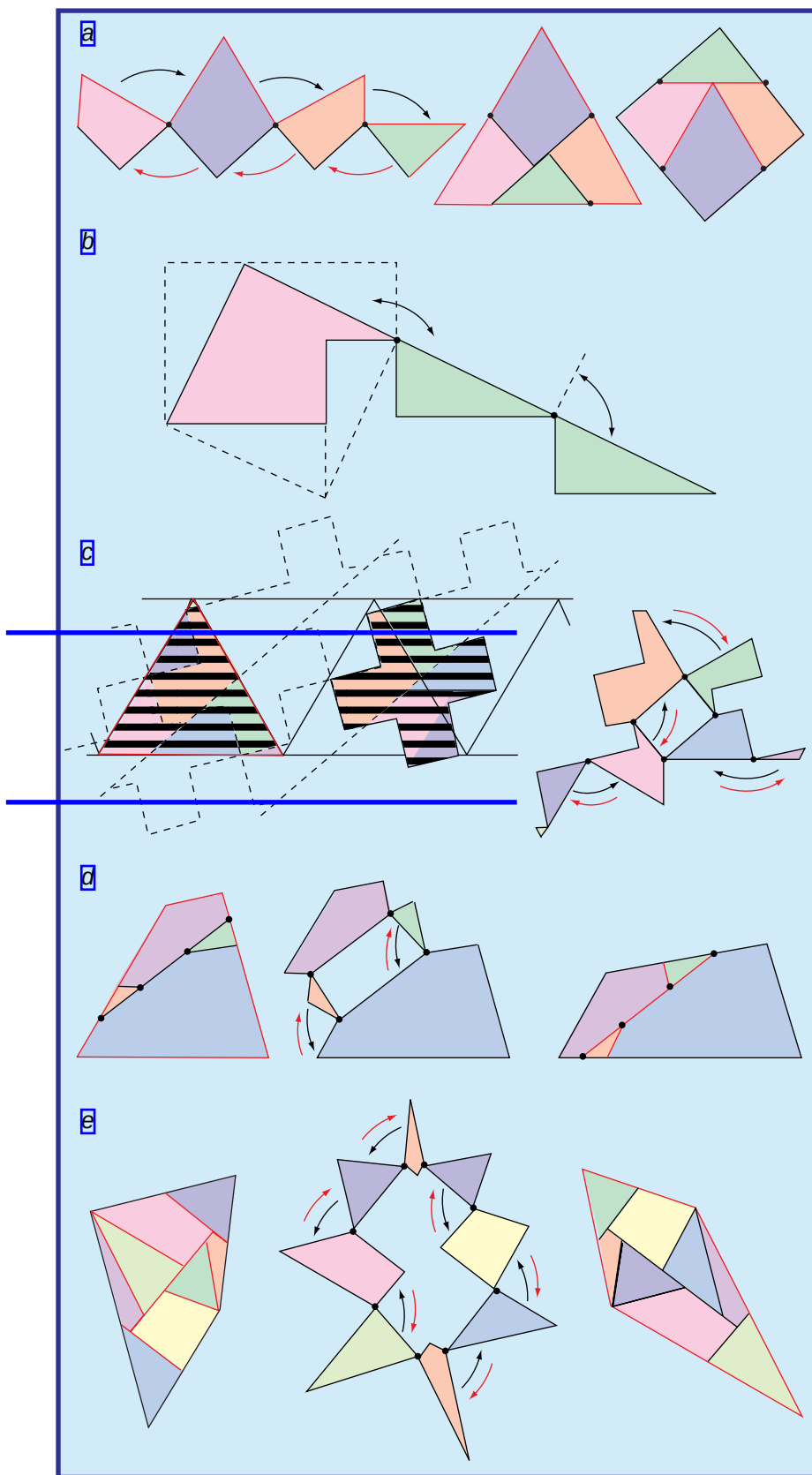
Le passage à la dimension trois change entièrement la situation. D'abord, en dimension trois, il n'existe aucun théorème général équivalant à celui de Wallace-Bolyai-Gerwein. On sait au contraire, depuis presque un siècle, que certains polyèdres ne sont pas décomposables par dissection polyédrale en d'autres.

La décomposition par dissection polyédrale du tétraèdre régulier était l'objet du troisième problème posé par Hilbert en 1900, parmi 23 dont le dixième sur les équations diophantiennes a été évoqué dans la rubrique du mois de février. Ce troisième problème a été résolu le premier : avant la fin de l'année 1900, Max Dehn avait associé un coefficient à chaque polyèdre et montré que ce coefficient ne changeait pas quand on procède à une dissection polyédrale. Cette propriété d'invariance du coefficient (appelé invariant de Dehn) implique que deux polyèdres qui n'ont pas le même coefficient ne sont pas décomposables par dissection polyédrale l'un en l'autre. Jean-Pierre Sydler, en 1965, a prouvé qu'avoir le même invariant de Dehn était non seulement nécessaire, mais aussi suffisant pour que deux polyèdres soient décomposables par dissection polyédrale l'un en l'autre. En calculant l'invariant de Dehn des cinq polyèdres réguliers (tétraèdre, octaèdre, cube, dodécaèdre, icosaèdre), on constate qu'ils sont tous différents, et donc aucun découpage en polyèdres plus petits ne permet de passer de l'un d'eux à un autre.

Le passage à la dimension trois change aussi la dissection ensembliste : alors qu'à deux dimensions la dissection conservait les aires, il n'est plus vrai qu'une dissection transforme un polyèdre en un autre polyèdre de même volume. Pire, et c'est le paradoxe de Banach-Tarski, une sphère peut être décomposée en un nombre fini de morceaux, qui, une fois déplacés (sans déformation), se recomposent en deux sphères identiques à la sphère de départ ! (voir la figure 5). Vous partez d'une sphère en or et, par cette transformation, vous

7. Le cube, l'octaèdre tronqué et le dodécaèdre rhombique sont équivalents par dissection polyédrale. Ces deux dissections en 13 pièces ont été découvertes récemment par Anton Hanegraaf. La première (a) fait passer du dodécaèdre rhombique au cube, la seconde (b) de l'octaèdre tronqué au cube.





