

LES DÉFENSES DES PLANTES • UNE TOMBE MAYA • LE QUERCY TROPICAL



Pour la Science

POUR LA SCIENCE

Août 1999

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

*Les molécules
des comètes
et des poussières
spatiales*

La vie
vient-elle
de l'espace?

Canada \$ 6.75



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

5

JEU-CONCOURS

Palindromie

par Pierre Tougne

6



POINT DE VUE

Pour un vrai dialogue

par Robert Ducluzeau

7

TRIBUNE DES LECTEURS

8



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Gödel et les limites de la logique

par John Dawson

10



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Le verre à vin

par Hervé This

14



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ Circulation des billets et conjoncture ■ L'écho des forêts ■ Vieux mais branché ■ Les faiseurs

16

de pluie ■ Un nouveau mécanisme pour l'anesthésie

■ Vision primaire ■ La preuve vidéo? ■ Derrière les barreaux

■ Les dégâts d'un ver ■ Le potassium et le chou

■ Déchets contre déchets ■ Glissements de terrain



VISIONS MATHÉMATIQUES

L'art du pavage

par Ian Stewart

100



IDÉES DE GÉNÉTIQUE

La fin de la lignée humaine?

par Jacques Ninio

106

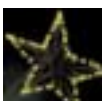


LOGIQUE ET CALCUL

La numérologie du nombre d'or

par Jean-Paul Delahaye

108



SAVOIR TECHNIQUE

Les feux d'artifice

par George Zambelli

115



ANALYSES DE LIVRES

■ L'âge du monde, de Pascal Richet ■ Soleil noir.

Histoire et mécanismes des éclipses, de Leïla Haddad

116

et Alain Cirou ■ Fonds sous-marins de Bretagne, d'Yves Turquier, Camille Lusardi et Maurice Loir ■ Évolution biologique, de Mark Ridley ■ Itinéraires sauvages. Le guide du voyage nature et de l'écotourisme, de Christian Weiss

■ Les dendrimères, coordination de Dominique Antoine



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

www.pourlascience.com

Les stratégies de défense des plantes

30

par S. Kauffmann, S. Dorey et B. Fritig

Pour améliorer la protection des plantes, on étudie leurs mécanismes naturels de défense contre les micro-organismes.



Les villes des Mayas

38

par Wolfgang Wurster

Au Nord du Guatemala, en pleine forêt tropicale, les archéologues étudient des villes qui étaient très peuplées à l'époque des conquistadores.



L'organisme distingue la gauche de la droite

46

par J. C. Izpisua Belmonte

L'orientation des organes internes des vertébrés est déterminée par des protéines qui ne sont produites que par un seul côté de l'embryon.

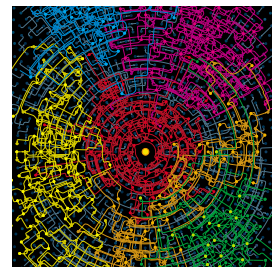


Recherche intelligente sur l'Internet

52

par les membres du Projet **Clever**

La quantité d'informations en ligne sur le réseau Internet a tant augmenté que les outils actuels de recherche manquent d'efficacité.



Le Quercy tropical

60

par C. Mourer-Chauviré,
S. Legendre, B. Marandat
et B. Sigé

Au début de l'ère tertiaire, la faune du Sud-Ouest de la France ressemblait à celle des régions tropicales actuelles. Les fossiles révèlent l'histoire du climat sur 35 millions d'années.



Les briques de la vie

70

par Max Bernstein, Scott
Sandford et Louis Allamandola

Les premiers organismes vivants terrestres semblent s'être formés à partir de molécules organiques qui se sont elles-mêmes assemblées au cœur des nuages interstellaires.



Le spin des nucléons

82

par Klaus Rith
et Andreas Schäfer

Grâce à des accélérateurs de particules plus performants, les expériences sur la structure interne des protons et des neutrons ont fait progresser la description théorique de ces particules.



L'Odyssée abrégée

90

par Martin Grötschel
et Manfred Padberg

La recherche du circuit le plus court entre plusieurs villes est le prototype d'une classe importante de problèmes d'optimisation. Parfois cette recherche est si difficile qu'on se contente d'une solution approchée.



Extraterrestres et animaux?

Encore un nouveau coup porté à l'exception terrestre et humaine! Copernic a délogé la Terre de son statut de chef d'orchestre central de l'Univers, le Système solaire a perdu son rôle central dans une galaxie parmi tant d'autres, les astronomes ont décelé l'existence de planètes orbitant autour d'étoiles lointaines et, maintenant, les biologistes montrent que la vie sur la Terre résulte de molécules apportées par les poussières interstellaires (voir *Les briques de la vie*, page 70). Il est alors probable que cette vie s'est formée dans nombre d'autres sites de l'Univers, conclusion qui renforce la banalité de notre existence. Notre pouvoir d'observation démonte une à une les hypothèses liées à la création surnaturelle d'un homme d'exception.

Dans le prolongement de cette idée, le statut animal de l'homme est source d'ambiguïtés. Lors d'un débat sur le lamarckisme et le darwinisme, orchestré dans un restaurant des sciences (*Chez Louise*, cuisine bourgeoise, excellent gamay) par deux ténors de la biologie, André Langaney et Pierre-Henri Gouyon, les réactions du public reflétaient deux refus contradictoires. Non, disaient les participants, l'homme n'a pas un statut différent des autres animaux, car il résulte, comme tous les êtres vivants, d'un processus de sélection darwinienne, mais non, ajoutaient-ils aussitôt, nous ne pouvons pas, nous ne devons pas, appliquer à l'homme les résultats «sociobiologiques» de l'étude des sociétés animales.

La sociobiologie a été la cible d'attaques qui dénonçaient son rôle de cheval de Troie de l'ultralibéralisme. Le statut social, disaient les participants, n'est pas le résultat d'une sélection darwinienne ou culturelle récompensant les meilleurs éléments de la société. La science n'a pas pour but de justifier l'inégalité sociale, grondait la salle. Et nos deux conférenciers d'applaudir l'auditoire...

Ces bars des sciences dénotent une sympathique tendance : ils montrent que le public recherche des lignes d'action fondées sur les connaissances nouvelles, en acceptation ou en refus. Ce qui «gêne», dans ce type de débat, c'est que l'examen porte plus sur les conséquences éventuellement néfastes d'une théorie, que sur sa validité.

Philippe BOULANGER

Sur l'albom de la Comtesse

Lorsqu'un message a un sens apparent et un sens crypté, seul le sens crypté est vrai. Le sens apparent n'est là que pour tromper les nigauds.

C'est ce qui fait la portée fondamentale de l'œuvre de la Comtesse. Quels que soient les événements, la Comtesse, on le sait, réussit à les relater en recourant à des contrepèteries qui, une fois décryptées, ont une connotation sexuelle. Or, *a priori*, il ne va nullement de soi qu'on puisse toujours tout raconter à l'aide de phrases dissimulant des propos sexuels. Ainsi, la Comtesse démontre dans la pratique la thèse que d'autres auteurs n'avaient su énoncer que de façon abstraite, dogmatique. Les actes humains ont un sens apparent que seuls les nigauds prennent pour le vrai ; la vérité cachée derrière, c'est qu'Eros et lui seul, toujours et partout, mène la danse. Freud l'a affirmé, la Comtesse le prouve, même par le titre de sa rubrique, où nous avons ajouté un o pour vous faciliter la tâche.

Milli-mâitre

Tout le monde a ri de la plaisanterie d'Alphonse Allais se présentant comme champion olympique du millimètre lancé. La plaisanterie fait moins rire si nous songeons que, tous autant que nous sommes, nous sommes fils et filles d'un tel champion. Elle ne doit guère dépasser quelques millimètres, en effet, la distance parcourue par le spermatozoïde vainqueur de la course à l'ovule. Une si petite

distance pour décider de qui va nous faire naître ? Voilà qui est humiliant ! Ça n'aurait pourtant rien coûté à la nature d'imposer un marathon pour sélectionner le spermatozoïde digne de nous engendrer.

Nous sommes le trophée promis au vainqueur (sûrement dopé, en outre) d'une infime compétition sportive – genre de trophée plus souvent en toc qu'en argent massif. Nous sommes bien peu de chose.

Le cavale-vapeur

Dans un roman, Alessandro Baricco évoque la nouveauté radicale que les premières locomotives furent pour les contemporains. Une locomotive ne produisait pas une force, mais «quelque chose dont on n'avait encore qu'une vague idée, quelque chose qui n'y était pas avant : la vitesse. Pas une machine qui fait ce que mille hommes feraient. Une machine qui fait ce qui n'a jamais existé» (*Châteaux de la colère*, Points Seuil, 1997, p. 73).

La rupture avec le passé était-elle si nette ? Oui et non. Le passé n'avait pas dit son dernier mot. Témoin la curieuse expression de «machine haut-le-pied», utilisée encore aujourd'hui pour désigner une locomotive circulant sans aucun wagon accroché derrière elle. Il s'agit d'une image remontant au temps des chevaux : lorsqu'il marche seul, un cheval lève les pattes plus haut que lorsqu'il avance attelé à une charrette. Donc, si rapides et inouïes les premières locomotives étaient-elles, elles rappelaient quand même, avec leurs bielles articulées, les bons vieux chevaux.

Les raisons de la colère

Certains scientifiques, semblables aux amateurs de casse-tête, cherchent pour le plaisir de s'énerver. D'autres n'aiment pas s'énerver, mais cherchent pour trouver, car les enjeux leur semblent importants. Qu'ils aiment ou pas n'y change rien : chercher finit toujours par énerver.

Un énorme chapelet de jurons, une grosse colère ne sont certes pas ce qui se fait de mieux élevé. Toutefois les jurons ou la colère ne sont pas contre-productifs. S'énerver est une façon de se concentrer sur la tâche, de se remobiliser, de regrouper ses forces et son attention en vue d'un assaut renouvelé contre la difficulté.

Dans ces conditions, rien d'étonnant à ce que certains grands de l'histoire des sciences aient eu des caractères épouvantables : Cardan, Galilée, Tycho Brahe, Newton... Il leur a fallu une mauvaise humeur exceptionnelle pour parvenir à surmonter des difficultés exceptionnelles. L'étonnant est au contraire que de bons bougres, comme Einstein ou Poincaré, aient réussi à faire quelque chose dans la vie.

Tous sondés ?

Les sondages sont devenus fréquents. Grande est parmi nous la proportion de ceux qui, une fois ou l'autre, ont joué le rôle de sondés. Combien vaut cette proportion ? Là, l'affaire se corse. Pour déterminer un tel chiffre, la démarche naturelle est de procéder par un sondage, en interrogeant : «Avez-vous été sondé au moins une fois dans votre vie ?», question qui ne peut amener que la réponse : «Oui, maintenant.» À moins que quelqu'un n'imagine une astuce sublime pour contourner la difficulté ci-dessus, jamais nous ne connaîtrons la réponse à la question que je me posais.

Le Soleil a rendez-vous avec la Lune

Contrairement à celles des économistes ou des futurologues, les prévisions des astronomes sont fiables, et la Lune vaincra le Soleil le 11 de ce mois d'août. Au lieu d'en faire un triomphe «éclatant», elle manifesterait sa victoire en éteignant tous les flambeaux dans notre ciel afin de tout plonger, ici-bas, dans la plus noire obscurité. Qu'elle profite vite de sa supériorité : elle ne durera pas. Quelques minutes à peine, et la lune retrouvera, dans la hiérarchie céleste, son statut d'honorable seconde.

Ce sera le moment, pour ceux qui auront assisté à sa fugitive apothéose, de méditer sur un passage, certes plus poétique que scientifique, intitulé «La lune, symbole de l'homme», dû à l'écrivain espagnol Baltasar Gracián (1601-1658). Le voici. «Tout comme le soleil est le clair miroir de Dieu et de ses attributs divins, la lune l'est de l'homme et de ses humaines imperfections : tantôt, elle croît, tantôt, elle diminue ; elle naît, elle meurt ; la voilà battant son plein, puis battue dans son néant, n'ayant jamais d'état permanent. Elle n'a pas de lumière propre, elle n'est reflet que de celle du soleil et la terre l'éclipse quand elle s'interpose entre eux. Ses taches sont d'autant plus visibles qu'elle est plus claire : c'est la dernière des planètes par sa place et par son rang et par son être : elle a plus de pouvoir sur terre qu'au ciel. En sorte qu'elle est changeante, imparfaite, entachée, inférieure, pauvre, triste et tout son mal lui vient de son voisinage avec la Terre.»

Cœurs de lions

Accablé de protestations contre l'enfermement des fauves, le zoo de Vincennes a fermé la fauverie au public. À tort, affirme Jean-Pierre Digard, *Les Français et leurs animaux* (Fayard, 1999) : «De même que les lions et les tigres constituaient un spectacle pour les humains, ces derniers représentaient une distraction pour les fauves, au point que, depuis qu'ils en sont privés, ceux-ci souffrent de troubles de santé dus à l'ennui.»

Ce magazine vous intéresse !



Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actualités
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'environnement
- ☐ Le texte intégral des conférences du samedi

- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme des activités du Palais de la découverte

Je souscris un abonnement à la

REVUE DU PALAIS DE LA
DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque à l'ordre du

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
(CCP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)

Tarif étranger : 200 F

par mandat international uniquement

(par avion, supplément de 80 FF)

Abonnement de soutien : 230 F

Nom (M., Mme, Mlle) :

Prénom :

Adresse :

.....

Ville :

Code postal :

Profession :

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 0

JEU-CONCOURS N° 62

PIERRE TOUGNE

Palindromie

En littérature, un palindrome est mot qui peut se lire de gauche à droite et de droite à gauche comme non, têt, etc., mais ces mots sont rares. En mathématiques, on a la même notion pour les nombres : un nombre est dit palindromique s'il s'écrit de la même façon de gauche à droite et de droite à gauche comme 121, 273372... Ces nombres sont bien moins rares que leurs homologues littéraires et en inventer est un jeu d'enfant ! Les nombres eux-mêmes engendrent en général des palindromes par le procédé suivant : partant d'un nombre, on lui ajoute son «inverse», c'est-à-dire ce même nombre écrit de droite à gauche ; si le résultat est un palindrome, on s'arrête, autrement on recommence avec ce nouveau nombre jusqu'à l'obtention d'un palindrome. Ainsi partant de 49, on forme $49 + 94 = 143$, puis $143 + 341 = 484$ terminé. Le nombre d'itérations est en géné-

ral faible, mais même pour de petits nombres, il peut être assez grand comme pour 89 qui conduit au palindrome 8813200023188 qu'après 24 itérations. Enfin il existe quelques nombres comme 196 qui ne conduise jamais à un palindrome au moins expérimentalement, car on ne sait pas le démontrer. Il existe 13 nombres comme 196 inférieurs à 1 000 dont 689, 788, 879, 887, 978, 986. Pourriez-vous trouver les sept autres en n'utilisant simplement que 196 est l'un d'entre eux ? (pas d'ordinateur SVP).

Le phénomène n'est pas particulier à la base 10. En base 2, pouvez-vous trouver le plus petit nombre n'engendrant jamais un palindrome et le démontrer ?

Envoyez vos réponses aux questions à Pour la Science, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'août 1999, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 60

Il y avait bien des façons de parvenir à la répartition alternée homme-femme pour quatre et cinq couples. Les figures 1 et 2 ci-dessus montrent deux solutions particulières que je n'ai trouvées dans aucune réponse (la raison de ce choix apparaîtra plus tard). Je ne connais pas le nombre de solutions possibles. Deux lecteurs m'ont annoncé, pour quatre couples, 6 et 10 solutions et 22 et 32 solutions pour cinq couples (où est la vérité ?). La solution générale est intéressante, car elle peut se démontrer par récurrence. Supposons que l'on connaisse la solution pour n couples en n mouvements (en laissant les deux places vides à gauche). Pour $n + 4$ couples, on isole deux fois deux couples de part et d'autre (voir la figure 3) et l'on effectue les deux mouvements indiqués sur la figure 3. À ce stade, les n

couples centraux sont rangés alternativement en n mouvements (en laissant les deux places libres à gauche), puis on termine par les trois mouvements indiqués sur la figure, soit au total $2 + n + 3 = n + 5$ mouvements. Il suffit alors de trouver la solution pour $n = 4, 5, 6, 7$ qui est donnée sur les figures 1 et 2 pour $n = 4, 5$ les cas $n = 6, 7$ étant laissés au soin du lecteur. Ce jeu est une variante du «jeu de TAIT» qui consiste à placer $2n$ pions alternativement noir et blanc sur $2n + 2$ cases en ligne avec deux cases libres à droite.

Le but du jeu est de regrouper les pions de même couleur en déplaçant deux pions contigus vers les deux cases libres (ou libérées). Cela peut toujours se faire en n mouvements

$n > 3$, la lecture «à l'envers» des figures 1 et 2 montre une solution correcte pour n égal à 4, 5.



Figure 1

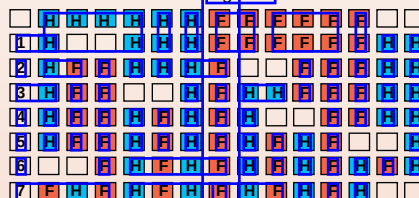


Figure 2

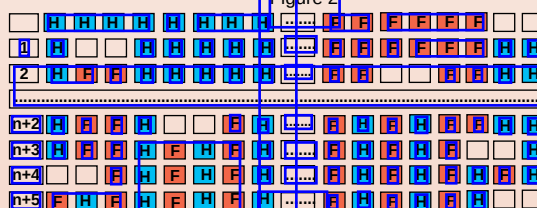


Figure 3



Pour un vrai dialogue

ROBERT DUCLUZEAU

Les conférences de citoyens doivent être suivies d'effet sous peine de perdre progressivement leur crédibilité politique.

En juin 1998, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques organisait, en France, la première conférence de citoyens sur l'utilisation des organismes génétiquement modifiés (OGM) en agriculture et en alimentation : un groupe de 14 citoyens a été choisi par des méthodes classiques d'échantillonnage pour représenter les diverses catégories socio-professionnelles du pays. Après deux jours d'information sur le sujet, ce groupe a auditionné des personnes favorables à l'utilisation des OGM ou opposées à cette utilisation. Puis, après une longue délibération, le groupe a élaboré un avis qui a été transmis au parlement.

Cet outil de dialogue entre les experts et les citoyens est-il utile ? Doit-on l'étendre à d'autres sujets sensibles ? Ses conclusions peuvent-elles être légitimement prises en compte par les pouvoirs publics pour fixer les grandes orientations de la recherche, voire interdire le développement de la recherche dans des champs jugés trop périlleux ?

De telles conférences sont mises en œuvre par les pays anglo-saxons depuis environ dix ans, sous des formes variées. Elles visent à combler le fossé qui s'est creusé entre la science et la société dans la plupart des pays industrialisés (notre pays ne fait pas exception : seulement quatre Français sur dix «font confiance aux scientifiques et aux experts»).

Ce fossé a été longuement analysé : l'abondance de résultats scientifiques nouveaux et la rapidité de leur application, ainsi que la difficulté de la communication scientifique à l'attention du grand public limitent l'appropriation des avancées scientifiques et techniques. L'utilisation industrielle de produits ou de techniques mal évalués a érodé la confiance du public. Enfin, les scientifiques se lancent avec réticence dans les débats publics : si nombre d'entre eux sont convaincus que les certitudes idéologiques sont d'un autre âge,

ils hésitent encore à débattre de leur activité, au nom de la liberté de la recherche et de la complexité de leurs travaux.

Le Danemark est le premier pays à avoir organisé le dialogue : depuis 1987, l'État danois a organisé plus de dix conférences sur les thèmes qui faisaient le plus hésiter le public : le génie génétique en agriculture et dans l'industrie, l'irradiation des aliments, les animaux transgéniques, la pollution de l'air, les transports...

Après la conférence sur le génie génétique, le parlement danois a décidé de ne plus financer de projets biotechnologiques sur l'animal ; après celle sur la cartographie du génome humain, il a voté une loi qui interdit les tests génétiques à l'embauche ou à la souscription d'une assurance. De même, les Pays-Bas et la Grande-Bretagne ont débattu des tests génétiques et des biotechnologies, tandis que la Suisse organisait un référendum sur l'utilisation des biotechnologies (une majorité de citoyens s'est déclarée en faveur de la poursuite des recherches).

L'expérience française de juin 1998 a montré que la neutralité et l'objectivité de l'information donnée avant l'audition des partisans et des détracteurs des OGM clarifie les débats. Les scientifiques sont capables d'expliquer clairement les faits et les enjeux, et les citoyens «ordinaires» comprennent parfaitement les notions complexes qui leurs sont exposées.

Comme le public refuse désormais que toute innovation soit acceptée comme inévitable, sans évaluation critique, je crois que les conférences de citoyens permettent à la fois de limiter la fracture entre la science et la société, et de rétablir la confiance du public. Sans être une panacée, elles sont inévitables. Comment les perfectionner ?

Notons premièrement que ces exercices de démocratie participative ne doivent pas se substituer à l'exercice de démocratie représentative : si l'on ne remplace pas les élections par des sondages, c'est bien parce que ces derniers sont insuffisants ; or le petit nombre de citoyens réunis dans

les conférences s'impose par la qualité de l'information qu'on veut leur donner.

Aussi les membres des parlements devront toujours se fonder sur des rapports circonstanciés. Les conférences de citoyens leur fourniront des avis populaires, tandis qu'elles conduiront les scientifiques qui participeront à ces conférences, comme ceux qui resteront dans leurs laboratoires, à prendre mieux conscience des conséquences variées de leurs activités.

Deuxièmement, l'objectif ne doit pas être de convaincre à tout prix un public qui doute du bien-fondé d'une nouvelle technique. Troisièmement, on devra éviter les ambiguïtés qui ont entaché l'expérience française : le public s'est peu intéressé au débat, parce que celui-ci s'est déroulé en pleine Coupe du monde de football et, surtout, parce qu'il arrivait deux ans après la tomate transgénique Calgène et en pleines tergiversations sur le maïs transgénique. Les conférences de citoyens devraient être organisées alors que les recherches sont en cours, afin de ne pas être ressenties comme des alibis d'État.

Quatrièmement les comités d'organisation et les experts impliqués dans l'information des citoyens doivent être indépendants des groupes de pression : l'information sur laquelle se fonde les jugements ne doit pas se confondre avec les options politiques.

Enfin les conférences servent-elles seulement à informer des instances décisionnelles ou doivent-elles avoir une légitimité pour influencer les choix et les priorités de ces instances ? Si on ne choisit pas la seconde option, la crédibilité des conférences de citoyens s'effondrera. Le succès des conférences danoises tient largement à ce que, dès la première, des avis exprimés ont été immédiatement intégrés dans le programme national de biotechnologie.

Robert DUCLUZEAU est microbiologiste et président du Centre INRA de Jouy-en-Josas.

Égarements (suite)

L'article de Guillaume Lecointre *Des scientifiques s'égarent...* (voir *Pour la Science*, mai 1999), continue de susciter des réactions. Notamment, Jean Staune et Bernard d'Espagnat ont écrit à *Pour la Science*. Retrouvez leurs lettres, et d'autres, sur le site Web : <http://www.pourlascience.fr>

Formation ou déformation ?

Les critiques sont toujours utiles, parfois stimulantes. Celles que Bernard Beauzamy porte sur la formation par la recherche (voir *La déformation par la recherche, Pour la science*, juin 1999) le seraient plus si elles étaient marquées de quelque nouveauté. Résumons-les : les jeunes docteurs émergent de leur thèse avec un sceau universitaire quasi indélébile qui les enferme dans leurs mondes clos d'où l'Entreprise est exclue. Certes, «la formation par la recherche est possible... et souhaitable dans le monde moderne», mais nos jeunes docteurs sont, le plus souvent «réfractaires au monde réel... incapables de présenter (leurs) résultats hors des cercles académiques», et proposent des solutions «inexploitables en l'état, (qui) finissent à la poubelle». Employer des docteurs dans sa propre entreprise – fussent «ceux (qu'il avait lui-même) formés» (!) – «a toujours été», pour notre auteur, «la même catastrophe». Pas étonnant, dans ces conditions, que «les entreprises se méfient des thésards». J'entends ces critiques, dont certaines sont bien entendu pertinentes, depuis bientôt quatre décennies, alors que les entreprises n'ont jamais recruté autant de docteurs que ces dernières années : 1 042 recrutements de docteurs dans les entreprises pour les thèses passées en 1995, 1 239 pour 1996, et 1 559 pour 1997 (Rapport sur les études doctorales, MENRT, décembre 1998).

Alors ? La réalité est en fait bien plus polychrome que celle, habillée d'un gris uniforme, dont B. Beauzamy nous brosse le tableau, et fort différente d'elle. Certes, existent encore de ces laboratoires fermés sur eux-mêmes, de ces patrons pour qui les thésards ne servent que de main-d'œuvre momentanée. Mais combien les mentalités ont changé pour qui-conque les a suivies depuis une vingtaine d'années ! S'il y a excès dans certains laboratoires universitaires, c'est parfois désormais d'avoir pris le virage des applications industrielles avec tant d'ardeur néophyte qu'il sont devenus des lieux de simple travail à façon. Ceux-ci, Dieu merci, sont rares, mais combien d'autres ont trouvé un bon équilibre entre travaux acadé-

miques et thèmes appliqués, combien désormais savent sensibiliser leurs thésards à une insertion professionnelle future, les envoyer passer un temps significatif dans un laboratoire étranger, les préparer à l'expression orale et les inciter à s'intéresser au travail des autres !

Dans ces changements de mentalité, beaucoup de facteurs sont intervenus. Je suis heureux que, dans le concert, l'Association Bernard Gregory ait joué sa partition, modeste peut-être, mais déterminée. L'ABG a œuvré, depuis une vingtaine d'années, non seulement à aider les jeunes docteurs, notamment universitaires (plusieurs centaines par an), à trouver un emploi dans les entreprises, ce qu'elle fait la main dans la main avec celles-ci ; mais aussi à informer les doctorants, à les sensibiliser à l'entreprise (je pense à son implication forte dans le système des «Doctoriales») ; à promouvoir les «chartes de thèses»..., le tout en partenariat avec le Ministère, les Universités, les écoles doctorales, les Grandes Écoles, les enseignants, les associations de doctorants... La voici qui étend son action vers les sciences humaines et sociales où les besoins sont considérables.

Mais l'action de l'ABG serait vaine, et nuls seraient ses dividendes, si la formation par la recherche – qu'elle a vocation de promouvoir – n'avait pas fait ses preuves. Dans sa manière d'inculquer l'initiative, le sens de la synthèse, l'autonomie, la patience et la rigueur, d'obliger à la communication, écrite et orale, d'apprendre à avancer dans un problème éventuellement mal défini et à mener un projet à son terme, la formation par la recherche joue un rôle irremplaçable. Elle donne aux entreprises de voir dans le jeune docteur – complémentaire de l'ingénieur – un élément fort de leur développement et de leur politique d'innovation. Un nombre croissant d'entre elles, grandes et moyennes, l'ont bien compris.

Yves QUÉRÉ, Président de l'ABG

Sous la Troisième République, à l'école primaire, on enseignait ce qu'était un prix de revient, un prix de vente, un bénéfice. Mais l'évolution des mentalités du corps enseignant, qui ne croyait plus à la promotion sociale faisant passer du statut d'employé à celui de petit artisan dirigeant deux compagnons, a supprimé ces notions des programmes et il est facile de trouver des doctorants qui ne savent pas la différence entre chiffres d'affaires et revenus. La technique de gestion des laboratoires où ils effectuent leur thèse n'étant pas une merveille de comptabilité analytique, les thésards n'étant d'ailleurs pas informés des problèmes correspondants, comment se plaindre de ce qu'ils n'aient pas des réflexes, même élémentaires, de gestion-

naires ? Ils ne sont pas déformés : ils ne sont pas formés, ce qui n'est pas la même chose.

C'est d'ailleurs pour remédier à cet état de choses que différentes initiatives ont été prises, par certains académiques, en accord avec le milieu des entreprises, comme par les pouvoirs publics eux-mêmes. Il y a plus de vingt-cinq ans que, à Grenoble comme à Saclay, puis à Orsay, les premières «Bourses de l'emploi des docteurs» furent créées ; ce fut suivi par un effort de généralisation de cette activité à la demande de Bernard Gregory, Délégué général à la recherche scientifique et technique, puis par son développement sous la direction de Pierre Aigrain, Ministre de la Recherche. Ce fut lui qui porta sur les fonds baptismaux l'Association Bernard Gregory en 1980. Et il faut remarquer que si, à l'époque, les entreprises recrutèrent leurs chercheurs principalement à la sortie des écoles d'ingénieurs, ce sont des docteurs qu'elles embauchent maintenant pour ces fonctions.

Mais, plus récemment, alors que les flux de production de docteurs représentent, sur la planète, trois fois les besoins académiques et deux fois ceux de l'ensemble des organisations de recherche et développement, publiques et privées, d'autres initiatives furent prises pour former les docteurs au monde extérieur à la tour d'ivoire. Ce furent essentiellement les Doctoriales®, semaines de sensibilisation des doctorants aux réalités de l'entreprise, expérimentées par l'ABG et la DGA, puis reprises comme un programme national par le Ministère de tutelle de la recherche. Aujourd'hui, la réforme des écoles doctorales a une composante importante dans le sens de la préparation aux carrières hors de l'Alma Mater.

Pierre AVERBUCH, Paris

Une affaire qui fait des vagues

La polémique scientifique suscitée par le tsunami survenu dans la baie de Nice en octobre 1979 (voir *Les tsunamis, Pour la Science*, juin 1999) n'est pas éteinte. Il y a eu mort d'homme, et la justice pénale a été saisie : l'instruction a été close par un non-lieu car un expert a montré, par l'analyse de témoignages, que le tsunami avait précédé l'effondrement du port en construction et que c'était l'abaissement brusque du niveau de la mer qui avait déstabilisé les remblais et les sols sous-jacents du port en construction, pas encore consolidés. Auparavant, des calculs avec deux modèles différents avaient montré que l'effondrement justifiait à peine le dixième de l'amplitude constatée du tsunami.

La catastrophe d'octobre 1979 est survenue au troisième jour de forte crue du Var. La charge sédimentaire en suspension a peut-être suffi à donner à l'eau douce chargée une densité supérieure à celle de l'eau de mer : le cours du fleuve se serait alors poursuivi au fond de la mer et aurait érodé les flancs instables du canyon du Var.

P. COUPRIE, Paris

Réponse de Philippe Heinrich

Je ne suis pas opposé à la thèse qu'un tsunami engendré au large aurait précédé l'effondrement de la digue et des sédiments sous-jacents, et de ce fait serait à l'origine de l'effondrement. Toutefois, elle ne fait pas l'unanimité, précisément en raison des contradictions entre les témoignages sur la chronologie des observations des vagues en différents points de la côte.

Les simulations numériques révèlent que l'effondrement de dix millions de mètres cubes de sédiments situés à proximité de la surface de l'eau engendre une vague de quelques mètres de hauteur localement, suffisante pour inonder les terrains situés en face de l'aéroport. Il n'a jamais été conclu que cet effondrement est à l'origine d'un tsunami. Bien au contraire, les simulations ont montré aussi que les vagues engendrées par cet effondrement n'expliquent pas le tsunami observé dans la Baie des Anges. Les modélisations que nous avons effectuées simulent des phénomènes hydrodynamiques, tels le déplacement d'un fluide par le mouvement d'une masse et la propagation d'ondes à la surface de l'eau. Elles ne permettent pas de conclure sur l'antériorité ou non de l'effondrement de la digue, ni sur la cause de cet effondrement.

L'origine de la vie

Pourquoi la vie a-t-elle plus de chances de venir d'une autre planète du Système solaire que de la Terre, alors qu'elles ont toutes à peu près le même âge (voir *Origine extraterrestre ?*, par C.-A. Roten, *Pour la Science*, juillet 1999)? Si elle vient d'un autre système planétaire, c'est un autre problème...

Frédéric MALHER, Paris

Réponse de C.-A. Roten

L'émergence de la vie est associée à l'existence d'une croûte planétaire solide. En son sein ou dans un océan, des molécules peuvent s'auto-organiser pour permettre l'apparition d'une première cellule. Tout corps orbitant autour du Soleil s'est formé il y a 4,6 milliards d'années. Suite au bombardement météoritique intense de l'ac-

création et à la chaleur émise par la fission des atomes radioactifs, les constituants de Mars et de la Terre se sont séparés pour former un noyau et un manteau. Par la suite, seule la chaleur émise par la fission nucléaire était suffisante pour empêcher la solidification d'une croûte planétaire. Comme Mars et la Terre ont une concentration d'atomes radioactifs similaire, Mars, plus petite, s'est refroidie plus rapidement car le rapport de sa surface à son volume est plus important que celui de notre planète. Mars, dont la surface s'est solidifiée avant celle de la Terre, a donc pu abriter les plus anciennes formes de vie du Système solaire.

Ginkgo costaud

Le *Ginkgo biloba* résiste à de nombreuses agressions (voir *La résistance des ginkgos*, *Pour la Science*, mai 1999) : il aurait même survécu à l'explosion atomique d'Hiroshima. Toutefois, ce n'est qu'à Kyoto que j'ai vu beaucoup de ginkgos le long des avenues. À Paris, malheureusement, je ne connais que celui du Jardin des Plantes.

Claude CARDOT, Gif sur Yvette

Réponse de T. T. Nguyen Tu et H. Bocherens

À Hiroshima, un *Ginkgo biloba* a effectivement survécu à la bombe atomique : ses feuilles ont repoussé au printemps suivant l'explosion bien que son appareil végétatif ait entièrement brûlé. L'implantation des ginkgos dans les villes est de plus en plus importante, non seulement au Japon, mais aussi en Europe. De nombreux boulevards et parcs de Tokyo sont plantés de ginkgos. À Paris, son implantation est plus récente : tous les marronniers bordant les avenues n'ont pas été remplacés par des ginkgos! Mais dès que des arbres sont à planter le choix est le plus souvent porté sur le ginkgo, par exemple au Musée de sculpture en plein air, sur le quai Saint Bernard.

Lettre codée

Dans l'article *Paiements sur l'Internet* (voir *Pour la Science*, juin 1999), Octavian Ureche et Réjean Plamondon écrivent : «Ce système est relativement sûr : en Europe, le protocole SSL chiffre les données avec des clés de 40 bits. Autrement dit, pour percer le code de chiffrement, il faudrait trouver les facteurs premiers d'un nombre de 40 bits (ou 10 chiffres), ce qui prendrait des jours à un ordinateur de bureau.» Je pense qu'il y a ici une confusion : la clé de 40 bits utilisée

est la clé d'encryptage symétrique (plus précisément, la partie secrète de cette clé, l'algorithme utilisé (RC4) étant de type «stream cipher», chaque message a une clé différente). Cette clé est encodée au moyen d'un algorithme à clé publique, utilisant une clé beaucoup plus grande. La factorisation d'un nombre de 40 bits (12 chiffres) prend moins d'une seconde...

Jacques WILLEKENS, Bruxelles

Réponse d'Octavian Ureche et Réjean Plamondon

Le protocole SSL implique plusieurs phases. Une première phase consiste en l'établissement du lien encrypté de communication entre le client et le serveur. Cette phase est elle-même formée de deux étapes : l'authentification du serveur et l'authentification (optionnelle) du client. La deuxième phase consiste en l'envoi proprement dit des données. Si la première phase utilise effectivement un chiffre asymétrique, notamment le chiffre RSA, la deuxième phase utilise un chiffre symétrique. Lors de la première étape de la première phase, en répondant à la demande du client, le serveur envoie son certificat et ses préférences d'encryptage (le chiffre à utiliser, etc.). Le client crée une clé de session (chaque session, et non pas chaque message lors d'une même session, ayant une clé différente) et l'envoie au serveur, encryptée avec la clé publique de ce dernier. Le serveur décrypte la clé de session et s'identifie en retournant un message authentifié avec la clé de session. Toutes les données seront par la suite encryptées et authentifiées avec cette clé de session. La clé de session utilisée par un algorithme d'encryptage symétrique tel que RC4 a une longueur de quelques dizaines de bits, 40 jusqu'à tout récemment, 128 depuis peu de temps. Même s'il n'est pas trop difficile de craquer des clés très courtes, la cryptanalyse n'est pas à la portée de tout le monde. Toutefois, ceci est en train de changer avec la puissance croissante des ordinateurs personnels accessibles à des prix dérisoires. C'est pour de telles raisons que de plus en plus de gouvernements allègent leurs politiques en matière de cryptographie pour passer à des clés plus longues, donc plus sûres.

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pouirlascience.fr. D'autres contributions de lecteurs sont sur le site Web à <http://www.pouirlascience.com>.

Gödel et les limites de la logique

JOHN DAWSON

Le mathématicien Kurt Gödel a consacré ses travaux à la rationalité, alors que sa vie privée en était parfois dépourvue.

Le personnage qui est représenté sur la photographie ci-dessus n'est pas connu du grand public. Pourtant, ses théorèmes d'incomplétude et ses autres résultats de mathématiques ou de logique ont ébranlé les mathématiques et l'informatique. Toute sa vie, il rechercha la rationalité, mais dut lutter contre une profonde fragilité mentale.

Gödel a démontré que les méthodes mathématiques utilisées depuis Euclide ne peuvent révéler toutes les propriétés de l'ensemble des nombres entiers naturels. Sa découverte, qui bouleversa les mathématiques créées au xx^e siècle, a relancé la recherche de nouvelles voies d'étude et provoqué un débat philosophique sur la nature de la vérité. Les techniques inventées par Gödel, qui sont applicables aux algorithmes de calcul, ont également posé les fondations de l'informatique moderne.

Gödel naît le 28 avril 1906 à Brno, à 180 kilomètres au Sud-Est de Prague, en République tchèque. Il est le cadet des deux enfants de Rudolf et Marianne Gödel, des Allemands expatriés dont les familles travaillaient pour l'industrie textile locale. La famille ne comptait pas d'intellectuels, et son père n'avait reçu qu'une formation en techniques commerciales. Toutefois, ce dernier était ambitieux et travailleur : il sera progressivement directeur, puis actionnaire d'une importante usine de textile de Brno. Suffisamment enrichi, Rudolf Gödel acquiert une maison dans un quartier chic et envoie ses fils dans des écoles privées de langue allemande, où tous deux font de brillantes études.

De toute sa scolarité primaire et secondaire, le jeune Kurt n'a qu'une seule fois une note inférieure au maximum – en mathématiques ! Pourtant, ses talents restent insoupçonnés, car, malgré son insatiable curiosité (il est surnommé Monsieur Pourquoi), il est introverti, sensible et

plutôt maladif. Vers l'âge de huit ans, il contracte un rhumatisme articulaire aigu qui, bien que sans séquelles physiques, l'éloigne de l'école assez longtemps. Cette maladie est probablement l'une des causes de son hypochondrie.