8. Les découpages avec des charnières en dimension 2. (a) La chaîne due à Dudeney, qui permet de réaliser un carré (flèches rouges) ou un triangle équilatéral (flèches noires) et donc de passer de l'un à l'autre. (b) La transformation de deux carrés côte à côte en un seul (utilisée dans la démonstration du théorème de Wallace-Bolyai-Gerwein) peut se faire en utilisant des pièces liées les unes aux autres. (c) Un fantastique découpage permettant de passer de la croix grecque au triangle équilatéral avec cinq pièces solidaires. (d) et (e) Des transformations de quadrilatères variés par découpages avec charnières.

doubler son volume : vos problèmes de fin de mois sont résolus.

Plus généralement, une sphère peut être transformée en un cube quels que soient les volumes de la sphère initiale et ceux du cube final. Plus fort encore, si deux parties A et B de l'espace sont de taille bornée et contiennent chacune au moins une sphère de rayon positif, alors on peut décomposer A en un nombre fini de morceaux qui, après déplacement, reconstitueront B.

PARADOXES ET CONTRADICTIONS

Ces découpages paradoxaux, découverts en 1924 par les mathématiciens polonais Stephan Banach et Alfred Tarski, choquent profondément le sens commun ; pourtant, il n'y a pas «paradoxe» au sens strict : aucune contradiction n'est introduite dans la théorie des ensembles. Ces découpages montrent seulement que le monde du continu mathématique et les conséquences de l'axiome du choix ne correspondent pas à nos attentes intuitives. Le nombre de pièces pour dédoubler une sphère en deux sphères de même volume est cinq, et il est impossible de faire moins ; ce paradoxe de Banach-Tarski existe aussi dans les espaces de dimension supérieure à trois.

Les logiciens qui ont développé des outils puissants d'analyse des démonstrations mathématiques ont établi que sans l'axiome du choix, on ne pourrait pas effectuer le dédoublement miraculeux de la sphère. C'est donc bien cet axiome du choix qui est en cause. De plus, K. Gödel a prouvé, il y a 60 ans, que la théorie des ensembles avec l'axiome du choix est contradictoire si, et seulement si, celle sans l'axiome du choix l'est (autrement dit : on n'a pas plus de risque de contradiction avec que sans). Aussi personne n'a envie de se priver d'un outil si commode, même si le monde mathématique ainsi créé est un monde étrange où l'intuition géométrique est malmenée.

Reposons maintenant les pieds sur terre et revenons-en aux découpages tridimensionnels polyédraux qui seuls d'ailleurs intéressent les amateurs de géométrie.

UNE QUESTION DE GAUSS SUR LES POLYÈDRES

En 1844, Gauss se lamentait, dans une lettre au mathématicien Christian Ludwig Gerling, qu'il faille utiliser l'infini pour démontrer que deux polyèdres symétriques possèdent le même volume.

Une méthode consiste (1) à découper le premier polyèdre en tranches

parallèles fines dont on inverse l'ordre, puis (2) à faire tendre le nombre de tranches vers l'infini. Ne pouvait-on pas éviter ce passage par l'infini pour une question aussi géométrique et aussi simple? Gerling lui répondit quelques jours plus tard qu'il suffisait de découper les deux polyèdres symétriques en tétraèdres (ceux provenant du premier polygone seront symétriques de ceux provenant du second) et de savoir transformer par dissection polyédrale un tétraèdre en son symétrique, transformation dont il montrait la possibilité. Pour cette transformation d'un tétraèdre quelconque en son symétrique, Gerling proposait un découpage en 12 morceaux, qui depuis a été amélioré en un découpage en six morceaux. Le problème de Gauss était résolu.