L'INTROVERTI

En 1924, diplômé du lycée technique de Brno, Gödel quitte son pays natal pour l'Université de Vienne, où son frère a commencé ses études de médecine quatre ans plus tôt. Après la Première Guerre mondiale et la chute de l'empire austro-hongrois, Vienne est en ruine,

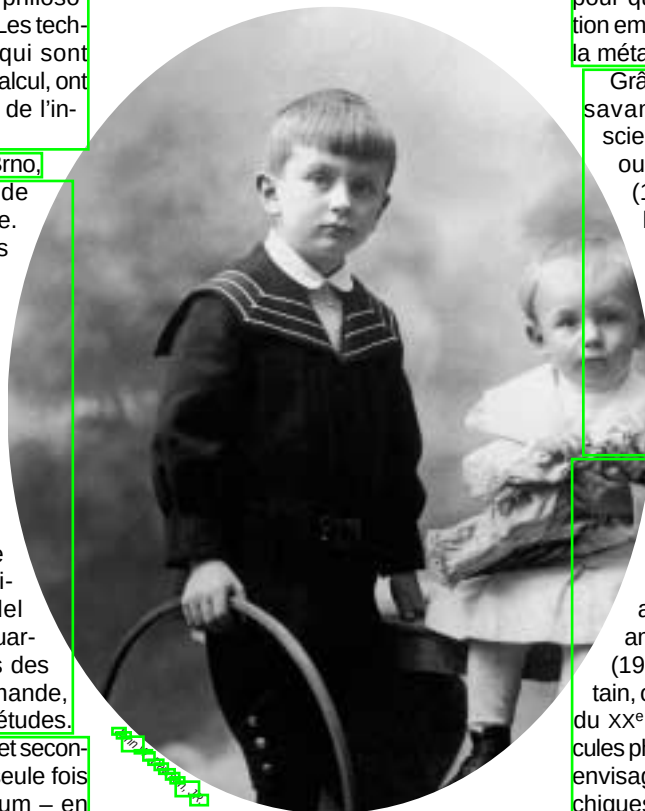
mais le prestige de l'Université est intact. Ainsi, malgré les privations matérielles, la Vienne de l'entre-deux-guerres est un centre scientifique littéraire et philosophique très actif.

Initialement inscrit en physique, Gödel s'oriente vers les mathématiques dès qu'il a suivi les cours de Phillip Furtwängler et de Hans Hahn (1879-1934). Il est vite remarqué : deux ans seulement après son arrivée, il est invité dans le groupe de travail fondé en 1924 par Hahn et par le philosophe néo-positiviste Moritz Schlick (1882-1936). Ce groupe, qui deviendra le Cercle de Vienne, est inspiré des écrits d'Ernst Mach (1838-1916), rationaliste pour qui seules la logique et l'observation empirique ont une valeur explicative ; la métaphysique est écartée.

Grâce au Cercle, Gödel rencontre des savants tels que le philosophe des sciences Rudolf Carnap (1891-1970) ou le mathématicien Karl Menger (1902-1985). Il se familiarise avec la logique mathématique et la philosophie, et, en particulier, avec les écrits de Ludwig Wittgenstein (1889-1951), dont la réflexion sur l'aptitude du langage à parler de lui-même a peut-être poussé Gödel à explorer les problèmes équivalents en mathématiques.

Avec certains membres du Cercle, dont Carnap, Hahn et le physicien Hans Thirring, il s'intéresse également aux phénomènes parapsychologiques. Des années plus tard, il confiera à son ami économiste Oskar Morgenstern (1902-1977) que, dans un futur lointain, on s'étonnera que les scientifiques du xx^e siècle aient découvert les particules physiques élémentaires, sans même envisager la possibilité de facteurs psychiques élémentaires.

Cependant, Gödel ne partage pas la vision philosophique positiviste du Cercle. Il est platonicien : en dehors des objets, un monde de concepts existe, accessible



1. LES DEUX FRÈRES GÖDEL, Kurt (à droite) et Rudolf étaient très proches ; ils se sont peu à peu éloignés à l'âge adulte. Ce cliché de studio date de 1908.

par l'intuition. Ainsi, toute proposition a une « valeur de vérité » (être vraie ou être fausse), que cette valeur ait été établie ou non par les mathématiciens ou par un moyen expérimental. Il admettra ultérieurement que cette philosophie a facilité ses intuitions mathématiques.

Observateur attentif et brillant, Gödel s'exprime rarement lors des discussions du Cercle, sauf lorsqu'elles concernent les mathématiques. Timide et solitaire, il a peu d'amis intimes (cependant, il apprécie la compagnie des femmes, qui le trouvent séduisant). Après 1928, il délaisse peu à peu le groupe et s'investit dans un séminaire de mathématiques organisé par Menger. Gödel participe à la publication annuelle des actes ; il publiera ainsi une dizaine d'articles.

UN GÉNIE RÉSERVÉ

C'est l'époque à laquelle Gödel acquiert une réputation internationale en logique mathématique, notamment grâce à deux articles : sa thèse, soutenue à l'Université de Vienne en 1929 et publiée l'année suivante, et son traité *Sur les propositions formellement indécidables des Principia Mathematica et des systèmes apparentés*, publié en allemand en 1931 et présenté comme thèse d'habilitation à l'enseignement en 1932. Dans les *Principia Mathematica* de Bertrand Russell (1872-1970) et d'Alfred Whitehead (1861-1947), les auteurs proposent la logique comme fondement des mathématiques. Ils résolvent un problème posé en 1928, par David Hilbert (1862-1943) et par Wilhelm Ackermann (1896-1962) dans leurs *Fondements de la Logique théorique* : Hilbert et Ackermann y énoncent des règles de manipulation d'expressions logiques composées de connecteurs (et, ou...), de quantificateurs (pour tout, il existe...), et de variables (nombres, propositions, ensembles...). Les règles de manipulation admises ajoutées aux axiomes d'une théorie mathématique permettent-elles de déduire toutes les propositions vraies pour toute structure vérifiant les axiomes ? Plus simplement, peut-on démontrer tout ce qui est vrai pour toutes les interprétations des symboles ?

La réponse attendue était oui, et Gödel le confirme dans sa thèse intitulée *La complétude du calcul des prédicats du premier ordre*, où il établit que les principes de la logique prouvent tout ce qui est vrai à partir d'un ensemble d'axiomes donné. Cependant, il ne démontre pas que les axiomes alors admis pour la théorie des nombres permettent de démontrer toutes les propositions à propos des nombres. Les axiomes de la théorie des nombres avaient été proposés par le

mathématicien italien Giuseppe Peano (1858-1932) en 1889 ; ils incluent l'axiome de récurrence, qui affirme que toute propriété vraie pour zéro, et vérifiée par le nombre $n+1$ lorsqu'elle est vraie pour le nombre n , est vraie pour tout entier naturel. Cet axiome semble évident, mais il gêne les mathématiciens parce qu'il concerne les propriétés des nombres plutôt que les nombres eux-mêmes : c'est un axiome du second ordre, qui semble trop éloigné des nombres pour définir ces derniers. De la même manière, savoir qu'un ballon est bleu n'indique pas ce qu'est un ballon.

L'axiome de récurrence avait été reformulé sous la forme d'un groupe infini d'axiomes identiques, qui se rapportaient à des formules spécifiques plutôt qu'aux propriétés générales des nombres. Malheureusement, le logicien norvégien Thoralf Skolem avait démontré que ces axiomes ne caractérisent pas seulement des nombres naturels : ils sont également vérifiés par d'autres structures nommées entiers non standards.

Le théorème de complétude de Gödel indique que l'on peut démontrer toutes les propositions qui découlent des axiomes ; cependant une proposition qui est vraie pour les nombres naturels, mais fausse pour un autre système d'éléments qui vérifient les mêmes axiomes, est alors indémontrable (voir l'encadré). Les mathématiciens dédaignent la restriction en espérant qu'il n'existe pas d'entités similaires aux nombres.

L'article que Gödel publie en 1931 bouleverse alors les mathématiques. Il

montre que certaines propositions vraies pour les nombres naturels sont indémonstrables : il existe des objets qui vérifient les axiomes de la théorie des nombres, mais se comportent différemment à d'autres égards. En prenant toutes les propositions vraies pour axiomes, on contournerait ce « théorème d'incomplétude » ; mais alors comment savoir si les propositions sont vraies ? Gödel montre que, lorsque les axiomes sont décrits par un ensemble de règles mécaniques, le choix des axiomes n'évite pas la difficulté : quand elles sont vraies pour les nombres naturels, d'autres propositions vraies sur ces nombres restent indémonstrables.

Par exemple, lorsque les axiomes ne se contredisent pas mutuellement, cette non-contradiction, correctement codée en une proposition numérique, est formellement indécidable, c'est-à-dire ni démontrable ni réfutable à partir des axiomes. La démonstration de la non-contradiction nécessite donc des principes plus puissants que les axiomes eux-mêmes.

Ce dernier résultat ruine le programme de David Hilbert, qui voulait renforcer les fondements des mathématiques et déduire la cohérence des théories mathématiques complexes de celle de théories plus simples. Pour Gödel, en revanche, les théorèmes d'incomplétude ne réfutent pas l' inanité de la méthode axiomatique, mais ils montrent que la démonstration de théorèmes ne peut être complètement mécanisée et ils justifient l'intuition en mathématique.



2. LE COUPLE ADELE PORKERT ET KURT GÖDEL était très uni. Ils sont ici à la terrasse d'un café de Vienne, pendant leurs longues fiançailles. Adèle Porkert protégeait Gödel de ses pairs irrationnelles et était souvent la seule personne à pouvoir le convaincre de manger. Plus que quiconque, elle a contribué à le maintenir en vie et en état de travailler.

Les concepts et les méthodes introduits par Gödel sont au centre de la théorie de la récurrence, centrale en informatique. Ses idées sont à l'origine de nombreux résultats sur les limites des procédures informatiques, par exemple, sur le caractère indécidable de la durée d'exécution des programmes : pour une donnée d'entrée et un programme fixé, un ordinateur s'arrêtera-t-il finalement, en produisant une donnée de sortie, ou finira-t-il dans une boucle infinie ? De même, aucun programme ne peut détecter tous les programmes qui modifient le système d'exploitation d'un ordinateur (les virus, par exemple) sans modifier lui-même ce système.

LE REFUGE AUX ÉTATS-UNIS

Gödel passe l'année universitaire 1933-1934 à l'Institut des études avancées de Princeton, où il enseigne son théorème d'incomplétude. Une «dépression nerveuse» peu après son retour à Vienne

l'empêche d'y retourner l'année suivante. Guéri à l'automne 1935, il part l'année d'après, mais il rechute un mois après son arrivée et ne reprend son enseignement qu'au printemps 1937, à Vienne.

Tant qu'on ne disposera pas du dossier médical de Gödel (il était suivi par un psychiatre de Princeton), la maladie de Gödel restera mystérieuse. Elle commence par une hypocondrie : obsédé par son régime et sa digestion, il note quotidiennement, pendant plus de 20 ans, sa température et sa consommation de magnésie. Il redoute initialement un empoisonnement accidentel, mais, vers la fin de sa vie, il craint qu'on ne veuille le tuer en l'empoisonnant. Il cesse presque de s'alimenter, tandis qu'il prend de nombreuses pilules contre une maladie cardiaque imaginaire.

En dehors des crises aiguës, la capacité de travail de Gödel est peu perturbée par ses problèmes mentaux. Il est soutenu par Adèle Porkert, qu'il a rencontrée dans une boîte de nuit de Vienne, pendant ses études. Son aînée de six ans,

Adèle est catholique, divorcée, danseuse de profession. Les parents de Gödel la jugent dépravée, mais le couple est très uni, et elle l'aide souvent à surmonter sa peur grandissante de l'empoisonnement en jouant le rôle de goûteuse. Ils se marient en septembre 1938, juste avant le retour de Gödel en Amérique, où il doit présenter ses nouveaux résultats en théorie des ensembles à Princeton et à l'Université de Notre-Dame.

Ces résultats résolvent des questions anciennes. À la fin du XIX^e siècle, le mathématicien allemand Georg Cantor (1845-1918) a trouvé un moyen de comparer la taille des ensembles infinis : on apparie les éléments de l'ensemble A et ceux de l'ensemble B ; si cet appariement laisse des éléments de A non appariés, alors l'ensemble A est plus grand que l'ensemble B . Ainsi Cantor a démontré que l'ensemble des nombres naturels est plus petit que l'ensemble des nombres réels. De plus, il a supposé qu'aucun ensemble de taille intermédiaire n'existe : c'est l'hypothèse du continu.

En 1908, Ernst Zermelo (1871-1953), compatriote de Cantor, a formulé une liste d'axiomes pour la théorie des ensembles. Parmi cette liste figure l'axiome du choix, qui stipule que, si l'on considère une collection infinie d'ensembles disjoints, qui contiennent chacun au moins un élément, on peut former un ensemble en retenant un élément de chaque ensemble de la collection. Malgré son apparente évidence, l'axiome du choix a des conséquences paradoxales. Par exemple, si on l'accepte, on doit aussi admettre qu'une sphère est décomposable en un nombre fini de morceaux que l'on peut séparer et rassembler en une nouvelle sphère de volume double de la première.

L'axiome du choix est très controversé : les mathématiciens contemporains de Gödel soupçonnent, à juste titre, que ni l'axiome du choix ni l'hypothèse du continu ne peuvent être déduits des autres axiomes de la théorie des ensembles. Ils craignent que l'utilisation de ces théorèmes dans des démonstrations ne mènent à des contradictions. Cependant, Gödel démontre que les deux axiomes sont cohérents avec les autres.

Les résultats de Gödel en théorie des ensembles répondent à une question posée par Hilbert en 1900 lors du Congrès international des mathématiciens. Malgré leur importance, ils ne lui procurent pas un poste permanent. Pendant son année passée à Princeton et à l'Université de Notre-Dame, son autorisation d'enseigner dans les universités autrichiennes lui est retirée. Pendant l'été 1939, alors qu'il rejoint sa femme à Vienne, il est convoqué pour un examen médical militaire, et déclaré apte au service dans les forces armées nazies.

Les propositions indécidables

Le résultat le plus célèbre de Gödel concerne des propositions sur les nombres naturels, vraies mais indémonstrables dans l'arithmétique. La phrase réflexive suivante est un exemple simple de propositions vraies, mais indécidables, c'est-à-dire ni démontrables ni réfutables :

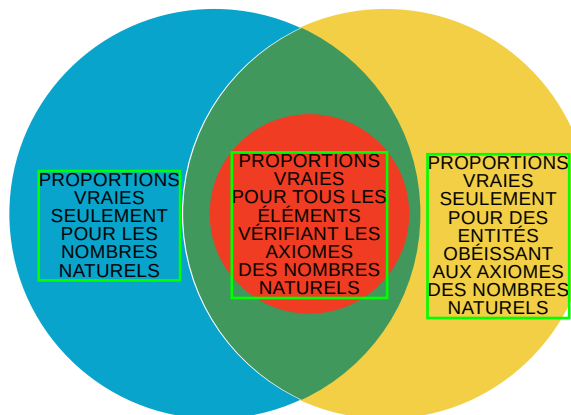
«Cette proposition est indémontrable.»

Elle peut être transformée en un nombre selon une méthode mise au point par Gödel. Ensuite, on montre d'une part que si cette proposition est démontrable, sa négation l'est aussi : elle est donc indémontrable. D'autre part, on prouve qu'elle est néanmoins vraie.

Les équations polynomiales conduisent à des propositions un peu plus compliquées. Par exemple, l'affirma-

tion que certaines équations polynomiales n'ont pas de racines (c'est-à-dire de solutions) entières est indécidable.

Gödel a démontré que les axiomes qui définissent les nombres entiers naturels sont incomplets : certaines propositions vraies de la théorie des nombres sont indémonstrables à l'aide de ces axiomes. Sa démonstration montre, par conséquent, qu'il existe des entités, nommées entiers non standards, différentes des nombres naturels qui obéissent néanmoins à ces axiomes. Comme tout ce qui est démontré à partir des axiomes (*en rouge*) s'applique à toutes les entités qui obéissent aux axiomes, certaines propositions vraies concernant les nombres naturels (*en bleu*, *en vert* et *en rouge*) sont nécessairement indémonstrables (*en bleu et en vert*).



Brian Christie

Jusqu'alors Gödel s'est peu soucié de la tournure inquiétante des événements en Europe. Il s'est intéressé à la politique et à l'actualité, mais les événements l'ont peu ému. Son isolement l'a peut-être empêché de mesurer la gravité des événements. Il s'intéresse peu à ses collègues et professeurs, dont beaucoup sont juifs, et reste concentré sur ses travaux pendant que le monde s'écroule autour de lui. Avec sa convocation de l'armée, l'Histoire le rattrape.

Désespéré, sans emploi et menacé par l'incorporation imminente, il demande le soutien de l'Institut des études avancées et obtient des visas de sortie. En janvier 1940, le couple fuit vers l'Est à bord du Transsibérien. Puis, de Yokohama, ils embarquent pour San Francisco et atteignent enfin Princeton par le train à la mi-mars.

DES PHOBIES GRANDISSANTES

Gödel ne quittera plus les Etats-Unis. Après plusieurs contrats annuels, il n'est engagé de façon définitive qu'en 1946. Deux ans plus tard, il prend la nationalité américaine. À cette occasion, le juge qui lui demandait son opinion sur la constitution des États-Unis se voit affligé d'un long discours sur les incohérences logiques de ce système. C'est seulement en 1953 que Gödel est nommé professeur, alors qu'il est également élu membre de l'Académie américaine des sciences. On craignait sa maladie mentale : ne disait-il pas partout que des gaz toxiques fuyaient de son réfrigérateur ? Pendant ces années, son ami Albert Einstein s'occupe de lui de son mieux, notamment par des promenades quotidiennes. Leurs conversations apaisaient Gödel.

À son arrivée aux États-Unis, Gödel abandonne la théorie des ensembles pour se consacrer à la philosophie et à la relativité. En 1949, il montre que des univers où le voyage vers le passé est possible sont compatibles avec les équations d'Einstein. En 1950, il présente ces résultats au Congrès international des mathématiciens et, l'année suivante, il donne la prestigieuse conférence Gibbs à la réunion annuelle de l'Association mathématique des États-Unis. Entre ces deux discours, il frôle la mort, parce que sa méfiance envers les médecins lui a fait négliger un grave ulcère.

Le dernier article publié de Gödel paraît en 1958. Il se renferme ensuite progressivement sur lui-même, et, de plus en plus amaigri, devient paranoïaque et hypocondriaque. Sa dernière apparition en public date de 1972, quand l'Université Rockefeller le fait docteur *honoris*



3. LES PROMENADES AVEC EINSTEIN dans le parc de l'Institut des études avancées de Princeton étaient un des rites qui maintenaient Gödel en activité. Cette photographie date de 1954.

causa. Trois ans plus tard, quand on lui décerne la Médaille américaine des sciences, il n'assiste pas à la cérémonie, pour raison de santé.

Le 1^{er} juillet 1976, quand Gödel atteint l'âge de la retraite (70 ans), il est nommé professeur émérite de l'Institut. Toutefois sa femme, qui l'a tant materné, est handicapée par un accident vasculaire cérébral qui l'a frappée quelques mois auparavant. Il prend soin d'elle avec dévouement jusqu'en juillet 1977, lorsqu'elle est opérée d'urgence et hospitalisée pendant près de six mois.

À ce moment, Morgenstern, l'ami qui a pris la relève d'Einstein après la mort de celui-ci en 1955 pour s'occuper de Gödel, meurt d'un cancer. Gödel se retrouve seul avec sa paranoïa grandissante, et décline rapidement. Par peur d'un empoisonnement, il cesse de s'alimenter, et il meurt le 14 janvier 1978.