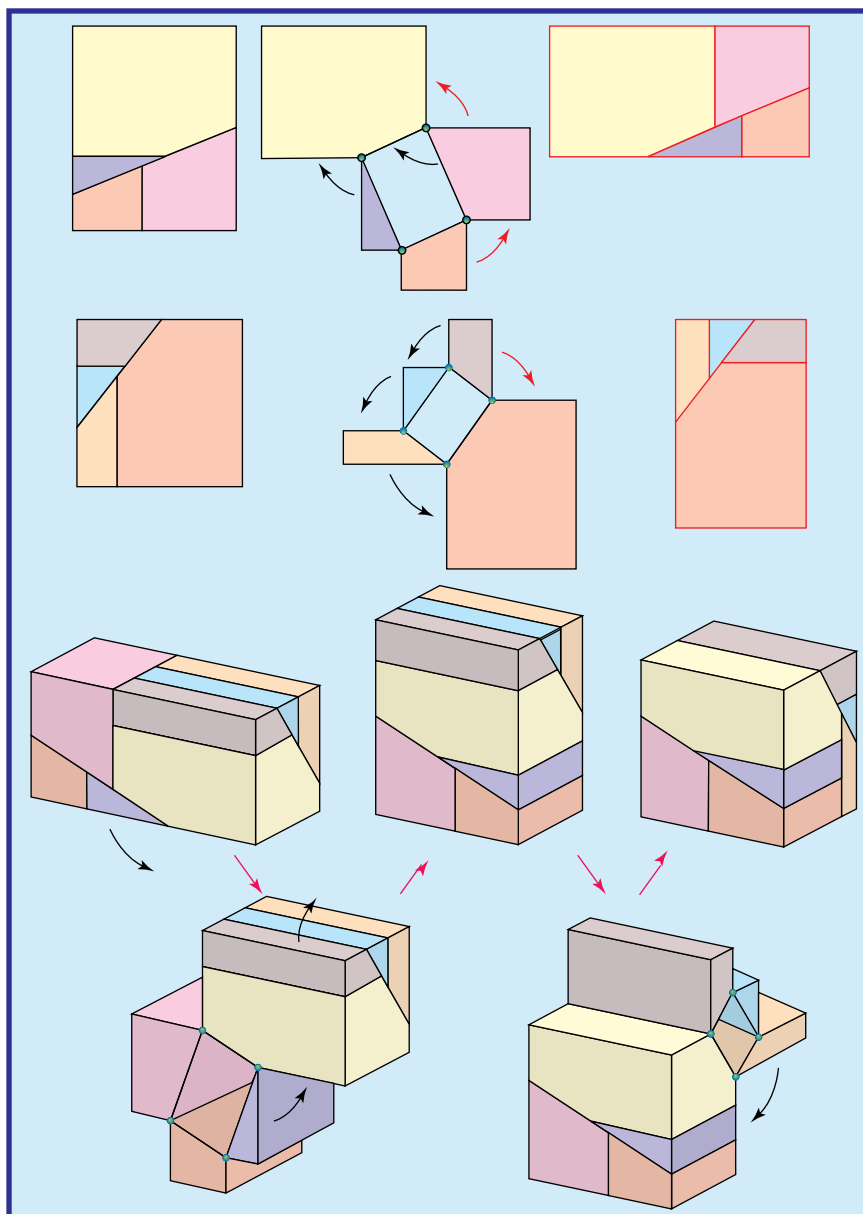
DODÉCAÈDRE RHOMBIQUE

Malgré le résultat négatif de Dehn selon lequel le tétraèdre régulier ne peut se décomposer en polyèdres redonnant un cube, certains polyèdres peuvent se transformer en d'autres par dissection polyédrale, et c'est à ce jeu délicat que s'adonnent les amateurs. Le dodécaèdre rhombique (à ne pas confondre avec le dodécaèdre régulier, qui a des faces pentagonales) est un polyèdre très sympathique, car il peut paver l'espace. Il possède 12 faces identiques, chacune ayant la forme d'un losange dont les diagonales sont dans un rapport égal à $\sqrt{2}$.

On sait transformer deux cubes identiques par dissection polyédrale en un dodécaèdre rhombique. Pour nous exercer à la pensée géométrique sans figure, imaginons ce découpage dans notre tête : divisons le premier cube en six pyramides identiques à base carrée, chacune ayant comme socle une face du cube et chacune ayant comme pointe le centre du cube. Collons maintenant les six pyramides sur les faces du second cube : nous obtenons le dodécaèdre rhombique.

Un autre découpage polyédral simple fait passer d'un octaèdre tronqué à un cube (voir la figure 7). Parmi les rares résultats concernant les polyèdres, le plus remarquable est que l'octaèdre tronqué, le dodécaèdre rhombique et le cube sont équivalents par dissection polyédrale (voir la figure 7).

On transforme aussi un parallélépipède $2 \times 1 \times 1$ en un cube (de côté $2^{1/3}$) d'une manière particulièrement astucieuse, de façon qu'un système de charnières maintienne toutes les pièces du découpage solidaires durant les opérations de transformation. Cette magnifique création est due à Anton Hanegraaf, un passionné de puzzles mathématiques qui fut l'éditeur, de 1987 à 1993, de la revue des amateurs de casse-tête appelée



9. Le découpage articulé qui fait passer du parallélépipède $2 \times 1 \times 1$ au cube. Deux découpages avec charnières (permettant de transformer des rectangles) donnent le remarquable découpage articulé de A. Hanegraaf transformant un double cube en un seul.

Cubism for Fun (dont l'adresse actuelle est : CCF, Rik van Grol, Hilvoordestraat 14, 2284 BK Rijswijk, Pays-Bas).

La réalisation matérielle de ces formes géométriques, aussi éternelles que celles

auxquelles les pythagoriciens s'intéressaient, donnerait naissance à de très originaux et magnifiques casse-tête, et s'ils étaient fabriqués, je suis certain que de nombreux lecteurs seraient intéressés!

Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille. e-mail : delahaye@lil.fr

L. DUBINS, M. HIRSCH et J. KARUSH, *Scissor Congruence*, in *Israel Journal of Mathematics*, 1, pp. 239-247, 1963.

G. FREDERICKSON, *Dissections : Plane and Fancy*, Cambridge University Press, 1997.

V. KLEE et S. WAGON, *Old and New Unsolved Problems in Plane Geometry and Number Theory*, Mathematical Association of America, 1991.

M. LACZKOVICH, *Equidecomposability and*

Discrepancy : a Solution of Tarski's Circle-squaring Problem, in *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, 404, pp. 77-117, 1990.

H. LINDGREN, *Recreational Problems in Geometric Dissections and How to Solve Them*, Revised and enlarged edition, Dover Publications, New York, 1972.

I. STEWART, *Dissections et métamorphoses*, in *Pour La Science*, pp. 96-97, janvier 1998.

S. WAGON, *The Banach-Tarski Paradox*, Cambridge University Press, 1987.

Van Gogh, mauvais chimiste

Avec cela, j'ai un plus grand tableau de l'église du village... sur l'avant-plan, un peu de verdure fleurie et du sable ensoleillé rose. » Ce tableau que décrit Vincent Van Gogh à sa sœur Wil est-il bien l'*Église d'Auvers*, exposé aujourd'hui au Musée d'Orsay (voir page de droite)? On y cherche vainement le sable rose!

De même, pourquoi les traits des deux fillettes du tableau éponyme sont-ils moins marqués sur l'original (en bas, à gauche), peint par Van Gogh dans ce même mois de juin 1890 où il réside à Auvers-sur-Oise, que sur la copie à l'aquarelle réalisée en 1901 par Blanche Derousse (en bas, à droite)? La jeune copiste, que le docteur Paul Gachet,

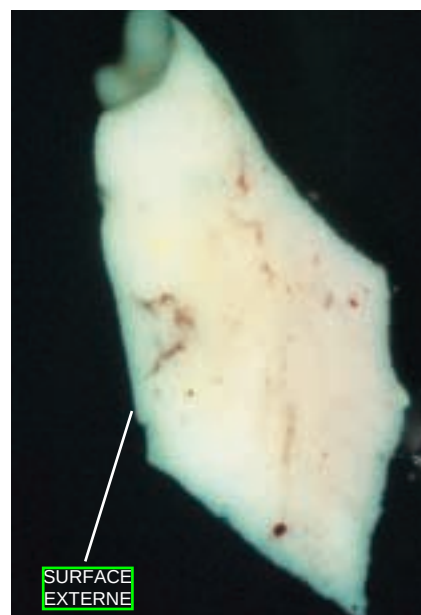
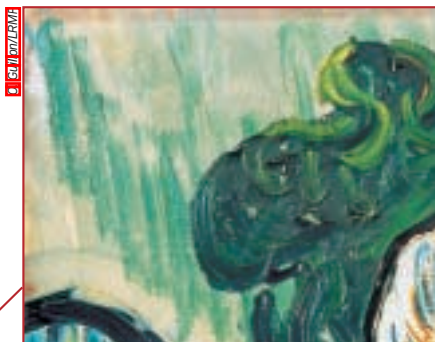
médecin et ami de Van Gogh incitait à cultiver la mémoire du peintre se serait-elle permis des ajouts de couleur? Et, dans ce cas, pourquoi n'aurait-elle ajouté que du rouge?

Jean-Paul Rioux, du Laboratoire de recherche des musées de France a examiné ces deux tableaux de Van Gogh, avec quatre autres, peints à la même époque. Le bord des *Deux fillettes*, protégé de la lumière par le cadre, est plus rose que la zone contiguë du tableau (*cartouche à gauche*). La coupe d'un prélèvement de peinture blanche réalisé sur l'*Église d'Auvers* montre aussi un dégradé du rose au blanc, de la profondeur vers la surface (*à droite*).

L'analyse chimique révèle que Van Gogh a utilisé des laques contenant des colorants rouges photodégradables : le carmin de cochenille, et l'éosine, dont la synthèse avait été mise au point une vingtaine d'années plus tôt. L'oxyde d'étain, qui entrait dans le support minéral de la laque carmin, diminuait encore la stabilité du colorant.

Des lettres du peintre à son frère Théo, qui achetait pour lui les tubes de laque à Paris, révèlent qu'il était averti des risques, mais qu'il les a sous-estimés. Il pensait, à tort, qu'en saturant les couleurs, il obtiendrait, à terme, les

nuances qu'il souhaitait. Malheureusement, là où Van Gogh a mélangé le rouge à du blanc, pour obtenir du rose, on ne voit plus aujourd'hui que du blanc. Là où il a utilisé de la laque rouge pure, la teinte a viré au beige clair. Lorsque nous admirons ces tableaux, nous ne pouvons plus compter que sur notre imagination pour nous approcher des intentions du peintre.





Les parachutes

DAN POYNTER

POUR OUVRIR SON PARACHUTE, le parachutiste sort d'abord l'extracteur de son sac et le libère dans un courant d'air qui atteint la vitesse de 180 kilomètres à l'heure.

Les parachutes ont beaucoup changé. Les anciens parachutes ralentissaient la chute parce qu'ils piégeaient de l'air. Aujourd'hui les parachutistes ont des parachutes rectangulaires, dont la forme d'aile produit une portance qui réduit davantage la descente. Avec ces nouveaux parachutes qui glissent vers l'avant plutôt qu'ils ne ralentissent la chute, l'atterrissage devient un plaisir. Fini aussi le temps où les parachutistes étaient la proie des vents.

Progressivement, les parachutes de sport sont devenus de plus en plus

petits et de plus en plus légers. Les modifications de conception, les progrès des matériaux et l'élimination des parties inutiles sont à l'origine des progrès.

Le parachute ne s'ouvre bien que si son ouverture a été préparée. Il doit être plié avec soin, et, lors de l'ouverture, toutes les suspentes doivent s'étendre simultanément pour que le choc soit aussi faible que possible. C'est seulement au prix d'une préparation méticuleuse que le saut en parachute devient un sport agréable et, surtout, sans danger.

CET EXTRACTEUR, tiré par l'air, ouvre le sac et tire le parachute vers le haut. Les suspentes se tendent, et le parachute commence à apparaître.

LES SANGLES amortissent le choc, quand le parachute principal s'ouvre.

DEUX COMMANDES guident le parachute et permettent son étouffement, lors de l'atterrissage.

POIGNEE DE COMMANDE RELIÉE AU BORD DE FUITE

Éthique

Regards sur l'éthique des sciences

Gérard Toulouse. Éditions Hachette, 1998.

A l'approche du troisième millénaire, le rôle et les actions des scientifiques font de plus en plus l'objet d'interrogations, sinon de procès. Alors que les progrès de toutes sortes et les découvertes se succèdent à un rythme soutenu, on s'interroge sur les conséquences heureuses ou malheureuses de tels bouleversements.

Après l'explosion des bombes atomiques sur Hiroshima et Nagasaki, Robert Oppenheimer s'est exclamé : «La science connaît désormais le péché.» Il n'y a pas que le nucléaire qui fasse désormais l'objet de remises en cause ou de critiques : nombreux sont les scandales qui viennent ternir la réputation auparavant irréprochable, par principe, des «savants» : sang «contaminé», vaches «folles», fabrication de clones, utilisation d'organismes génétiquement modifiés...

Les citoyens, citadins ou ruraux, riches ou pauvres, les journalistes ou les hommes politiques sont donc naturellement conduits à réfléchir sur ces sujets et à les discuter selon des considérations «éthiques», c'est-à-dire des démarches fondées sur le débat démocratique et l'adoption d'un certain nombre de «règles du jeu», telles que la Déclaration universelle des droits de l'homme, les constitutions et les lois des différents pays, ou encore les codes déontologiques qui régissent certaines professions, telles celles de la santé, de la science ou des médias.