Adèle Gödel survit trois ans à son mari. À sa mort, le 4 février 1981, elle lègue les droits des articles de Gödel à l'Institut des études avancées. La population hautaine de Princeton l'a toujours tenue à l'écart, mais elle était fière des travaux de son mari et elle savait que, sans son soutien, il n'aurait pas pu les mener à bien.

Gödel a publié très peu d'articles de son vivant (Bernard Riemann est le seul grand mathématicien qui ait publié moins) ; cependant leur impact a été énorme. Certains de ses articles, qui étaient écrits à la main, en gothique, ont été récemment traduits et publiés dans le troisième volume de ses *Œuvres complètes*. Leur contenu, par exemple sa formalisation de la « preuve ontologique » de l'existence de Dieu, intéressent aujourd'hui l'attention jusqu'aux non-mathématiciens.

John DAWSON est professeur de mathématiques à l'Université de Pennsylvanie ; il est l'un de ceux qui ont assuré l'édition des *Œuvres complètes* de Gödel.

Ernst NAGEL, James NEWMAN, Kurt GÖDEL et Jean-Yves GIRARD, *Le théorème de Gödel*, Le Seuil, 1997.

Douglas R. HOFSTADTER, *Gödel, Escher, Bach*, Interéditions, 1998.

Kurt GÖDEL, *Collected Works*, vol. 1-3, sous la direction de Solomon Feferman et al., Oxford University Press, 1986, 1990, 1995.

John W. DAWSON, *Logical Dilemmas : The Life and Work of Kurt Gödel*, A.K. Peters Ltd., Wellesley, Mass., 1997.



Le verre à vin

HERVÉ THIS

Le même verre convient aux vins blancs et aux vins rouges.

Les adeptes de la dive bouteille se passent rarement d'un verre. Un verre, mais lequel ? Des générations de gourmets ont débattu de la meilleure forme, de la meilleure taille, mais l'Institut national des appellations d'origine (INAO) a imposé un verre dit ISO, au calice environ deux fois plus haut que large. Est-ce le meilleur ? Comme les dégustateurs allemands prônaient un verre plus rond, Ulrich Fischer, du Département d'œnologie de Neustadt, et sa collègue Britta Loewe-Stanienda ont exploré l'intensité des perceptions des arômes dans des verres de diverses tailles et formes.

L'intervention des organismes de normalisation a harmonisé les dégustations, avant que l'on connaisse l'importance exacte de la forme ou de la taille sur la perception. C'est pour des raisons d'usage que l'on sert le vin rouge dans des verres plus volumineux que ceux qui sont utilisés pour les vins blancs, les moelleux dans des calices à ouverture plus large que ceux destinés aux vins secs.

Avant d'étudier l'effet de la forme des verres, les chercheurs allemands en ont cherché les raisons physico-chimiques. La physique sait que la pression de vapeur d'une molécule dissoute dans un liquide dépend du solvant, du soluté et de la température ; on sait aussi que les molécules passées en phase gazeuse dans le verre diffusent dans l'air environnant à une vitesse qui dépend de l'ouverture du verre. Le dégustateur capte les molécules volatiles passées en phase gazeuse quand il hume l'air présent dans le calice, mais il enchaîne souvent plusieurs inspirations. Les molécules aromatiques ont-elles alors le temps de passer à nouveau en phase gazeuse ? Pour le savoir, les chercheurs allemands ont utilisé la chromatographie en phase gazeuse pour analyser l'air qui surmonte le vin, à différentes hauteurs et à différents temps après le versement du vin dans le verre ; une quarantaine de

composés a été étudiée, à différentes températures.

On savait que la vitesse de libération des molécules aromatiques dépend de leur constitution chimique, mais d'autres différences sont apparues : la vitesse de libération des esters varie bien moins, selon la température, que la vitesse de libération des alcools ou des phénols volatils. Ce phénomène explique pourquoi, quand les vins sont consommés froids, les esters se

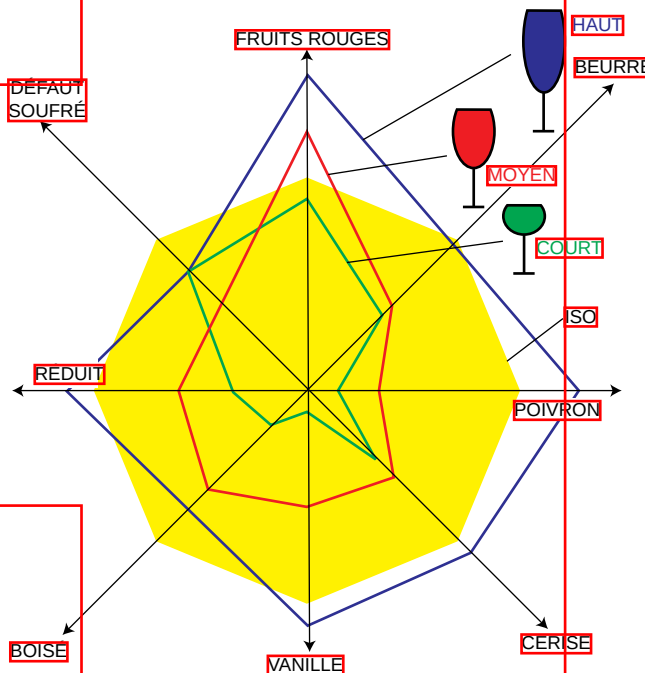
pas vouloir sentir le vin à moins de 15 secondes d'intervalle s'ils veulent des sensations reproductibles. Ils auront les sensations les plus fortes s'ils hument l'air à proximité de l'ouverture du verre.

Ayant ainsi précisé les conditions de dégustation, les chercheurs ont fait tester à des dégustateurs dix verres ayant différents diamètres maximaux, hauteurs et diamètres d'ouverture ; les dégustateurs devaient noter l'intensité d'une dizaine de notes (beurrée, florale, fruits rouges...) pour chaque verre.

Ces expériences ont été riches d'enseignements : par exemple, avec des vins blancs, la forme étroite du calice fait plus ressortir le caractère réduit (une odeur tendant vers celle de chou) ou le caractère soufré des vins que le calice du verre ISO ; les verres ayant une petite et une moyenne hauteur de calice produisent des sensations plus faibles que les verres étroits ; l'augmentation du volume du calice ne réduit pas l'intensité des perceptions ; les verres ayant le calice et l'ouverture les plus larges, qui sont réputés particulièrement appropriés pour la dégustation des vins rouges, ne sont pas supérieurs au verre ISO, qui a un calice assez étroit...

Trois découvertes, surtout, bouleversent l'œnologie : d'abord, l'intensité de toutes les perceptions change avec le type de verre. D'autre part, l'augmentation de la hauteur du calice

et du rapport entre l'ouverture et le diamètre maximal du calice intensifie toutes les perceptions. Enfin, contrairement à ce qui est prétendu par de nombreux fabricants, les verres qui donnent les meilleurs résultats pour la dégustation des vins blancs sont aussi ceux qui favorisent la dégustation des vins rouges. Un dogme tombe.



Perception de huit notes aromatiques dans des verres de diamètre égal à celui du verre ISO, mais de diverses hauteurs. Sur chacun des huit axes, un point représentatif éloigné de l'origine correspond à une perception intense.

concentrent plus rapidement que les alcools ou les esters, stimulant la perception des notes fruitées. Est-ce aussi la raison pour laquelle on boit les vins blancs plus frais que les vins rouges ? Les esters fruités, qui dominent souvent le bouquet des vins blancs, sont rapidement présents en quantités suffisantes à basse température, tandis qu'il faut servir les vins rouges plus chauds, afin de percevoir suffisamment les phénols volatils.

Au total, les mesures montrent que les gourmets seront bien avisés de ne

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 30 août 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Circulation des billets et conjoncture

L'arrivée de l'euro modifie la mise en circulation des billets.

Chaque année, la Banque de France met en circulation 700 millions de nouveaux billets. Comment estime-t-elle la somme à mettre en circulation et la répartition des différentes dénominations ? En se fondant sur le comportement passé des consommateurs et sur des événements conjoncturels, comme l'arrivée de l'euro.

Les modalités de remplacement des billets diffèrent selon le type de remplacement. Dans les années 1980, la France a une seule gamme de billets. Le remplacement est alors régulier : on remplace les billets abîmés et on en ajoute éventuellement. À partir de 1990, la gamme de billets change : une nouvelle gamme, plus sûre vis-à-vis de la contrefaçon, est introduite. On procède alors comme précédemment, mais on remplace progressivement l'ancienne gamme.

Chaque année, les flux de billets sont supérieurs à la quantité de billets en circulation : à un instant donné, un peu plus d'un milliard de billets circulent (1,311 milliard, fin 1998), mais 4,5 milliards de billets rentrent à la Banque de France et autant en sortent. Pourquoi ne pas changer l'intégralité des billets ? Car le coût du tri reste inférieur d'un tiers au coût de fabrication d'un nouveau billet (un franc par billet).

Chaque fois que des billets rentrent, ils sont triés par des machines. Une partie des billets, sales ou détériorés, sont automatiquement rejetés et broyés ou incinérés. La durée de vie des billets est la durée moyenne entre le moment où un billet neuf est mis en circulation par la Banque de France et le moment où, trop abîmé, il est détruit. Cette durée diffère grandement selon la dénomination du billet. Si elle est courte pour le billet de 20 francs (9 mois) et le billet de 50 francs (14 mois), elle atteint six ans pour les coupures de 500 francs.

Chaque année, la Banque détruit ainsi près de 700 millions de billets, d'où une mise en circulation de billets neufs à peu près équivalente. Pour décider la quantité des différentes dénominations à imprimer et à mettre sur le marché, les économistes se fondent sur

un modèle qui prend en compte la consommation des ménages, le taux d'inflation et les tendances des années précédentes.

Les modélisateurs sont attentifs à ces tendances, car de faibles variations requièrent parfois des changements drastiques de la production. Aujourd'hui par exemple, la part des coupures de 500 francs dans la circulation fiduciaire augmenterait légèrement, d'où une diminution importante des prévisions de production pour les billets de 100 francs et de 200 francs, car il faut 5 billets de 100 francs et 2,5 de 200 francs pour un billet de 500 francs.

Notons que les tendances varient avec la saison et la géographie : à la fin de l'année, la mise en circulation des billets augmente de cinq pour cent en raison des étrennes, traditionnellement données en billets. De même, la Banque de France met plus de billets en circulation durant les mois d'été dans le Sud de la France, lieu privilégié de villégiature.

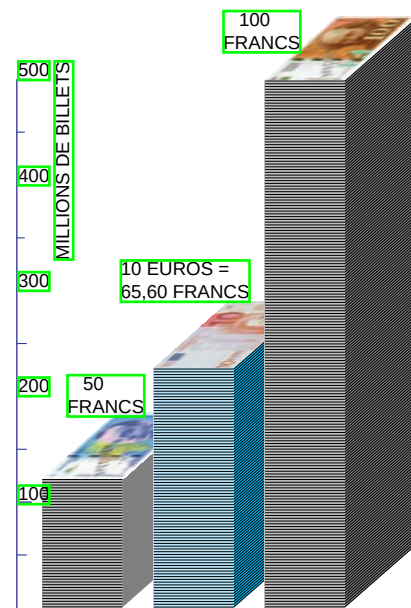
L'approche de l'an 2000 pose également de sérieux problèmes de gestion : les analystes prévoient qu'avec la crainte du bogue informatique, les consomma-

teurs stockent plus de billets pour pouvoir payer les achats, en cas de dysfonctionnement des systèmes de paiement électronique (cartes bancaires, virements, etc.). Heureusement, la Banque de France a d'importants stocks de billets libellés en francs.

Ces stocks ont une double raison. D'une part, la Banque de France possède de nombreuses succursales, ce qui nécessite de plus grosses réserves que si elle ne disposait que d'un ou deux sites de stockage et de distribution. D'autre part, la capacité d'impression des presses à billets françaises est de l'ordre d'un milliard deux cents millions de billets par an. Or, le changement de monnaie pour l'euro nécessitera un remplacement rapide et massif de l'ensemble des billets : on prévoit qu'un stock de 2,5 milliards de coupures sera indispensable pour le lancement de l'euro en France, prévu pour le 1^{er} janvier 2002. Afin de constituer cette réserve, les presses à billets françaises n'imprimeront plus que des coupures en euros à partir d'octobre 1999. Pour cette raison, les billets en francs qui seront mis en circulation en 2000 et 2001 ont déjà été imprimés. Au grand dam des collectionneurs, il n'y aura pas de billets en francs millésimés 2000 ou 2001!

Les dénominations des billets en euros étant différentes de celles en francs, les économistes ont été confrontés à un problème nouveau. Combien les consommateurs utiliseront-ils de billets de 20 euros par exemple, somme qui correspond à 131,19 francs ? Ils estiment que ce nombre sera la moyenne pondérée du nombre de billets de 100 francs et du nombre de billets de 200 francs utilisés, pondération obtenue par la distance entre ces valeurs et 131 francs. Pour le billet de 500 euros, qui correspond à plus de 3 000 francs, cette méthode n'est pas utilisable. Combien les français utiliseront-ils de billets de ce montant ? La question reste ouverte.

Il semblerait que le nombre des billets de chaque dénomination soit déterminé de façon pragmatique. Que cherche-t-on à minimiser, s'interroge le consommateur : le nombre de billets en circulation, le nombre de coupures que nous avons en portefeuille, le nombre de pièces et de billets pour payer les denrées les plus fréquemment achetées ? Les mathématiciens pensent-ils qu'il existe une solution optimale en fonction de la valeur des objets et de la fréquence de leur achat ?



Quelle quantité de billets de dix euros (65,60 francs) faut-il imprimer, puisque cette dénomination n'a jamais été utilisée en France ? On suppose que ce sera la moyenne du nombre de billets en francs les plus proches (50 et 100 francs) pondérée par la proximité de ces sommes à 65,60 francs. Pour une circulation annuelle de 120 millions de billets de 50 francs et de 500 millions de billets de 100 francs, on estime le nombre de billets de dix euros nécessaires à 220 millions.

L'écho des forêts

Une fleur d'Amérique Centrale attire les chauves-souris en réfléchissant les ondes sonores en direction de l'animal.

Les mammifères et les plantes à fleurs se reproduisent lorsqu'une cellule sexuelle mâle (spermatozoïde ou grain de pollen) fusionne avec un ovule de femelle. Alors que, chez les mammifères, les deux cellules se rencontrent quand deux individus, mobiles, de sexe opposés s'accouplent, les fleurs utilisent des vecteurs de pollinisation qui transportent le pollen des étamines de l'une à l'organe femelle, le pistil, de l'autre. Certaines de ces fleurs ont adopté des stratégies pour attirer l'agent de pollinisation. Par exemple, l'orchidée *Ophrys apifera* imite les signaux olfactifs, visuels et tactiles produits par de petites abeilles solitaires femelles, et provoque chez les abeilles mâles des tentatives d'accouplement pendant lesquels ils recueillent du pollen qu'ils véhiculent vers une autre orchidée leurre. Dagmar et Otto von Helversen, de l'Université d'Erlangen en Allemagne, ont montré que les fleurs *Mucuna holtonii* attirent leurs pollinisateurs, des chauves-souris de l'espèce *Glossophaga commissarisi*, avec un pétale adapté qui renvoie les ondes sonores vers l'animal qui les a émises.

Mucuna holtonii, que l'on rencontre en lisière de forêt ou au bord des ruisseaux, appartient, avec les pois, à la famille des papilionacées, des fleurs dont la forme rappellent celles des papillons : deux pétales sont soudés en un étui, une carène, qui contient les organes reproducteurs ; deux autres sont disposés de part et d'autre de la carène et le dernier, nommé vexillum,

dresse à maturité sa surface concave au-dessus de la fleur. Les chauves-souris s'approchent de la fleur qu'elles pressent pour atteindre le nectar. La carène sous tension éclate alors et les étamines propulsent le pollen sur les poils de l'animal pendant son festin. Le pollen sera ensuite véhiculé vers une autre fleur. Comment les chauves-souris repèrent-elles les fleurs ?

À la manière des sous-marins avec leurs sonars, ces animaux utilisent principalement pour se déplacer les échos des ondes sonores qu'ils émettent. Les zoologistes ont d'abord constaté que les fleurs sans vexillum étaient beaucoup moins visitées que les fleurs intactes témoin. Puis, pour confirmer leur hypothèse de localisation par l'écho, ils ont empli les vexillum de certaines fleurs avec du coton : là encore, les fleurs témoins étaient plus souvent visitées.

D. et O. von Helversen ont ensuite étudié les propriétés de réflexion sonore du vexillum en enregistrant l'écho d'un son artificiel proche de celui émis par *Glossophaga commissarisi*. Malgré sa petite taille, le vexillum concave réfléchit seul la majeure partie des ondes dans la direction d'incidence selon un large cône d'incidence, c'est-à-dire que la fleur mature signale sa présence à chaque cri de la chauve-souris qui, ainsi, la repère facilement et la distingue des feuilles ou des autres parties du végétal.

À l'instar de *Ophrys apifera*, *Mucuna holtonii* est adaptée à son agent pollinisateur. D'autres fleurs de la même espèce dont le pollen est transporté par des animaux qui n'utilisent pas le système d'écholocation n'ont pas de vexillum concave.

BRÈVES

La piste du faux suaire

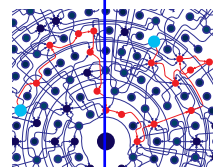
D'où vient le «Saint Suaire», pièce de lin exposée à Turin, et réputée avoir enveloppé la dépouille du Christ, mais fabriquée entre 1260 et 1390 selon les analyses au carbone 14 pratiquées il y a quelques années ? Selon deux botanistes israéliens, il aurait été tissé au Proche-Orient : des pollens trouvés dans le tissu appartiennent à des plantes qui ne poussent que dans cette région. Un croisement a-t-il été abusé par d'habiles palestiniens ?

Horloge géologique

Seules les roches cristallines et volcaniques étaient datées par des mesures de radioactivité : les roches sédimentaires ne l'étaient que par l'analyse des fossiles qu'elles contiennent. Or, les fossiles sont souvent absents. Des géologues australiens ont daté deux grès (roche sédimentaire) en projetant un faisceau d'ions oxygène suffisamment fin pour vaporiser les atomes d'uranium et de plomb contenus dans des microcristaux piégés dans les sédiments lorsqu'ils se sont consolidés. Les atomes ainsi extraits sont analysés et la proportion d'atomes d'uranium 238 par rapport à ceux de plomb 206 indique l'âge du sédiment.

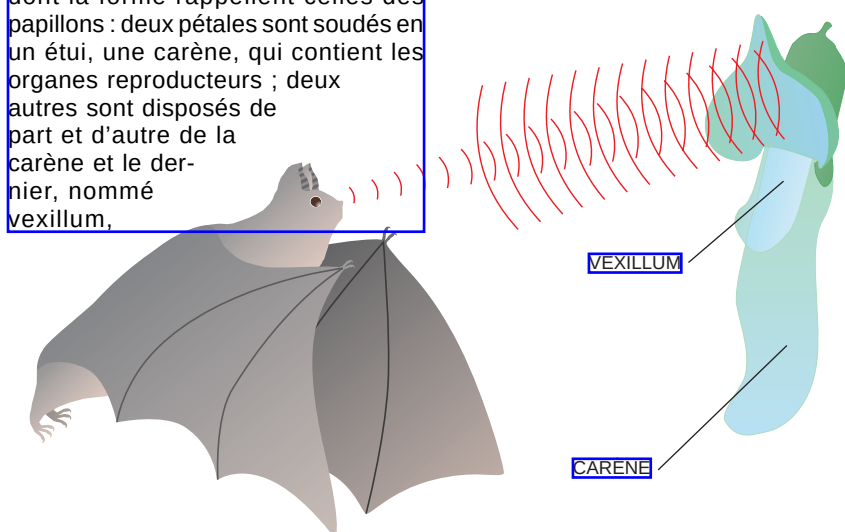
La topologie de l'Internet

Sur Terre, les gens sont reliés par six degrés de séparation : pour relier deux individus pris au hasard, six liens (ami, parenté, connaissance) suffisent. Et sur le Web ? Des informaticiens américains ont montré que de n'importe quelle page vous êtes en moyenne à 18 clics de souris de n'importe quelle autre. Si le nombre de pages, aujourd'hui estimé à 300 millions, est multiplié par 10, le nombre de liens moyen entre deux pages passera de 18 à 20.