Depuis le début des années 1980, plusieurs pays créent des comités d'éthique composés de chercheurs, de médecins, de représentants des diverses familles de pensée, etc., qui sont censés donner des avis sur ces problèmes de société où la science joue un rôle essentiel. C'est ainsi que la France se dote en 1984 d'un Comité consultatif national d'éthique, d'abord présidé par Jean Bernard, puis, depuis 1992, par Jean-Pierre Changeux. L'UNESCO installe en 1993 un comité international de bioéthique, créé et présidé par Noëlle Lenoir jusqu'en 1997. L'UNESCO encore met en place, en 1998, une Commission mondiale des connaissances scientifiques et des technologies.

La démarche éthique n'est pas réservée aux seuls États et organisations internationales. Un organisme comme le CNRS

fonde le COMETS (Comité d'éthique pour les sciences), en 1994. L'un de ses membres les plus éminents et les plus actifs, Gérard Toulouse, physicien à l'École normale supérieure, membre correspondant de l'Académie des sciences et, surtout, l'une des personnes les plus actives pour préparer la participation de notre pays à la Conférence mondiale sur la science (qui se tiendra en juin 1999 sous l'égide de l'UNESCO), vient de publier ses *Regards sur l'éthique des sciences*.

Sur ces questions complexes et qui prêtent à de nombreuses discussions, l'auteur apporte ses visions à la fois éclairantes et amusées. Il les organise autour de nombreuses références bibliographiques, qui émaillent le texte principal et qui représentent des annexes particulièrement copieuses pour un livre de ce format. Ces extraits et ces citations constituent à la fois la richesse et la faiblesse de cette utile contribution : richesse, parce que G. Toulouse nous fait pénétrer dans des univers conceptuels aussi différents que ceux de Freeman Dyson, Paul Ricœur, Hannes Alfvén, René Cassin (je retiendrais surtout l'intéressant rappel de citations essentielles de l'historien Marc Bloch) ; faiblesse, parce que l'auteur semble se protéger derrière ce foisonnement de références et semble proposer timidement sa propre pensée, par ailleurs souvent hardie dans le contexte français.

Membre de l'Académie des arts et des sciences de New York, G. Toulouse est en effet fortement marqué par ses fréquentations, tant scientifiques que culturelles, de l'école de pensée anglo-saxonne (on trouve par endroits, dans le texte du livre, des anglicismes tels que «congéniale», «tiers secteurs», «juste retour»...). C'est ainsi qu'il compare le fonctionnement et les stratégies des académies des sciences française et britannique, en montrant clairement sa préférence pour le deuxième modèle. Il montre que nos pays seraient bien inspirés de promouvoir le système des fondations, qui se révèle très efficace aux États-Unis et dans les pays qui partagent le même état d'esprit concernant l'organisation des mouvements associatifs et du bénévolat.

Je partage ce point de vue, tout en remarquant que nous disposons en France d'«instruments» (un autre anglicisme) pour faire en sorte que les débats à caractère éthique s'organisent et vivifient des «sociétés savantes» qui les organiseraient. Ce pourrait notamment être le rôle de l'Association française pour l'avancement des sciences, qui fut fondée en 1872 à l'instigation de Claude Bernard et qui a le mérite de rassembler des professionnels et des amateurs de la science de toutes les disciplines. En 1998, son colloque annuel

portait sur le sujet «Le citoyen face à la science», et l'orateur inscrit pour parler de l'éthique était... G. Toulouse.

De même, les lieux de médiation scientifique que sont la Cité des sciences et de l'industrie de La Villette, le Palais de la découverte et tous les autres établissements du même type qui existent dans toute la France se doivent de se saisir de ces questions et d'en débattre.

L'éthique des sciences est donc devenue un sujet important pour tous les citoyens, qu'ils s'intéressent de près ou de loin au développement scientifique et technique ; elle peut constituer, selon G. Toulouse et selon moi, un champ exemplaire d'applications des règles démocratiques. Le mérite peut-être le plus grand du livre de G. Toulouse est d'être une introduction simple, claire, chaleureuse et pleine d'humour à cette problématique nécessairement complexe. Le lecteur est respecté dans ses opinions et dans ses choix, ce que je tiens aussi à souligner. En bref, le mouvement induit par tous ceux qui, comme G. Toulouse, œuvrent pour une réflexion sur la science et sur toutes ses conséquences sur nos vies, est irrésistible. Je salue donc ce livre, qui concourt si bien et si justement à cette dynamique.

Jean AUDOUZE

Histoire des sciences

Le Muséum au premier siècle de son histoire

Sous la direction de Claude Blanckaert, Claudine Cohen, Pietro Corsi et Jean-Louis Fischer. Éditions du Muséum national d'histoire naturelle, 1997.

L'année 1793 marque, en France, l'éclatement de la communauté scientifique. Pourtant, le 10 juin, un décret voté par la Convention nationale transforme le Jardin du roi, qui datait de 1635, en Muséum d'histoire naturelle. Pourquoi cette spectaculaire décision, alors que le nouvel ordre républicain imposait sa loi, avec toute la brutalité des révolutions violentes ? En fait, le terrain était préparé depuis trois ans : un document intitulé *Adresses et projet de règlements présentés à l'Assemblée nationale par les officiers du Jardin des plantes et du*

Cabinet d'histoire naturelle avait été soumis sans succès aux suffrages des députés, le 20 août 1790. Ce projet était républicain et démocratique : égalité en droits et en salaires des douze professeurs (officiers), administration simple, surveillance fraternelle et réciproque, et élection annuelle d'un directeur, parmi les professeurs ; seules les finances étaient contrôlées par le ministre de l'Intérieur.

En juin 1793, une simple visite du conventionnel Joseph Lakanal au garde-démonstrateur du Cabinet d'histoire naturelle Louis Daubenton suffit à convaincre l'homme politique, qui fait voter le décret. Ernest-Théodore Hamy écrit, en 1893, dans un ouvrage qui célébrait le centenaire du Muséum : «Lakanal descend de la tribune, ayant assuré, presque par surprise, l'avenir des sciences naturelles dans notre pays.» Certes, le règlement proposé est assez démocratique pour convenir à la Convention, mais, surtout, le régime veut utiliser l'histoire naturelle pour instaurer un ordre moral révolutionnaire. Les citoyens sont encouragés à observer la nature : ainsi deviendront-ils plus sensibles, plus instruits et plus vertueux. Observer pour connaître, s'extasier sur les beautés de la nature était une conception déjà défendue par Jean-Baptiste de Lamarck. Il apparaît évident que le Jardin des plantes et le Muséum sont les lieux les mieux adaptés à cette transformation des esprits, et les professeurs les personnes les plus compétentes pour éduquer le public.

Havre de paix au sein d'une ville troublée par les émeutes, l'endroit présente les lois de la nature en action. Vulgariser la science, éduquer le peuple, c'est avant tout «montrer» les spécimens exposés dans les galeries et les animaux exotiques vivants, dans la ménagerie. C'est aussi mettre la nature en spectacle. En 1794, Maximilien Marie Isidore de Robespierre demande au peintre Jacques Louis David d'organiser les fêtes révolutionnaires. On célèbre le culte de l'être suprême et l'appropriation de la nature : «Le véritable prêtre de l'être suprême, c'est la nature, son temple l'univers, son culte la vérité, ses fêtes la joie d'un grand peuple assemblé pour nouer les doux nœuds de la Fraternité et vouer la mort des tyrans», s'écrit Robespierre dans un vibrant discours. On ne néglige ni la musique, ni les tableaux vivants, ni l'émotion dans ces grands rassemblements.

Alors, ce nouveau Muséum est-il vraiment un lieu préservé ? Ce serait trop beau : les professeurs ne pratiquent pas toujours cette fraternelle égalité annoncée dans les textes fondateurs. Les rivalités font rage sur le plan scientifique, mais aussi pour occuper le plus de place possible, en surface de laboratoires, appartements et salles

de présentation (le Jardin s'est agrandi en 1794). Les divergences entre Lamarck, Étienne Geoffroy Saint-Hilaire et Georges Cuvier sont bien connues et ont dépassé les murs de l'établissement. Timidement le Consulat tente (sans y réussir) de nommer un directeur général du Muséum. Beaucoup plus tard, en 1849 et en 1858, le ministre de l'Instruction publique essaie de remettre de l'ordre dans l'administration quelque peu anarchique du Muséum. Deux commissions sont diligentées par le pouvoir central : elles veulent dissocier administration et science, et améliorer la «constitution» qui régit le Muséum. Peine perdue : les commissions échouent et les professeurs parviennent à défendre leurs prérogatives et leur pouvoir.

Au cours de ce premier siècle d'existence, les débats scientifiques ont d'abord porté sur la classification. Celle de Carl von Linné a ses adeptes, regroupés dans les sociétés linnéennes et, au Muséum, Antoine-Laurent de Jussieu propose la méthode naturelle, qui prend en compte beaucoup plus de caractères, pour déterminer les plantes, que son illustre devancier. La place de l'homme dans le règne animal est une question sensible, qui conduit aux débuts de l'anthropologie. La période coloniale pose le problème de la place du Jardin des plantes par rapport à l'agriculture et aux échanges commerciaux ; il y aura beaucoup de transferts de plantes entre les colonies et la France, d'essais d'acclimatation et de réimplantation dans d'autres pays défavorisés. Mentionnons aussi les difficiles rapports entre les disciplines traditionnelles, descriptives, et les nouvelles, expérimentales. Enfin les luttes entre les positions fixistes (les espèces sont immuables) de Cuvier et les idées transformistes de Lamarck et de Geoffroy Saint-Hilaire (les espèces évoluent) ont perduré après la disparition des chefs de file.

Le Muséum a rayonné dans le monde entier, par ses correspondants, ses étudiants et ses visiteurs, qui se sont inspirés de ses salles d'exposition pour créer d'autres muséums célèbres, tel le Hunterian Museum de Londres. Les étudiants étrangers qui ont diffusé les idées de Lamarck étaient préparés à recevoir la théorie darwinienne de l'évolution. En revanche, les rapports entre Darwin et le Muséum ont été limités, et plutôt froids. L'*Origine des espèces* (1859), envoyée à Alphonse Milne-Edwards, Isidore Geoffroy Saint-Hilaire (fils d'Étienne), Armand de Quatrefages et Joseph Decaisne, n'a pas obtenu l'adhésion escomptée. Le célèbre théoricien de l'évolution en sera mortifié.

On l'aura compris, l'épais volume (688 pages) intitulé *Le Muséum au*

premier siècle de son histoire est passionnant. Il s'agit d'un colloque international qui s'est tenu à Paris en juin 1993, à l'occasion du bicentenaire de la création du Muséum. De nombreuses communications dévoilent les petits et grands secrets de la vénérable institution, rendant hommage aux réussites, sans escamoter les problèmes. On remarquera la forte participation étrangère, avec deux tiers des communications, présentées par des spécialistes des États-Unis, du Canada, de Grande-Bretagne, d'Irlande, d'Italie, d'Espagne. Paul Lawrence Farber, de l'Université de l'Oregon, s'étonne que «le volume des travaux historiques soit nettement inférieur à ce qu'on pourrait espérer étant donné la richesse extraordinaire des archives existantes»...

Voilà une pierre dans notre Jardin des plantes !

Michèle FEBVRE

Physique

Arbres de pierre, la croissance fractale de la matière

Vincent Fleury. Éditions Flammarion, 1998.