Et rose, elle a vécu, plus longtemps

Depuis plusieurs décennies, les sociétés de biotechnologie savent retarder le mûrissement des fruits et des légumes. Elles prolongent aujourd'hui la durée de vie des fleurs. La Société Agritope a identifié et breveté un gène nommé SAMase, qui code une enzyme, laquelle dégrade un des principaux précurseurs de l'éthylène, la S-adenosylméthionine : ce gène règle la production par les végétaux de l'éthylène, une hormone végétale, qui favorise le mûrissement des fruits et le vieillissement des végétaux.



La chauve-souris *Glossophaga commissarisi* pousse des cris et capte l'écho que lui renvoie la plante leurre *Mucuna holtonii*. En échange d'un peu de nectar, l'animal transporte du pollen de fleur en fleur et participe à la reproduction de l'espèce végétale.

Premier parmi ses semblables

Nayan Hajratwala a découvert le premier nombre premier comportant plus d'un million de chiffres. Ce nombre de Mersenne, $2^{6972593}-1$, a 2 098 960 chiffres : son inventeur recevra le prix de 50 000 dollars offert par l'*Electronic Frontier Foundation*, créée par un donateur anonyme. Nayan Hajratwala a utilisé un 350 MHz Pentium II IBM Aptiva pendant 111 jours en temps partagé. Si l'ordinateur avait été utilisé à plein temps, l'ordinateur aurait été immobilisé trois semaines. Un prix de 100 000 dollars attend le premier nombre premier de 10 millions de chiffres.

Prothèse pédestre

Une prothèse d'orteil, achetée en 1881 par le *British Museum* de Londres est de nouveau exposée depuis quelques semaines dans une nouvelle galerie consacrée aux restes humains de l'Égypte ancienne. L'objet, daté de plus de 2 500 ans, proviendrait de Thèbes. Il a été fabriqué dans le même matériau que les sarcophages des momies, un mélange de toile, de colle et de plâtre, teinté couleur chair, et portait un ongle d'un autre matériau. Un lien, attaché au pied ou à la sandale, le maintenait en place, tout en conservant l'articulation.

Le gène n'est pas tout

Des biologistes de l'Université de Portland, de l'Université d'Edmonton et de l'Université Albany ont soumis des souris clonées, c'est-à-dire génétiquement identiques à des tests de comportement : elles réagissent différemment selon le laboratoire, même si les conditions expérimentales sont semblables : les différences semblent dues aux conditions de vie, telles que l'alimentation, la façon dont les animaux sont traités, le caractère du technicien qui s'occupe d'elles... Pour des comportements dépendant fortement de facteurs génétiques, comme l'attrait pour l'alcool, les résultats sont similaires ; en revanche, pour des comportements mis en évidence par des tests de locomotion, les différences sont considérables : une pierre dans le jardin des tenants absolus de l'inné.

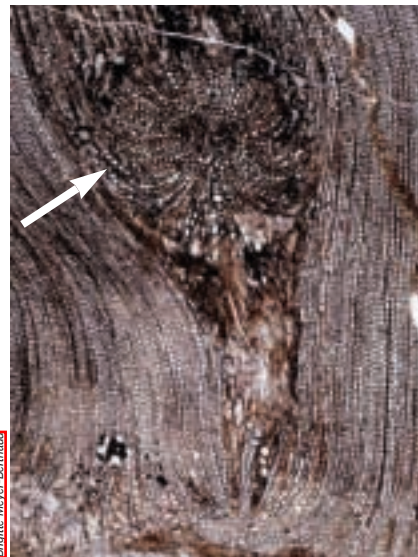


Vieux mais branché

Les innovations végétatives d'un arbre primitif.

A quoi la Terre ressemblerait-elle sans arbres ni forêts ? Les arbres sont apparus il y a 375 millions d'années et le registre fossile indique que les plus anciennes forêts, composées surtout du genre *Archaeopteris*, objet de notre étude, ont atteint leur expansion maximale 15 millions d'années plus tard. Ces forêts ont profondément modifié les milieux terrestres. Elles ont conduit à l'élaboration de nouvelles niches écologiques propices à l'évolution des espèces, elles ont produit une biomasse végétale suffisante pour alimenter les premiers grands incendies et elles ont contribué au développement des sols. Réservoir important de matière organique, elles ont aussi piégé de grandes quantités de dioxyde de carbone atmosphérique, contribuant ainsi au refroidissement global du climat.

Archaeopteris, principal acteur de ces transformations, présente une autre particularité : c'est, parmi les plantes à spores, le plus proche parent connu des plantes à graines, apparues il y a 365 millions d'années et qui dominent aujourd'hui la végétation. Les recherches menées depuis dix ans sur la structure, les propriétés mécaniques et le développement de cet arbre montrent qu'il ne lui man-



Le tronc d'*Archaeopteris* (en coupe) portait, comme les autres arbres contemporains, des branches caduques issues de la division du sommet du tronc (la flèche indique le départ de la vascularisation d'une telle branche). Il avait aussi des branches persistantes, et pouvait se reproduire par bouturage, ce qui a contribué à sa domination sur les premières forêts.

quait que des graines pour être un arbre moderne.

Comme pour la majorité des arbres actuels, le bois d'*Archaeopteris* assurait une double fonction de conduction de la sève et de soutien mécanique du tronc et des branches. La photosynthèse, qui permettait à l'arbre de croître, était assurée par des branches horizontales et caduques pourvues, à leurs extrémités, de structures foliacées. On a longtemps pris pour des feuilles de fougères ces branches fossiles, détachées de leurs troncs et de longueur inférieures à 1,5 mètre. Comme les autres arbres de la même époque, *Archaeopteris* émettait ces branches grâce à la division, généralement inégale, du sommet du tronc. C'était un processus risqué : si le sommet de l'arbre était endommagé, la ramification s'arrêtait et l'arbre, privé de ses organes photosynthétiques, finissait par mourir.

En 1993, Mary-Louise Trivett, de l'Université de l'Ohio, découvre qu'*Archaeopteris* produisait des branches ailleurs qu'à son sommet, ce qui favorisait sa survie. Grâce aux gisements fossilifères reconnus récemment dans le Sud-Est marocain par Jobst Wendt, de l'Université de Tübingen, nous avons, avec Stephen Scheckler, de l'Université de Virginie, confirmé que, outre ses courtes branches à fonction photosynthétique, le tronc d'*Archaeopteris* produisait aussi de grosses branches persistantes. Grâce à ces branches, qui constituaient un élément fondamental de son squelette, l'arbre avait une forme plus complexe et occupait plus d'espace que ce que l'on avait imaginé.

Ces branches étaient soutenues par des bourrelets de bois au niveau de la zone d'attache, comme les branches des arbres modernes. L'analyse de leur vascularisation a montré que leur position sur le tronc était liée à celle des branches photosynthétiques et que leur production n'était pas directement issue d'une division du sommet, mais plutôt d'une ramification semblable à la ramification axillaire des plantes à graines, où les branches sont produites par des îlots de cellules situées à l'aisselle des feuilles (dans l'angle formé par le pétiole de la feuille et la branche à laquelle il est attaché).

Les branches et le tronc d'*Archaeopteris* produisaient aussi des structures susceptibles de se développer en racines. Ce potentiel permet à de nombreuses plantes actuelles de se propager végétativement, par bouturage par exemple. Cet ensemble d'innovations relatives à l'appareil végétatif expliquerait le succès d'*Archaeopteris* et son importance dans l'évolution de la végétation.

Brigitte MEYER-BERTHAUD
Université de Montpellier

Les faiseurs de pluie

Des cristaux dispersés dans les nuages augmenteraient la pluie et réduiraient la grêle.

Dans les Pyrénées-Orientales, trois syndicats agricoles ont assigné *Météo-France* en justice : ses prévisionnistes n'avaient pas annoncé l'orage de grêle qui a dévasté quelques milliers d'hectares de vignes et de vergers le 21 avril 1999. Si l'alerte avait été donnée, les agriculteurs auraient allumé les brûleurs anti-grêle installés dans la région. Leurs cultures auraient-elles été préservées ? Rien n'est moins sûr.

Parallèlement, au Burkina-Faso, des sorciers traditionnels se plaignent : pour faire tomber la pluie, le gouvernement de ce pays projette, avec l'aide du Maroc, la dispersion d'iodure d'argent dans les nuages. Une intervention d'urgence des services de la météorologie marocaine en avril et mai 1998, avec ce procédé, a en effet été suivie par l'arrivée de l'eau tant attendue en fin de saison sèche. Hasard ou efficacité ?

Pouvons-nous agir sur les précipitations ? Des expériences de pluie provoquée sont menées dans des pays semi-arides et, en France, quelques associations soutiennent la lutte contre la grêle. Les résultats de ces expériences sont toutefois mitigés : les progrès qualitatifs avancés par leurs promoteurs ne sont pas accompagnés de démonstrations statistiquement fiables.

Comment faire pleuvoir ? Une technique s'appuie sur l'existence, dans de nombreux nuages, de gouttelettes d'eau liquide à des températures inférieures à 0°C. Comme la pression d'équilibre de la vapeur d'eau en présence de ces gouttelettes surfondues est supérieure à celle de la vapeur d'eau en présence de glace, lorsque des cristaux de glace sont présents, la vapeur d'eau se condense de préférence à leur surface et ils grossissent plus vite que les gouttes d'eau. Lorsqu'un cristal de glace a atteint une taille suffisante, il tombe, en agrégeant des gouttelettes d'eau ou d'autres cristaux, puis il rencontre des couches d'air plus chaudes, il fond et se transforme en pluie. S'il est trop gros ou si l'air n'est pas assez chaud près du sol, il reste grêlon ou flocon de neige.

Lorsque les nuages ne contiennent pas d'eau surfondue, la pluie se forme par l'agrégation des gouttelettes d'eau du nuage. La quantité de pluie dépendrait de la concentration en gouttes « assez grosses » issues de cette agrégation.

Des météorologues ont proposé d'augmenter la concentration en cristaux de glace dans les nuages, en y introduisant des cristaux d'iodure d'argent, de quelques dixièmes de micromètres de diamètre : la ressemblance de leur réseau cristallin avec celui de la glace favorise la condensation de l'eau. Plus de vapeur d'eau devrait ainsi être transformée en pluie. Dans le cas d'un orage de grêle, l'augmentation du nombre de cristaux empêcherait que les grêlons deviennent trop gros : ils seraient ainsi moins dangereux et fondraient plus facilement avant d'atteindre le sol.

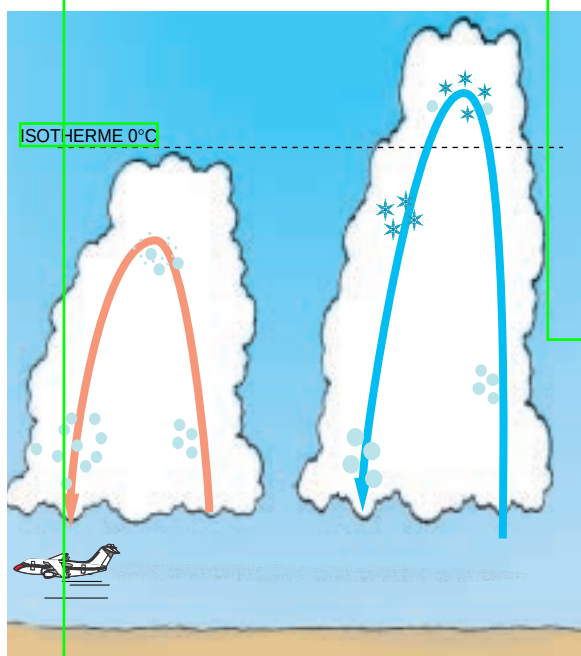
Un autre moyen pour augmenter la concentration en gouttes d'eau dans les nuages a été mis au point par l'équipe du Projet de recherche sur les précipitations de Bethlehem, en Afrique du Sud : on répand, à la base des nuages, des cristaux de sels hygroscopiques (du chlorure de sodium et de potassium) de quelques dixièmes de micromètre de diamètre. Ces cristaux, aspirés dans le nuage par des courants de convection, servent de support à la condensation de la vapeur d'eau. Ces gouttelettes artificielles ascendantes s'agrègent avec les gouttelettes

du nuage et forment des gouttes plus grosses qui, par fractionnements successifs, produiraient finalement bien plus de gouttes qu'on a initialement introduit de cristaux dans le nuage. Dans les nuages froids, l'augmentation du nombre de gouttes d'eau favorise aussi l'apparition de germes de glace.

Ces méthodes sont-elles efficaces ? La variabilité des conditions météorologiques impose de longues durées d'expérience, pour que les comparaisons entre les nuages traités et la situation naturelle soient significatives. Face à l'urgence des besoins en eau, l'équipe sud-africaine refuse d'attendre : elle compare chaque nuage traité à un nuage aux caractéristiques semblables. Elle annonce ainsi une augmentation de 60 pour cent de l'eau déversée par un nuage lorsque celui-ci est traité assez tôt. La preuve d'un accroissement total de la pluie tombée sur la région manque toutefois encore.

Pour la grêle, des compagnies d'assurance ont réduit de plus de 40 pour cent les indemnités qu'elles versent aux agriculteurs grâce à des traitements à l'iodure d'argent, mais cet indicateur est scientifiquement contestable. Jean Desens, du Laboratoire d'aérodynamique du CNRS, à Toulouse, a récemment proposé une méthode de traitement des données recueillies par un réseau de 800 stations de mesure de la grêle en Aquitaine : le nombre de grêlons de diamètre supérieur à sept millimètre varie dans le sens inverse du poids d'iodure d'argent répandu dans l'atmosphère 80 minutes avant la chute de grêle. À Agen, l'Association climatique de la Moyenne-Garonne compare l'action de deux types de sels hygroscopiques. Après trois années d'expériences, les améliorations qualitatives annoncées ne sont pas distinguables de la variabilité naturelle des orages.

Selon Jean-Pierre Chalon, de *Météo-France*, ces expérimentations sont prématurées : les moyens importants nécessaires à la validation des différentes méthodes sont plus utilement consacrés à la compréhension des mécanismes physiques à l'origine des précipitations. Le groupe d'experts qu'il préside au sein de l'Organisation météorologique mondiale a toutefois décidé d'analyser les conséquences des traitements par sels hygroscopiques, tels qu'ils sont réalisés en Afrique du Sud, au Mexique et en Thaïlande. Les agriculteurs pourront-ils un jour « semer la pluie » comme ils sèment leurs champs ?



Des cristaux de chlorure de sodium ou de potassium, dispersés à la base d'un nuage, sont aspirés par des courants ascendants. Ils servent de support à la condensation de gouttes d'eau qui grossissent : dans un nuage « chaud » (à gauche), elles retombent directement en pluie ; dans un nuage « froid » (à droite), qui contient de l'eau surfondue, elles se transforment en grêlons qui fondent en retombant. Cette technique aurait augmenté le rendement des nuages en Afrique du Sud.

Test de la maladie de la vache folle

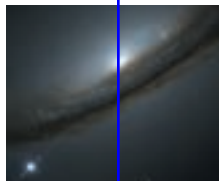
Comment savoir qu'une vache est atteinte d'encéphalopathie spongiforme bovine, alors même qu'elle ne présente aucun des symptômes caractéristiques? Un test élaboré par le CEA est remarquablement efficace : la forme pathogène de la protéine du prion est détectée par un anticorps spécifique. Lors des essais, tous les animaux malades ont été détectés et aucun animal sain n'a été faussement déclaré contaminé. Le CEA s'est associé à la Société Pasteur Sanofi Diagnostics pour développer ce test.

Azote pur

Des chimistes de l'Armée de l'air américaine ont réussi à fabriquer un ion comportant cinq atomes d'azote disposés en V. Chargé positivement, ce composé est stabilisé et neutralisé avec du fluorure d'arsenic, formant un sel stable à -78°C , mais qui se décompose à 22°C , et explose violemment en présence d'eau. Cet ion, fortement contraint, est un puissant oxydant : servira-t-il un jour de carburant ou d'explosif?

Le destin de l'Univers

Les cosmologistes assuraient que le destin de l'Univers était établi : il n'y aurait pas contraction après la phase d'expansion actuelle, mais une accélération de l'expansion. Cette assertion était fondée sur la luminosité des supernovae dans les lointaines galaxies, moins intense que prévu. Il fallait supposer cependant que la luminosité intrinsèque des supernovae lointaines est identique à celle des supernovae proches, ce que contredit un résultat récent.



Photon par photon

La détection d'un photon unique, que ce soit par l'œil ou par un photodétecteur, est en général destructive. Pourtant, en mécanique quantique, rien n'interdit de «voir et de revoir» un unique photon. Cette prouesse expérimentale est le fruit de l'équipe de Serge Haroche, à l'École normale supérieure de Paris. Cette expérience est fondée sur la mesure de la phase du mouvement de rotation d'un électron placé sur une orbite circulaire autour d'un ion de rubidium. Le champ d'un seul photon dans la cavité suffit à inverser cette phase, sans changer l'énergie de l'électron, donc sans absorber le photon. En mesurant la phase de l'électron, on détecte ainsi le photon sans le détruire.

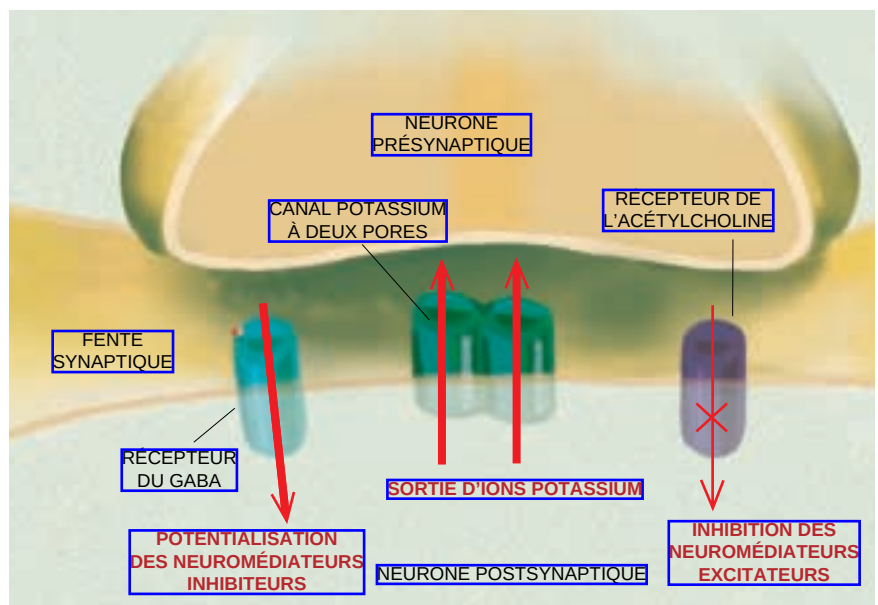
Un nouveau mécanisme pour l'anesthésie

Des molécules commandant le flux des ions potassium à travers la membrane des neurones sont la cible de certains anesthésiques.