Les pages roses du *Petit Larousse* ont popularisé l'adage *in cauda venenum* : placées à la fin d'une recension, les critiques faites à un ouvrage y apparaissent plus sévères. N'y cédon pas, puisque je veux surtout dire combien j'ai apprécié le livre de Vincent Fleury. Oui, mais alors, ces quelques points qui me chiffonnent ? Examinons-les d'emblée, afin de nous consacrer ensuite à des éloges.

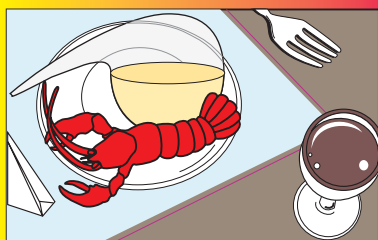
Je ne parviens pas à me faire à la désinvolture avec laquelle certains auteurs, pourtant excellents, traitent l'histoire de la chimie. Non, même si l'expression reflète bien sa pensée, Lavoisier n'a jamais prononcé ni écrit «rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme» (appel aux lecteurs : qui le premier a parlé de «loi de Lavoisier» à propos de cet aphorisme ?). Non, si Lavoisier a bien formalisé en chimie le principe de conservation de la matière, il n'a pas été le premier à l'énoncer : il avait été précédé, de 22 siècles, par Anaxagore de Clazomènes. Non, le chaud, le froid, le sec et l'humide ne sont pas les quatre éléments d'Aristote : ce sont les *qualités* qu'Aristote attribue aux quatre éléments

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 25 mars 1999.

FRANCE

info

d'Empédocle, que sont l'air, le feu, l'eau et la terre. Selon V. Fleury, il a fallu attendre Louis-Joseph Gay-Lussac et Humphry Davy (dont je ne connais pas les travaux dans ce domaine), pour voir étudier le classement des métaux dans une échelle de ce que l'on nomme aujourd'hui l'oxydoréduction. Pourtant, en 1717, dans la Question 31 de son *Optique*, Isaac Newton classait déjà le fer, le cuivre, le plomb, l'étain, l'argent et le mercure en utilisant un métal pour faire précipiter un autre métal qui se trouvait sous la forme d'un sel, réaction d'oxydoréduction qui est une des voies de la formation des arborescences dont nous sommes entretenus dans *Arbres de pierre*. Et c'est surtout le Suédois Jöns Jacob Berzelius qui, à l'aide d'une pile électrique, a classé en 1814 les 54 éléments alors connus selon leur électropositivité ou leur électronégativité (c'est lui qui introduisit ces termes).

J'arrête là mes critiques, en espérant sincèrement que ma cuistrerie n'a pas rebuté le lecteur, car il manquerait la belle histoire que nous raconte V. Fleury, celle de la matière arborescente, une forme répandue de la matière solide, que l'on rencontre dans les arbres, mais aussi dans les pierres, dans des métaux, des cellules vivantes, des amas de bactéries, dans les éclairs, dans les dépôts de givre... Le terme de dendrite s'est d'abord appliqué dans le règne minéral, puis son acception s'est étendue à toutes les formes arborescentes.

Le minéralogiste suisse Jean-Jacques Scheuchzer semble avoir été le premier à s'intéresser à leur formation, en 1709. Par une démarche expérimentale peu courante à l'époque, il réalise une expérience afin d'analyser une observation qu'il doit aux artisans qui polissent le marbre : si on place un liquide entre deux plaques et si on écarte ces plaques, l'air (ou un autre liquide) pénétrant entre les plaques construit naturellement une arborescence complexe.

L'auteur montre l'intérêt constant qu'ont suscité, jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, les «végétations chymiques» : le mot végétation est ici synonyme de dendrite métallique et rappelle les théories anciennes sur la croissance végétative des métaux ; l'«arbre de Diane», très présent dans les publications chimiques anciennes, désigne la belle structure arborescente d'argent métallique que l'on obtient quand on fait réagir un métal comme le mercure avec une solution d'un sel d'argent.

C'est en 1665 qu'Athanasius Kircher, jésuite allemand, polygraphe, sinologue et «théoricien d'à peu près tout», décrit ce qui constitue, selon l'auteur, la première représentation de croissance

chimique dendritique expérimentale, accompagnée de la description de neuf expériences permettant de réaliser des arborescences. Je regrette que V. Fleury n'ait pas donné quelques-unes des procédures expérimentales de A. Kircher, car il voit là l'«acte de naissance de la croissance fractale», trois siècles avant que ce concept n'apparaisse en physique ; il se déclare abasourdi d'avoir constaté que des expériences présentées comme originales, ces dernières années, avaient déjà été décrites et longuement étudiées au XVII^e siècle. La cause en est le succès de la cristallographie, qui a éclipsé l'étude des végétations chymiques, l'a fait disparaître de la mémoire scientifique.

V. Fleury impute très justement cette fâcheuse situation au désintérêt persistant pour l'histoire des sciences et des idées, alors que cette discipline devrait conserver vivante la trace des travaux qui n'ont pas abouti sur le moment. Revenons avec lui un peu plus d'histoire des sciences dans les programmes scolaires et l'enseignement de l'histoire des disciplines scientifiques dans le cursus universitaire.

Les structures arborescentes sont fractales : leur structure est inchangée, quelle que soit l'échelle. Ce sont d'ailleurs l'émergence et la percée du concept de fractalité, avec les travaux de Benoît Mandelbrot, en 1977, qui ont redonné vie à l'étude des structures arborescentes. Dans le chapitre joliment intitulé «La matière folle», l'auteur nous décrit deux processus physiques qui conduisent à des structures arborescentes. Nous laissons le lecteur profiter de la verve avec laquelle V. Fleury décrit l'«agrégation limitée par la diffusion» et le modèle informatique de la «marche des ivrognes», qui montre comment des structures arborescentes se forment dans des conditions qui reproduisent celles d'une interface solide-liquide ou solide-gaz. L'auteur souligne également que les cristaux réguliers apparaissent dans des conditions qui doivent être proches de l'équilibre, les structures fractales arborescentes se formant, elles, dans des conditions hors d'équilibre. Ainsi l'arborescence est-elle la forme naturelle de la matière solide.