Plusieurs potions, élixirs ou autres préparations ont été utilisées pour endormir les opérés ou apaiser leur douleur. En 1842, un médecin américain a l'idée de faire respirer de l'éther à un des malades qu'il doit opérer. C'est le début de l'utilisation des anesthésiques volatils. Une anesthésie générale est caractérisée par une perte de conscience, une suppression des sensations douloureuses, un relâchement du tonus musculaire et une amnésie. Tous ces symptômes disparaissent après élimination des drogues. Pour endormir les opérés, les anesthésistes utilisent plusieurs substances qui bloquent la transmission de l'influx nerveux. Amanda Patel, Éric Honoré, Georges Roney, et leurs collègues de l'équipe de Michel Lazdunski (CNRS-UPR 411) ont découvert un nouveau mode de mise au repos du système nerveux central : les anesthésiques volatils agissent spécifiquement sur une toute nouvelle classe de molécules, des canaux potassium à deux pores.

Pour expliquer l'action des anesthésiques, on a proposé deux mécanismes : ils agiraient en se dissolvant dans les membranes des neurones, les désorganisant et inhibant la transmission des messages excitateurs ; ou bien ils se fixeraient sur des cibles spécifiques localisées sur ces membranes, notamment sur les récepteurs du GABA, le principal neuromédiateur inhibiteur du système nerveux central. Plusieurs arguments sont en faveur de cette seconde hypothèse.

Les récepteurs du GABA sont situés sur des canaux chlore, qui restent fermés tant que le neuromédiateur n'y est pas fixé. Quand le GABA se lie à son récepteur, le canal chlore s'ouvre laissant entrer des ions chlore dans le neurone postsynaptique. Cette entrée massive de charges négatives crée un hyperpolarisation qui bloque la transmission des signaux dans les neurones. Les anesthésiques qui se fixent également sur les récepteurs du GABA, renforcent encore le flux d'ions chlore : les neurones postsynaptiques sont totalement mis au repos. Pour obtenir ce mécanisme de perte réversible de conscience, on peut soit renforcer l'action d'un neuromédiateur inhibiteur (le GABA, notamment), soit inhiber l'action d'un neuromédiateur excitateur, le glutamate ou l'acétylcholine. Ces neuromédiateurs déclenchent l'émission de signaux excitateurs en se fixant sur leurs récepteurs. Toute substance (et c'est le cas de certains anesthésiques) qui prend la place de ces neuromédiateurs sur leurs récepteurs, les empêche d'agir, donc d'activer le système nerveux central.



Les anesthésiques mettent le système nerveux central au repos soit en potentialisant les neuromédiateurs inhibiteurs (tel le GABA) qui bloquent la transmission de l'influx nerveux dans les neurones postsynaptiques, soit en inhibant les neuromédiateurs excitateurs (tel l'acétylcholine) qui, au contraire, transmettent l'influx nerveux. Les nouvelles cibles des anesthésiques sont les canaux potassium à deux pores qui laissent des ions potassium quitter en masse le neurone postsynaptique, ce qui bloque également la transmission de l'influx.

En fait, l'inhibition de l'activité neuronale peut-être obtenue par l'afflux d'ions chlore qui pénètrent dans les neurones postsynaptiques par les récepteurs du GABA, mais aussi par une sortie d'ions potassium par des canaux potassium spécifiques. Jusqu'à présent, on connaissait des canaux potassium à un pore, mais Florian Lesage a récemment découvert une nouvelle famille de canaux potassium : ils sont constitués de deux pores.

Ces canaux potassium seraient généralement au repos, sauf en cas de stress. Dans ces conditions, de l'acide arachidonique et d'autres acides gras (les constituants des membranes) seraient libérés. Or certains de ces canaux potassium à deux pores sont activés par l'acide arachidonique et par les perturbations mécaniques de la membrane. Dans ces conditions, les canaux potassium s'ouvrent, déclenchant une sortie d'ions potassium de la cellule : on pense qu'une telle hyperpolarisation aurait un effet protecteur en empêchant, par exemple, les ions cal-

cium (toxiques quand ils sont en excès) de pénétrer dans les neurones au cours d'un accident vasculaire cérébral.

A. Patel et ses collègues ont montré que certains de ces canaux sont activés par les anesthésiques volatils. Deux de ces canaux, nommés TASK et TREK-1 sont activés par ces anesthésiques, mais tandis que TREK-1 est activé par le chloroforme, l'éther, l'halothane et l'isoflurane, TASK n'est activé que par l'halothane et l'isoflurane. S'ils agissaient en se dissolvant dans la membrane et en la perturbant, on ne devrait pas constater une telle spécificité.

De surcroît, en éliminant, par diverses techniques, des régions particulières des molécules qui constituent les canaux potassium à deux pores, l'équipe de Sophia Antipolis a montré que les anesthésiques cessent d'agir quand certaines zones sont retirées. Les anesthésiques n'agissent sans doute pas sur les canaux TREK-1 et TASK en s'y liant par un mécanisme de type clé-serrure, mais en modi-

fiant la configuration de la protéine-canal : cette modification réversible entraînerait l'ouverture du canal. Les récepteurs TREK-1 et TASK sont exprimés dans de nombreux tissus et surtout dans le cerveau et dans le cœur, ce qui explique pourquoi certains anesthésiques ont des effets secondaires indésirables : ils perturbent la fonction cardiaque.

La découverte de ces canaux potassium sensibles aux anesthésiques volatils augmente le nombre des cibles des anesthésiques. On sait que les invertébrés ont de très nombreux types de canaux potassium à deux pores et l'on commence à en découvrir d'autres chez l'homme. Peut-être trouvera-t-on alors des canaux spécifiques d'un organe qui seraient activés par un anesthésique particulier. Parviendra-t-on, un jour, à «endormir» spécifiquement le système nerveux central sans toucher le cœur ni les poumons, c'est-à-dire sans risque de déclencher des effets secondaires délétères ?

Vision primaire

Le cerveau traite la position des yeux en même temps que les images.

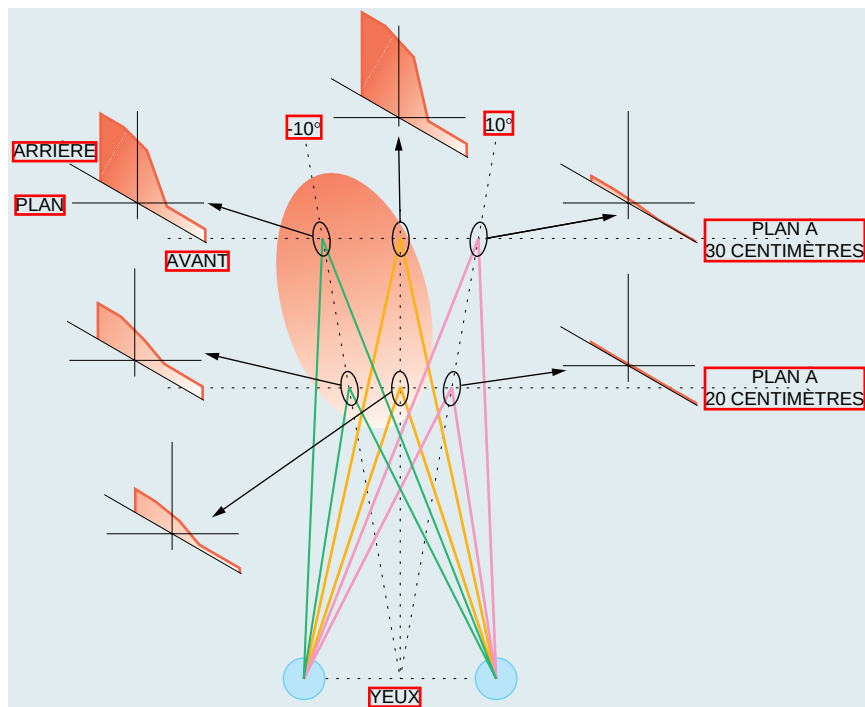
Avant de saisir un objet, nous devons le localiser, apprécier sa forme et son volume, ainsi que la distance qui nous en sépare. Nous disposons pour cela de deux yeux, écartés de quelques centimètres, qui reçoivent deux images d'un même objet, avec un léger décalage angulaire. Notre cerveau reconstruit le relief en combinant ces deux images et en tenant compte de la position de ceux-ci par rapport au reste de notre corps. On pensait que notre cortex visuel primaire, qui se situe dans la partie postérieure de notre cerveau, se contentait de coder les images reçues par les rétines et que leur positionnement dans l'espace était reconstitué seulement dans une seconde étape du traitement visuel, dans une autre zone cérébrale, le cortex pariétal. En réalité, le cortex primaire code déjà la position des objets dans l'espace tridimensionnel.

Nous explorons le fonctionnement du cerveau chez des macaques rhésus, qui ont les mêmes capacités perceptives que l'homme, en enregistrant l'activité électrique individuelle des neurones en réponse à des images présentées sur un écran vidéo. Ces enregistrements révèlent d'abord que le cortex primaire code l'orientation des bords qui défi-

nissent un objet, ainsi que le relief de cet objet.

Fermons un œil. Chaque neurone du cortex visuel primaire n'est sensible qu'à la lumière qui arrive sur une petite portion de la rétine de l'œil ouvert, son champ récep-

teur. Si l'on projette dans ce champ récepteur un trait, matérialisé par une différence de contraste, l'activité du neurone dépend de l'orientation de ce trait : elle est maximale pour une orientation préférentielle, et minimale pour l'orientation ortho-



Les neurones du cortex visuel primaire codent la position des objets dans l'espace. Leur activité (graphes en rouge) est modulée par la distance du plan de fixation (ici, à 20 ou à 30 centimètres), par la position du stimulus par rapport à ce plan (en avant, en arrière ou dans le plan) et par la position latérale des objets (au centre, en orange, à 10 degrés à gauche, en vert, et à 10 degrés à droite, en rose). On a représenté ici l'activité d'un neurone (récapitulée par le dégradé de couleur de l'ellipsoïde) sensible aux stimuli présentés en arrière d'un plan de fixation à 30 centimètres et sur la gauche de la tête.

gonale. Toutes les orientations préférentielles sont représentées dans le cortex.

Ouvrons les deux yeux : la plupart des neurones du cortex ont deux champs récepteurs, un sur chaque rétine. L'activité d'un neurone est maximale lorsqu'un stimulus (par exemple un trait convenablement orienté) est projeté simultanément sur ses deux champs récepteurs, c'est-à-dire lorsque ce stimulus est placé à l'intersection des projections des deux champs récepteurs à travers la lentille que constitue le cristallin. La position relative des deux champs récepteurs détermine si leurs projections se croisent dans le plan fixé par les yeux, en avant de ce plan ou en arrière. Là aussi, toutes les positions relatives sont représentées dans le cortex, ce qui permet le codage de la profondeur relative des différents éléments d'un même objet (et la position relative de plusieurs objets).

Nous avons découvert récemment que l'activité de la moitié environ des neurones du cortex visuel primaire dépend aussi de

l'orientation des yeux. Nous avons entraîné deux macaques à fixer un point sur un écran, dans trois directions différentes sans bouger la tête : droit devant, dix degrés sur la gauche et dix degrés sur la droite. Pour chacune de ces directions, nous leur avons présenté des bords orientés, à des positions variables par rapport au plan fixé par les yeux (devant, dans le plan, derrière). Nous avons observé qu'un neurone dont l'activité est maximale pour un bord d'orientation donnée situé, par exemple, derrière le plan de fixation quand le singe fixe sur sa gauche est inactif pour le même stimulus présenté sur sa droite ; l'activité d'autres neurones est, au contraire, d'autant plus grande que le regard est dirigé vers la droite.

Les messages issus de la rétine et des muscles des yeux interagissent donc dès le cortex primaire. Jusqu'à présent des modulations de l'activité visuelle par la direction du regard n'avaient été observées que dans le cortex pariétal et dans quelques zones cérébrales voisines, qui

intègrent des signaux d'origines diverses, visuels, oculomoteurs, auditifs... Ces aires, qui reçoivent des informations visuelles informeraient-elles en retour le cortex visuel primaire de la position des yeux ? C'est peu probable : les modifications de l'activité neuronale dans le cortex primaire en fonction de l'axe du regard apparaissent trop vite après la présentation du stimulus visuel pour qu'une telle rétroaction ait le temps de se produire.

Nous savions déjà que l'activité des neurones du cortex primaire dépend aussi de l'angle de convergence des yeux. Cette partie du cerveau code donc, outre l'orientation d'un stimulus, la distance du plan de fixation, la position du stimulus par rapport à ce plan et sa position latérale : ils codent sa position absolue dans l'espace, par rapport à la tête. Le cortex primaire ne l'est donc pas tant que cela : il reconstitue des images beaucoup plus complexes que ne le pensaient ceux qui l'ont nommé ainsi.

Yves TROTTER, CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse

La preuve vidéo ?

L'identification des visages à partir d'une vidéo est délicate.

Les caméras vidéo sont aujourd'hui partout : dans les magasins, les banques, les bus, etc. Des villes entières s'équipent même de caméras de surveillance. Sans discuter la dissuasion de ces méthodes de surveillance généralisées, la question qui se pose est simple : la qualité des images vidéo des caméras de surveillance est-elle suffisante pour identifier une personne ? Autrement dit, un film

vidéo constitue-t-il une preuve fiable ? Pour répondre à cette question, Vicki Bruce et Mike Burton, deux psychologues écossais, ont demandé à 230 étudiants de comparer des visages issus de films vidéo de bonne qualité et des photographies classiques. Parmi les 200 visages des photographies, dix correspondaient à des visages des films vidéo. À leur grande surprise, les psychologues ont remarqué que, même dans des conditions idéales, où les visages sont de face avec une expression neutre, seuls 70 pour cent des identifications étaient correctes. Lorsque sur l'image vidéo le visage souriait, les identifications correctes tombaient à 64 pour cent, et lorsque

le visage était de côté, cette proportion n'était plus que de 61 pour cent.

Dans une seconde expérience, 60 étudiants regardaient de courtes séquences vidéo de haute qualité qui mettaient en scène des inconnus. On leur demandait alors de retrouver la photographie du visage correspondant. Même lorsqu'on les prévenait que l'une des dix photographies correspondait au personnage de la séquence visionnée, 79 pour cent seulement réussissaient l'identification.

A l'inverse lorsque des visages connus étaient filmés avec une même résolution médiocre, 90 pour cent des identifications étaient correctes. Ainsi, si l'on identifie facilement des visages connus, la comparaison de visages inconnus est difficile. Malgré l'arrivée des caméras vidéo numériques, dont la définition est bien supérieure à celle des caméras analogiques, les procédures d'identification à des fins de justice devront prendre en compte cette difficulté. Lorsque les sujets ne sont pas familiers, les procédures de reconnaissance automatique donnent de bien meilleurs résultats que la reconnaissance visuelle. Toutefois, ces procédures automatiques fonctionnent mal lorsque la qualité vidéo est médiocre.

Ainsi, les visages connus ne sont pas traités comme des images, mais de manière abstraite, ce qui permet une généralisation à différentes conditions d'observation, tels l'angle de vue ou la luminosité.



Les images utilisées pour la première série de tests. À gauche, une image fixe extraite d'une séquence vidéo et à droite, une photographie de bonne qualité.

Derrière les barreaux

Depuis quelques années, le nombre de personnes emprisonnées a augmenté dans la plupart des pays occidentaux. Toutefois, les États-Unis battent le record : 668 prisonniers pour 100 000 habitants, presque autant que dans les pays de l'ex-Union soviétique. La criminalité n'est pourtant pas plus importante dans ce pays qu'en Europe occidentale (excepté pour les homicides, qui sont de deux à huit fois plus nombreux à cause de la facilité avec laquelle on achète une arme à feu aux États-Unis).

Il y a une trentaine d'années, la peur de la criminalité et du trafic de drogue a commencé à gagner la société américaine. Les hommes politiques se sont alors empressés de promettre qu'ils mettraient sous les verrous tous les criminels. Pour ne citer que les plus récents, les présidents Ronald Reagan et George Bush ont mis en œuvre des mesures répressives, déclarant notamment « la guerre à la drogue ». Même William Clinton, qui appartient pourtant au Parti démocrate, traditionnellement moins sévère, a cautionné la peine de mort et, comme président, a signé un projet de loi anti-criminalité qui demandait plus de prisons et un accroissement des peines minimales. Les gouverneurs d'un grand nombre d'États ont aussi signé des lois plus répressives, notamment à l'égard des récidivistes. Les officiers locaux, policiers, magistrats instructeurs et juges, qui prennent la plupart des décisions

courantes à propos des incarcérations, ont été fortement influencés par ces discours et par ces mesures sécuritaires : de plus en plus, ils ont choisi l'emprisonnement des délinquants.

Les peines, déjà longues par rapport

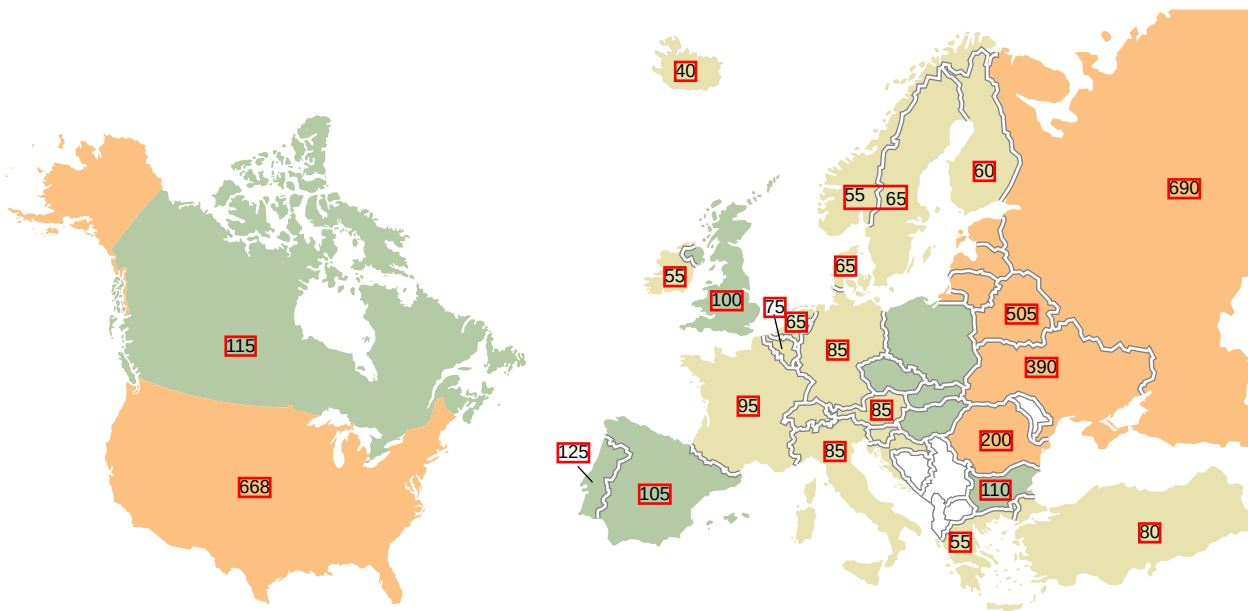
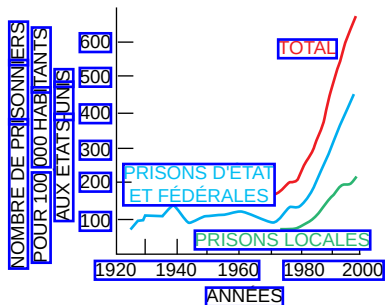
à celles appliquées en Europe occidentale, se sont donc allongées. Le nombre de personnes emprisonnées a été multiplié par cinq entre 1972 et 1988, où il a atteint 1,8 million. La majorité des condamnés de ces dernières années ont commis des délits sans violence, telle la possession de drogue, qui ne sont pas punis par de longues peines de prison dans les autres pays occidentaux.