Le rôle des dendrites est aujourd'hui étudié dans des conditions industrielles, telle la fabrication des accumulateurs au lithium-métal. Ici, comme dans d'autres exemples, le problème est d'éviter les dendrites qui, si elles sont agréables à regarder, nuisent au fonctionnement des accumulateurs.

C'est trop rapidement que nous évoquerons ici le chapitre consacré aux arborescences biologiques. Il est passionnant.

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte, assisté de Anne Gusdorf. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Camille Lamorte. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Paul Decaix, Manolo Gouy, Philippe Grandcolas, Évelyne Host-Platret, Christian Jeanmougin, Marie-Thérèse Landousy, Jean-Claude Manuguerra, Jérôme Martin, Valérie Martin-Rolland, Jacques Mugnier, Claude Olivier, Guy Paulus, Yvon Trotter.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Haysashi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher: Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer: John Hanley. Co-Chairman: Rolf Grisebach. President: Joachim Rosler. Vice-président: Frances Newburg.

PUBLICITE France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28.

Télex : LIBELIN 202978F.
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : Kate Dobson, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémillon : 01 55 42 84 04.

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada

Suisse : Serviolis - 5, rue des Chaudronniers - 15 Postale 3663 - CH 01211 Genève

Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

On mentionnera les intéressantes pages consacrées aux cellules, aux colonies de micro-organismes, aux organes en branches (arbre veineux, arbre bronchique...) et celles qui décrivent les tentacules de l'orifice buccal du concombre de mer, de l'oursin, de l'étoile de mer. Les Chinois raffolent de certaines espèces de ces invertébrés, mais ces animaux doivent d'abord se nourrir eux-mêmes ; or l'efficacité de la capture des particules organiques dépend de l'écoulement autour de l'arbre tentaculaire dendritique. Ce cas, qui s'apparente à d'autres problèmes complexes d'écoulement d'un fluide autour d'une structure arborescente (vent dans les arbres, écoulement turbulent autour d'un corail, etc.) fait aujourd'hui l'objet de recherches sur des superordinateurs, à l'Université d'Amsterdam.

Le livre de V. Fleury nous introduit à un domaine de la physique de la matière condensée qui est aujourd'hui en pointe, après avoir été longtemps négligé. L'ouvrage est bien conçu, d'un intérêt soutenu, et certains passages, difficiles en première lecture, méritent qu'on y revienne. De belles illustrations accompagnent le texte.

Georges BRAM

Astronomie

Réalisez votre télescope

Karine et Jean-Marc Lecleire.
Éditions K. et J.-M. Lecleire (BP53, 92354 Le-Plessis-Robinson cedex).

Si des générations d'astronomes amateurs ont rêvé de construire leur propre télescope, beaucoup ont reculé devant la difficulté, car l'accès aux beautés du ciel demande du courage, beaucoup de patience et un guide sérieux. Dans les années 1950, un ouvrage qui devint rapidement une «bible» en la matière, *La construction du télescope d'amateur*, fut publié par Jean Texereau, spécialiste mondialement reconnu dans le domaine de l'optique et, particulièrement, dans celui de la taille des miroirs et des lentilles.

Cependant l'ouvrage, devenu bientôt introuvable, ne fut pas remplacé, du moins par un livre aussi sérieux. Le mal est aujourd'hui réparé : Jean-Marc et Karine Lecleire publient à compte d'auteur un guide pratique tout à fait remarquable, dont la préface, signée par J. Texereau, est une garantie de qualité.

Les auteurs proposent la réalisation de trois télescopes : pour commencer, le classique «Newton», avec un miroir de 130 millimètres de diamètre. On passe ensuite au modèle supérieur, le Newton de 250 millimètres motorisé. Enfin, pour ceux qui ont passé avec succès les épreuves du Newton, le télescope Cassegrain avec un miroir de 300 millimètres les attend. Inutile de préciser qu'à ce niveau on entre presque dans la catégorie des grands télescopes.

L'opération la plus difficile est la taille du miroir primaire : celui-ci doit avoir une forme parabolique aussi parfaite que possible. On doit passer des heures à ébaucher, doucir, polir, puis contrôler la surface optique à l'aide de tests (le plus connu étant le «foucaultage»), aluminer le miroir, recommencer une partie de ces opérations pour le miroir secondaire, puis réaliser la partie mécanique. Un débutant mettra 80 à 100 heures à tailler son premier miroir s'il est seul, et environ 60 heures s'il est encadré.

L'ouvrage, soigné et très clair, explique en détail toute la démarche à suivre, de l'achat du miroir brut jusqu'à la mise en station. À aucun moment l'amateur ne se sent perdu : de nombreuses photographies et illustrations complètent harmonieusement le texte, bourré d'astuces et fruit de longues années d'expérience. Rien n'est laissé au hasard : conseils techniques, adresses de fournisseurs, sites Internet liés à la construction des télescopes, bibliographie, etc.

Pourquoi réaliser soi-même son télescope alors qu'il en existe des dizaines de types dans le commerce ? Si la différence de coût est importante, c'est surtout la satisfaction d'avoir fabriqué son propre instrument qui est déterminante. Un simple télescope de 250 millimètres de diamètre permet de voir des détails de un kilomètre de diamètre sur la Lune, d'observer les nuages de Vénus, les tempêtes de poussière sur Mars, les bandes nuageuses de Jupiter et de Saturne, sans oublier les satellites et les anneaux. En dehors du Système solaire, on découvre les étoiles jusqu'à la magnitude 14,5, on résout les principaux amas d'étoiles, et l'on peut contempler la couleur des nébuleuses planétaires ou les bras spiraux des galaxies brillantes.

Je recommande vivement aux amateurs, débutants ou confirmés, l'achat de cet ouvrage qui, à n'en pas douter, fera date.

Denis SAVOIE

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>