L'augmentation du nombre d'incarcérations s'est produite pendant que les atteintes aux biens des personnes diminuaient fortement et que le nombre de crimes violents baissait aussi. Pour autant, des sentences lourdes réduisent-elles la criminalité? Rien n'est prouvé.

En revanche, ce durcissement pénal, qui s'exerce particulièrement à l'égard des jeunes hommes noirs, a pour conséquence la plus visible la dislocation de la communauté noire. Une importante minorité d'adolescents, blancs et noirs, ont des comportements violents mais, vers 20 ans, la plupart des Blancs trouvent du travail et fondent une famille, tandis qu'une grande partie des Noirs n'ont pas d'emploi : ils ont plus de risques de rester, ou de devenir délinquants et d'aller en prison. Le système est aussi biaisé en défaveur des Noirs à propos de la drogue : bien que 13 pour cent seulement des consommateurs de drogue soient noirs, 74 pour cent des condamnations liées à la drogue concernent des Noirs. Un Noir adulte sur sept est privé de droit de vote suite à une condamnation criminelle.

Selon deux criminologues britanniques, les sociétés les moins égalitaires sont les plus sévères. L'emprisonnement est une « récompense négative », comparé à la récompense positive qu'est la richesse. Ce point de vue explique peut-être pourquoi les États-Unis ont une plus forte proportion de leur population en prison que les autres pays occidentaux, où les inégalités de revenus sont moindres, et pourquoi cette proportion a commencé à croître au début des années 1970, peu après que les différences de revenu ont commencé à se creuser.

Rodger DOYLE



POPULATION CARCÉRALE (POUR 100 000 HABITANTS)

MOINS DE 100 DE 100 A 199 PLUS DE 200 PAS DE DONNÉES

Les dégâts d'un ver

Un ver de terre tasse le sol plus que des bulldozers.

Dans le massif amazonien, de grandes surfaces de forêt sont abattues et brûlées puis transformées en pâturages. Cette déforestation entraîne un tassement du sol, attribué habituellement au passage des lourdes machines utilisées pour transporter les troncs et au piétinement du bétail. Toutefois, avec Eleusa Barros, de l'Institut brésilien de recherche amazonienne, à Manaus, et Armand Chauvel, de l'Institut de recherche pour le développement, nous avons découvert qu'un ver de terre participe activement au tassement des sols argileux d'Amazonie Centrale.

La transformation de la forêt en pâturage, qui soumet le sol à des alternances plus marquées de sécheresse et d'humidité, appauvrit fortement la faune du sol (vers de terre, termites, fourmis) : 70 à 80 pour cent des espèces d'invertébrés qui peuplent le sol forestier disparaissent. Une espèce de ver de terre, *Pontoscolex corethrurus*, envahit alors le sol du pâturage où sa densité peut dépasser 400 individus par mètre carré, constituant plus de 90 pour cent de la biomasse d'invertébrés ; ce ver compacte le sol, en réduisant le volume des pores au sein des agrégats de particules du sol et entre ceux-ci.

Nous avons comparé les variations de la porosité d'un échantillon de sol prélevé sous forêt au Nord de Manaus, entre zéro et cinq centimètres de profondeur, et dont l'humidité était conservée, d'une part lorsqu'il est soumis à une forte pression mécanique et d'autre



Les déjections du ver de terre *Pontoscolex corethrurus* (les concrétions blanches, nommées *turricules*), rejetées à la surface d'un sol de pâturage, s'agrègent et forment une couche compacte en se desséchant. Cette photographie a été prise en saison sèche, après formation de fentes de dessiccation.

part lorsqu'il transite dans le tube digestif de *Pontoscolex corethrurus*. Après l'application d'une forte pression, de 1 000 kilopascals (correspondant à une masse de 10 kilogrammes sur un centimètre carré), le volume des pores qui assurent la circulation et la rétention de l'eau utilisable par les plantes (de dimensions comprises entre 0,1 et 100 micromètres), est alors divisé par sept (de 21,7 à 3 centimètres cubes pour 100 grammes de sol). La compaction par *Pontoscolex corethrurus* est plus forte : dans les déjections de ce ver, le volume de la même classe de pores est divisé par 14. Dans le tube digestif du ver, la teneur en eau est doublée ; le sol est mélangé à du mucus (contenant des matières organiques hydrosolubles) et malaxé. Les petits agrégats d'origine biologique (de diamètres compris entre 10 et 500 micromètres), qui constituent une grande partie du sol sous forêt, disparaissent presque totalement dans ces déjections.

Dans certains pâturages, et même dans des zones déboisées manuellement

et non pâturées actuellement, une couche superficielle continue, de quelques centimètres d'épaisseur, se forme par la coalescence des déjections de vers de terre, déposées à l'état boueux, et qui durcissent en séchant. La masse des déjections ainsi produites peut dépasser 100 tonnes par hectare et par an. Cette couche compacte ralentit l'infiltration de l'eau et l'aération du sol. Celui-ci n'est plus oxygéné et devient gris ; l'herbe dépérit et des taches dépourvues de végétation s'étendent dans le pâturage. L'absence d'oxygène favorise aussi la production de méthane, gaz à effet de serre, par les micro-organismes du sol.

Dans le sol forestier, des pores sont créés en permanence par de nombreuses espèces «décompactantes» (termites, fourmis, autres espèces de vers de terre). La réintroduction de celles-ci, associée à une reconstitution au moins partielle du milieu forestier, semble aujourd'hui la meilleure solution pour redonner au sol ses qualités premières.

Michel GRIMALDI, IRD - INRA, Rennes

Le potassium et le chou

Le canal ionique qui transfère le potassium de la racine vers les vaisseaux où circule la sève a été identifié.

La chèvre mange le chou, l'homme, qui est un loup pour l'homme, mange la chèvre (et aussi le chou). Ajoutons un maillon en amont de cette chaîne alimentaire succincte : le chou absorbe les ions potassium. Ces ions, très étudiés par les agronomes, sont indispensables aux

plantes, notamment pour contrôler l'ouverture de pores, nommés stomates, disposés sur les deux faces des feuilles. Ces pores régulent les échanges de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone. Ils sont aussi essentiels au bon fonctionnement du système nerveux de la chèvre et de l'homme.

Deux sèves coexistent dans une plante. La sève brute, composée de l'eau et des sels minéraux (sodium, potassium, phosphates,...) que les végétaux puisent dans le sol, circule, dans les vaisseaux d'un tissu nommé xylème, des racines aux parties supérieures. La sève élaborée, qui contient principalement les sucres fabriqués dans les feuilles grâce

à la chlorophylle et la lumière, parcourt l'ensemble de l'organisme dans les vaisseaux d'un autre tissu, le phloème. Il existe des passages entre le phloème et le xylème.

Les ions s'infiltrant dans les différents tissus par des ouvertures constituées de protéines spécifiques, nommées canaux ioniques, insérées à travers la membrane des cellules. Jusqu'à présent, pour le potassium, seul le canal ionique qui permet aux ions de pénétrer dans les racines était connu. L'équipe de Hervé Sentenac, de l'Institut national de recherche agronomique et de Jean-Baptiste Thibaud, du CNRS, à Montpellier, a récemment identifié chez

Arabidopsis thaliana, une plante de la même famille que le chou (les crucifères) et bien adaptée aux études génétiques, le canal ionique, dénommé SKOR, qui transfère le potassium de la racine vers les vaisseaux qui véhiculent la sève.

Les ions potassium du sol pénètrent dans les cellules périphériques de la racine par le canal AKT1 découvert en 1992 par la même équipe ; puis ils circulent dans le réseau formé par les cellules jusqu'au cœur de la racine où des cellules les transfèrent par le canal SKOR dans les vaisseaux du xylème qui conduit la sève brute vers les parties supérieures de la plante. Une partie du

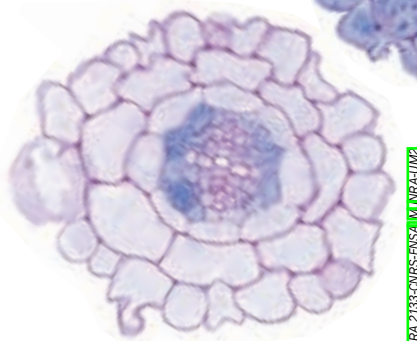
potassium redescend dans les vaisseaux du phloème et repasse dans les vaisseaux du xylème par un canal encore inconnu.

La protéine SKOR est formée de quatre sous-unités. Chacune de ces dernières est repliée pour for-

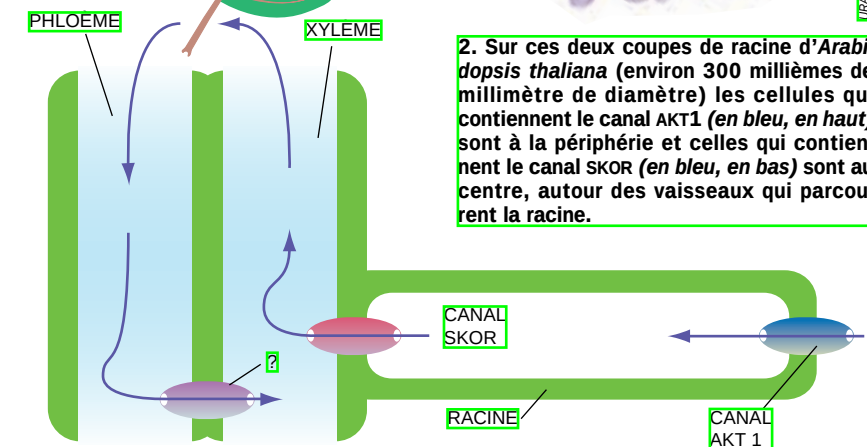
mer six segments parallèles qui traversent la membrane des cellules situées à la frontière entre les racines et les vaisseaux du xylème. L'un des six segments est chargé électriquement et se déplace en fonction des concentrations ioniques de part et d'autre de la membrane de la cellule : la protéine SKOR adopte ainsi deux états (ouvert ou fermé) dont dépend le passage des ions potassium. Ce mode de fonctionnement est proche de celui de canaux connus chez l'homme.

Ces canaux sont également contrôlés par l'acide abscissique, une hormone végétale impliquée dans les réactions au stress telles que la sécheresse et le froid, et qui agit sur l'ensemble de l'organisme, des racines aux feuilles.

Or la qualité du moût de raisin, et donc du vin, dépend de la concentration en potassium dans les baies : plus elles sont riches en potassium, plus l'acidité du moût et les qualités organoleptiques du vin diminuent. Toutefois, comme les ions potassium sont indispensables à la bonne croissance de la vigne, les agronomes cherchent à diminuer la teneur en potassium, mais uniquement dans les baies. Pour ce faire, ils tentent, par des modifications génétiques ciblées sur le canal SKOR, de contrôler le transport et la répartition des ions dans la vigne.



2. Sur ces deux coupes de racine d'*Arabidopsis thaliana* (environ 300 millièmes de millimètre de diamètre) les cellules qui contiennent le canal AKT1 (en bleu, en haut) sont à la périphérie et celles qui contiennent le canal SKOR (en rouge, en bas) sont au centre, autour des vaisseaux qui parcourent la racine.



1. Les ions potassium pénètrent dans la racine par le canal AKT1 (en bleu), puis sont sécrétés par le canal SKOR (en rouge) dans le xylème qui les véhicule jusque dans les feuilles. Ils empruntent ensuite le phloème et rejoignent le xylème par un canal inconnu (en violet).

Déchets contre déchets

La pulpe de betterave pour le traitement de l'eau.

Comment éviter les rejets de métaux lourds dans les eaux usées des usines ? Les lagunages qui sont à la mode dans nombre de communes rurales éliminent bien les composés organiques des eaux usées, mais ils ne retiennent pas les métaux comme le plomb, le cuivre et leurs cousins, tous toxiques en concentrations élevées. Jean-François Thibaut et ses collègues de la Station INRA de Nantes ont trouvé un procédé pour capter ces atomes à l'aide d'un déchet de l'industrie agro-alimentaire : ils font passer les eaux usées à travers des pulpes de betteraves.

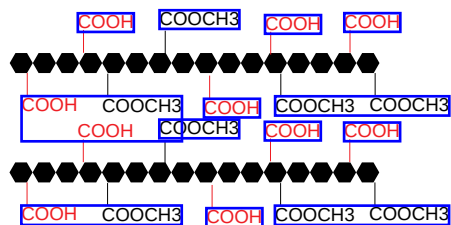
Ces dernières sont produites en abondance par les industries sucrières : les

25 millions de tonnes de betteraves produites chaque année en France engendrent, après extraction du sucre, 1,3 million de tonnes de pulpe sèche. Celle-ci est vendue pour l'alimentation animale à raison de 700 francs par tonne, mais elle est composée de molécules intéressantes : quelques sucres résiduels, et, surtout, de la cellulose et de la pectine. Ne peut-on tirer un meilleur parti de ces molécules élaborées ?

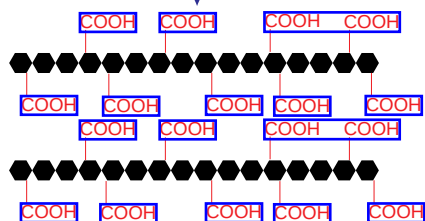
La pectine est un polymère, c'est-à-dire une molécule composée par l'enchaînement de sucres élémentaires, essentiellement l'acide galacturonique. C'est une molécule que connaissent bien les cuisiniers qui font des confitures : quand on chauffe des fruits en présence de sucre, elle est extraite des parois et passe en solution ; puis, quand le mélange refroidit, les molécules de pectine s'associent et forment un gel, la confiture. Toutefois, toutes les molécules de pec-

tine ne gélifient pas : tout dépend de leur groupes latéraux, qui sont soit des groupes acide carboxylique ($-\text{COOH}$), soit des groupes acides estérifiés par du méthanol ($-\text{COOCH}_3$). Ne gélifient que les molécules de pectine méthylées, c'est-à-dire comportant une forte proportion (plus de 70 pour cent) de groupes latéraux estérifiés. Les molécules de pectine de betterave, qui comportent peu de groupe méthylés, ont longtemps semblé sans intérêt, parce qu'elles ne gélifient pas, mais cet inconvénient portait un avantage : les nombreux groupes acide carboxylique peuvent se lier aux atomes métalliques ionisés (c'est-à-dire qui ont perdu des électrons).

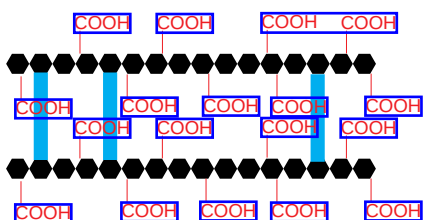
Ayant vérifié les propriétés d'absorption d'ions métalliques par la pulpe de betterave préalablement lavée, les chimistes de Nantes ont d'abord cherché un traitement qui augmenterait ces propriétés. Pourrait-on détacher le méthanol des



SAPONIFICATION



RETICULATION



Pour obtenir des molécules de pectines qui captent efficacement les métaux, on les saponifie, afin d'augmenter le nombre de sites fixateurs (en rouge), puis on les réticule (par des molécules schématisées en bleu) afin de limiter leur gonflement.

groupes latéraux méthylés afin de créer de nouveaux sites de liaison aux ions métalliques? Les chimistes ont traité la pulpe de betterave par une base, afin d'effectuer une réaction chimique de saponification (par la même réaction, on transforme les graisses en savon). Un traitement qui dure seulement une heure et demie double la capacité d'absorption des atomes métalliques.

Hélas, quand on saponifie ainsi les pectines, les mêmes groupes latéraux qui fixent des ions métalliques se lient aux molécules d'eau, de sorte que la pulpe gonfle excessivement quand on la met dans l'eau. Ce gonflement serait gênant, lors d'un traitement des eaux, car la pulpe qui aurait capté des ions métalliques devrait être coûteusement séchée avant d'être incinérée. Comment éviter ce gonflement? Les chimistes nantais ont proposé de lier les molécules. Les deux composés testés (le formaldéhyde, ou formol, et l'épichlorhydrine) relient des groupes latéraux hydroxyle (-OH) portés par les molécules de pectine. Si la réticulation par le formaldéhyde réduit la capacité de liaison, la réticulation par l'épichlorhydrine réduit considérablement le gonflement sans diminuer la capacité de fixation.

Glissements de terrain

La mécanique de l'écoulement du sable : une couche mince s'écoule difficilement.

Quoi de commun entre un éboulement de terrain, la chute du sable dans un silo, le déchargement d'un silo de céréales? Dans tous les cas, de la matière en grains s'écoule. Comment? Malgré l'importance des écoulements granulaires dans l'industrie et en géophysique, la simple question «à quelle vitesse coule une couche de sable sur une pente?» reste ouverte. Des expériences d'écoulement sur plan incliné apportent un début de réponse.

Les comportements des milieux composés de grains sont d'une grande variété. Lors de la construction d'un édifice, par exemple, le sol (granulaire) se déforme sous le poids et se comporte comme un solide, car les frottements des grains sont importants et les déformations sont lentes. En revanche, quand on secoue énergiquement une boîte partiellement remplie de sable, les collisions entre les grains sont élastiques et le milieu a les caractéristiques d'un gaz.

Toutefois, dans de nombreuses applications ou lors d'événements naturels, comme les avalanches et les glissements de terrain, les grains ont un comportement intermédiaire. Au cours d'une avalanche de roches, les grains roulent tout en restant en contact avec leurs voisins. Ils interagissent à la fois par collisions et par frottements. Comment décrire ces écoulements denses? Par analogie avec un liquide? Peut-être, mais le sable est loin de se comporter comme de l'eau.

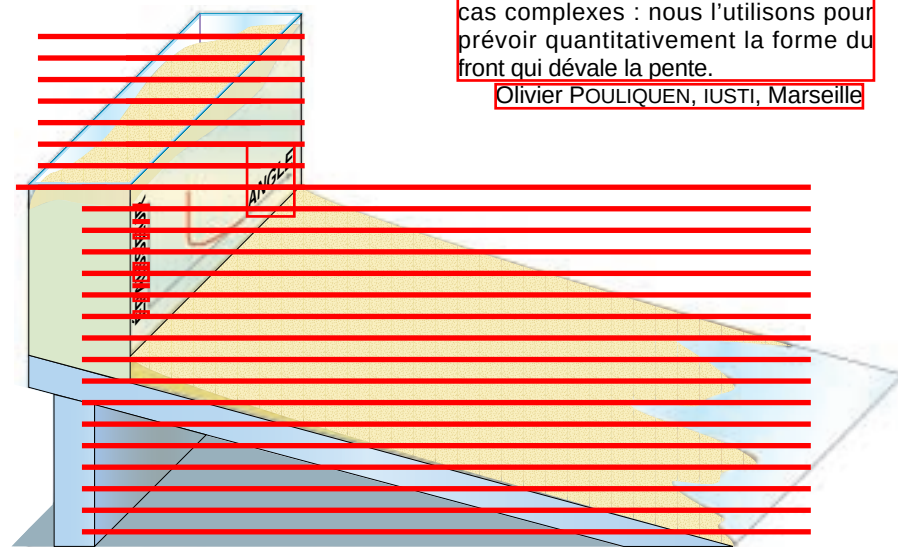
Une meilleure compréhension des propriétés d'écoulement passe par des expériences de laboratoire dans des configurations épurées.

L'expérience que nous avons réalisée consiste à faire couler un milieu granulaire simplifié (des billes de verre de 0,5 millimètre de diamètre) sur un plan incliné rugueux. Contrairement à un fluide classique, un milieu granulaire ne s'écoule pas dès que l'on incline le plan. Depuis un travail d'Augustin Coulomb, en 1773, on sait que le sable s'écoule quand l'angle du plan sur lequel il repose est supérieur à un angle critique, l'angle dit angle de talus. Toutefois nos expériences ont montré que le phénomène d'écoulement est plus complexe que ne l'avait pensé Coulomb : le seuil d'écoulement dépend à la fois de l'angle du support et de l'épaisseur de la couche de sable ; une couche mince coule plus difficilement qu'une couche épaisse.

Cet effet semble dû à la rugosité du support. Le dépôt qui subsiste après un écoulement est, d'ailleurs, une manifestation du phénomène : lorsque l'écoulement n'est plus alimenté, il reste sur le plan rugueux une couche immobile car le sable ne s'y écoule plus. Son épaisseur, mesurable, est celle pour laquelle l'écoulement s'arrête.

L'épaisseur du dépôt subsistant renseigne sur la vitesse de l'écoulement, comme l'ont révélé les mesures systématiques de vitesses d'écoulement que nous avons entreprises pour différentes valeurs des paramètres : angle d'inclinaison, épaisseur et rugosité du fond. Les données expérimentales se rassemblent sur une courbe reliant l'épaisseur du dépôt en fonction de l'angle d'inclinaison et elle permet de prévoir ces vitesses. La justification théorique de cette variation n'est pas élucidée, mais on détermine ainsi la vitesse d'écoulement dans des cas complexes : nous l'utilisons pour prévoir quantitativement la forme du front qui dévale la pente.

Olivier POULIQUEN, IUSTI, Marseille



Ce dispositif expérimental mesure l'épaisseur d'un dépôt après une avalanche de sable.

Les stratégies de défense des plantes

SERGE KAUFFMANN • STÉPHAN DOREY • BERNARD FRITIG

Pour améliorer la protection des plantes, on étudie leurs mécanismes naturels de défense contre les micro-organismes : elles reconnaissent l'agent pathogène, déclenchent une réaction locale, puis globale, et «mémorisent» l'attaque pour réagir plus efficacement lors d'un éventuel assaut ultérieur.

A chaque instant les plantes doivent faire face à l'agression de champignons, de bactéries, de virus ou encore de nématodes (des vers) et, bien sûr, d'insectes ou d'herbivores. Ne pouvant fuir devant l'agresseur, elles ont élaboré au cours de leur évolution des défenses efficaces contre les divers agents pathogènes, et aujourd'hui l'apparition d'une maladie est plus l'exception que la règle. Pourtant, près de 20 pour cent des récoltes sont perdues à cause de l'attaque d'agents microbiens. De surcroît, ce résultat n'est obtenu que par l'emploi massif de produits phytosanitaires : le marché mondial des fongicides est estimé, à lui seul, à 40 milliards de francs.

Cette utilisation de substances aidant les plantes à lutter contre les micro-organismes pathogènes est contestée, car elle n'est pas sans conséquences sur l'environnement. Depuis quelques années, la connaissance des mécanismes de défense des plantes a notablement progressé, et de nouvelles stratégies de protection des végétaux sont envisagées : elles sont fondées sur une stimulation maîtrisée des défenses que les plantes ont naturellement élaborées au cours de l'évolution. Elles complèteraient, voire remplaceraient, les méthodes actuelles de phytoprotection.

Dans la nature, la plupart des espèces végétales sont protégées contre la plupart des micro-organismes. Ces derniers sont généralement incapables de franchir les barrières protectrices externes des plantes, par exemple la cuticule, une cire qui recouvre les feuilles, ou la paroi

pecto-cellulosique, l'enveloppe semi-rigide qui entoure les cellules végétales (la pectine et la cellulose sont les deux principaux constituants de cette paroi). Cette résistance passive existe indépendamment de la présence d'un agent pathogène. Toutefois, certains agresseurs contournent ces barrières mécaniques et pénètrent dans les plantes par les pores naturels, les stomates, ou par une blessure accidentelle. Les envahisseurs ne se développent pas nécessairement dans la plante, car ils n'y trouvent pas toujours les éléments nécessaires à leur multiplication.

De la défense passive à la défense active

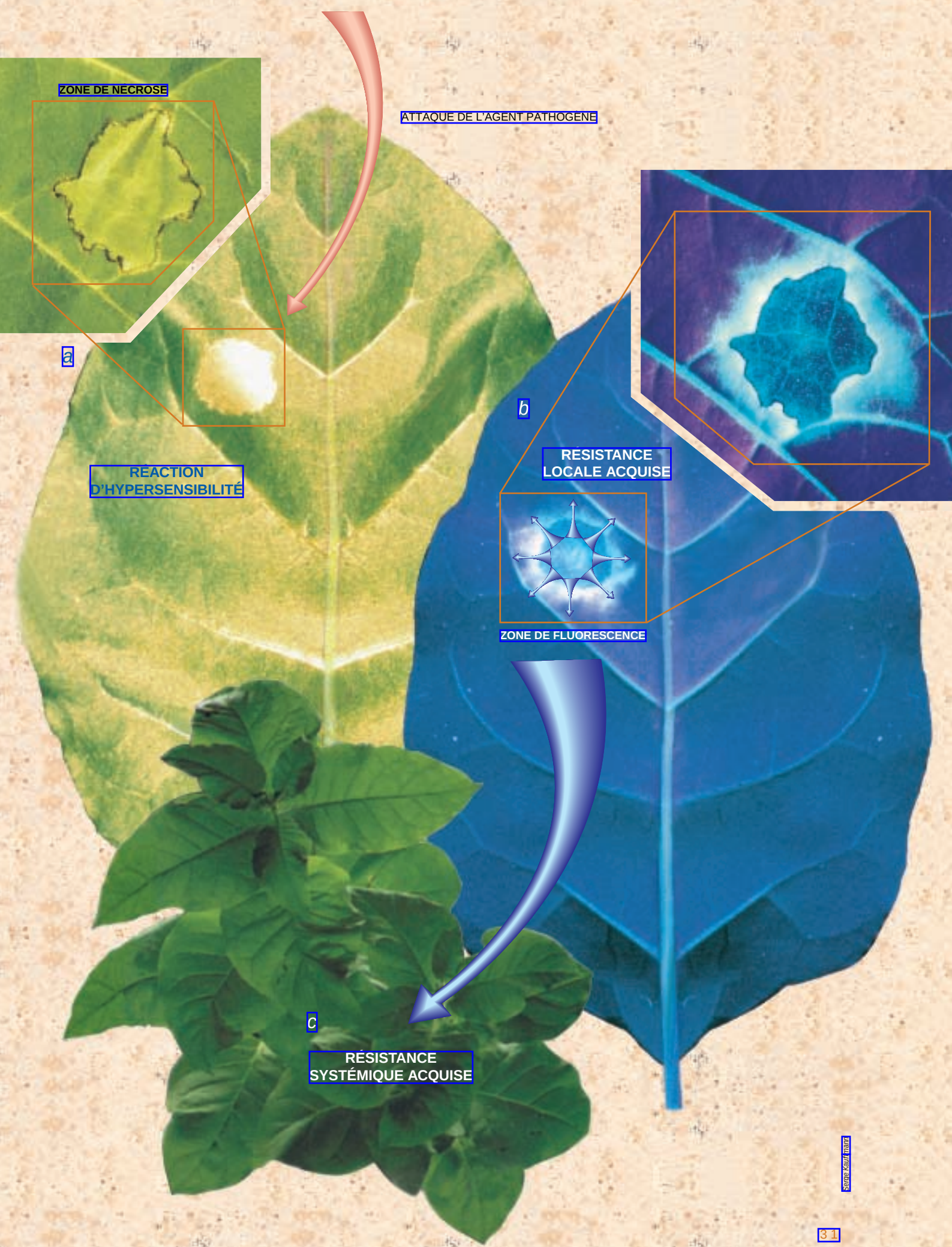
Lorsqu'un agent pathogène dispose des armes nécessaires pour envahir une plante, ou bien la plante ne le détecte pas, et l'envahisseur en profite : l'issue de l'interaction peut être fatale pour la plante hôte ; ou bien la plante parvient à confiner l'agresseur sur le site d'attaque grâce à la mise en place de défenses actives, déclenchées par la présence de l'agent pathogène.

Ces mécanismes de défense se déroulent en trois phases. La première, l'étape de reconnaissance de l'agent pathogène, est essentielle, puisque, sans elle, les étapes ultérieures ne se déclenchent pas. La deuxième phase est celle de l'activation d'une cascade de signaux dans les cellules attaquées et de la transmission des signaux d'alerte aux cellules environnantes et à la plante entière. Enfin, au cours de la troisième étape, les réactions de défense s'expriment.

Ce scénario – perception, signalisation, réaction – est celui de toute méthode de défense active contre un agresseur. Ainsi, lors d'une infection chez les mammifères, l'agent infectieux est détecté, divers signaux activent le système immunitaire et des réactions de défense adaptées s'expriment.

Dès qu'une plante détecte un agent pathogène, elle met en place un des systèmes de défense naturelle les plus efficaces : une réaction d'hypersensibilité. Cette réaction violente se manifeste souvent par l'apparition d'une petite tache nécrotique localisée sur le site de pénétration du parasite (voir les figures 1 et 2) :

1. LA DÉFENSE ACTIVE des plantes lors de l'attaque d'un micro-organisme pathogène a deux objectifs : elle limite la dissémination de l'agent pathogène au site d'attaque et prépare la plante à mieux réagir à une possible agression ultérieure. Deux mécanismes concourent à stopper l'assaillant. D'une part, sur le site de pénétration de l'agresseur, les cellules infectées s'autodétruisent (a) pour retarder la progression de l'agresseur ; on constate une tache nécrosée en lumière visible. D'autre part, avant de s'autodétruire, les cellules émettent des signaux d'alerte vers les cellules avoisinantes, créant une zone de résistance locale acquise où s'accumulent de nombreux composés de défense. Cette zone, plus large que la zone nécrosée est visualisée chez le tabac quand la feuille est observée sous un rayonnement ultraviolet (b). Des signaux d'alerte sont également envoyés dans la plante entière (c) pour créer un état de veille qui lui permettra de réagir encore plus efficacement contre une nouvelle infection : c'est la **résistance systémique acquise**.

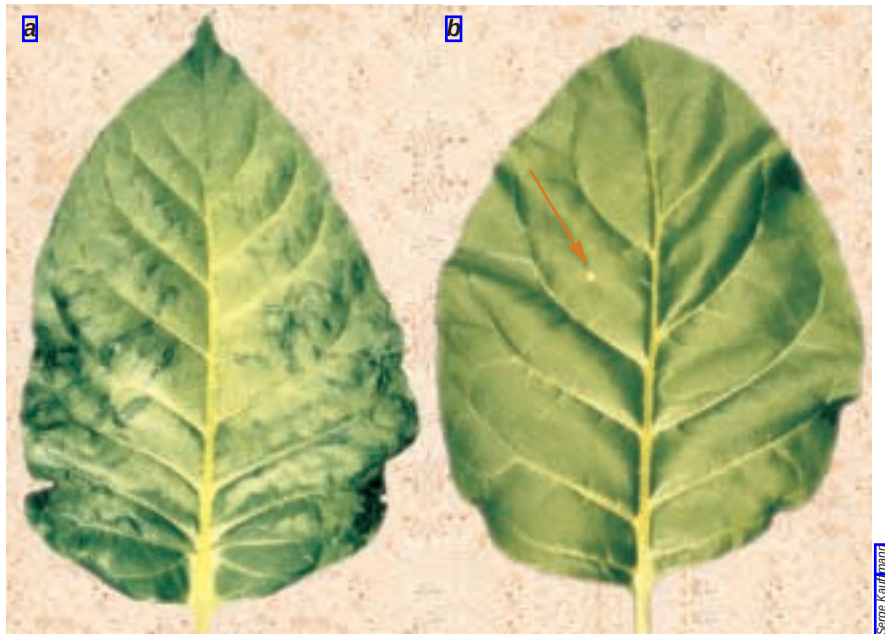


les premières cellules végétales infectées meurent. La mort cellulaire hypersensible est une forme de mort cellulaire programmée.

Chez les animaux, l'apoptose (une mort cellulaire génétiquement programmée) intervient dans de nombreux processus physiologiques, dont les mécanismes de défense contre des agents pathogènes. L'apoptose se caractérise par une condensation du cytoplasme et du noyau, une fragmentation de l'ADN et la formation de corps apoptotiques (les cellules apoptotiques présentent des renflements qui se détachent et forment les corps apoptotiques).

Chez l'arabette (une mauvaise herbe) et chez le soja, l'infection par certaines bactéries aboutit à une mort cellulaire qui présente de nombreuses caractéristiques de l'apoptose, notamment une fragmentation de l'ADN nucléaire et l'induction d'enzymes spécifiques, que l'on observe aussi dans des cellules de tabac au cours d'une infection par le virus de la mosaïque du tabac. Toutefois, certaines caractéristiques de l'apoptose animale, telle la formation de corps apoptotiques, ne sont pas observées lors d'une réaction d'hypersensibilité. L'apoptose animale et la mort cellulaire programmée de type hypersensible chez les plantes ne sont pas rigoureusement identiques, même si elles sont toutes deux des mécanismes génétiquement programmés.

Ce suicide de quelques cellules pour tenter de sauver la plante entière, est suivie de l'expression de gènes de défense qui aboutit à l'accumulation de protéines et de composés antimicrobiens. Le but d'une réaction d'hypersensibilité semble être de retarder suffisamment longtemps l'invasion microbienne, afin que les autres mécanismes de défense, notamment la production d'antibiotiques, aient le temps de se mettre en place. En fait, c'est la combinaison de cette mort hypersensible et de réactions de défense locales intenses qui assurent le confinement de l'agent pathogène sur son site de pénétration. La zone où ont lieu ces réactions de défense intenses est nommée zone de résistance locale acquise, que l'on observe sur le tabac lorsqu'on éclaire les feuilles infectées au moyen d'un rayonnement ultraviolet. Toutefois, la plante ne se contente pas de combattre localement l'infection primaire.



2. LA RESISTANCE DES PLANTES AUX INFECTIONS est d'origine génétique. Après une infection, la feuille de la plante dépourvue du gène de résistance (a) est boursoufflée et recroquevillée : elle est envahie de particules virales ; la plante pousse mal. La feuille de la plante qui a le gène de résistance (b) ne présente qu'une minuscule tache nécrotique après une attaque du virus (à l'extrémité de la flèche). Toutefois, si, au lieu d'observer

Elle émet des signaux d'alerte vers toutes les autres cellules de l'organisme pour les préparer à réagir plus efficacement lors d'une autre agression. C'est le phénomène de résistance systémique acquise.

Ce type de résistance, plus tardive et moins intense, met la plante dans un état de veille qui la maintient prête à réagir rapidement à toute nouvelle attaque du premier pathogène ou d'un autre agresseur. Cette stratégie a l'intérêt de ne pas mobiliser en permanence les ressources défensives de la plante : seules quelques sentinelles veillent. Ce phénomène rappelle celui de l'immunisation chez les mammifères.

Les armes de défense

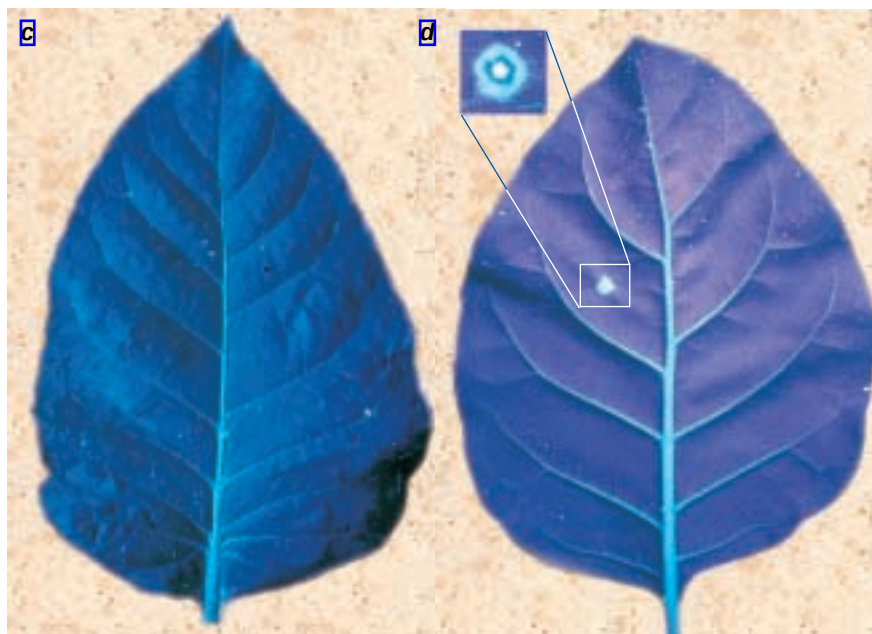
De quelles armes moléculaires les plantes disposent-elles pour se protéger ? De nombreuses équipes ont cherché à identifier les modifications métaboliques qui, dans la plante, participent à la lutte contre l'infection. Toutes les réactions d'espèces végétales très diverses se ressemblent, et l'on retrouve systématiquement trois grandes catégories de réactions : une stimulation de certaines voies métaboliques secondaires, notamment celles de la production des antibiotiques végétaux, le renforcement de la paroi pecto-cellulosique et la

production de toute une gamme de protéines de défense.

Les métabolismes secondaires jouent un rôle essentiel en permettant notamment la production des antibiotiques végétaux, de petites molécules nommées phytoalexines. Chez le tabac, par exemple, ce sont les molécules de scopolétine (une phytoalexine) que l'on observe en lumière ultraviolette.

D'autre part, dès qu'un attaquant est perçu, on constate que la plante réagit en déclenchant un épaississement de sa paroi. Le dépôt de macromolécules, telles que des protéines, des polysaccharides, et des polymères aromatiques qui ressemblent à la lignine (un des principaux constituants du bois), renforce la matrice extracellulaire sur le site de l'attaque ; ce dépôt accroît la résistance des parois cellulaires aux enzymes microbiennes. Ces enzymes font partie de l'arsenal d'attaque des micro-organismes : elles « digèrent » les parois cellulaires pour que l'envahisseur puisse se frayer un chemin jusqu'au cœur des cellules et s'y multiplier.

Enfin, l'arsenal défensif des plantes comprend de nombreux peptides et protéines de défense. Parmi ces dernières, les protéines PR ont été découvertes en 1970 chez le tabac (pour *Pathogenesis related*, c'est-à-dire protéines liées à la pathogénèse). Elles ont des propriétés physico-chimiques communes et qui leur sont spécifiques :



es feuilles en lumière visible, on utilise un rayonnement ultraviolet, on constate que la feuille de la plante sensible est uniformément bleue (c), tandis que celle de la plante résistante (d) qui a subi l'attaque virale présente une tache claire due à des molécules de défense fluorescentes : la plante a produit localement des substances qui ont empêché le virus de se répandre dans la plante entière.

elles sont très stables en milieu acide et résistent à l'action des protéases produites par la plante elle-même ou par les micro-organismes pathogènes. Ces deux propriétés leur confèrent une grande stabilité dans les environnements défavorables où elles s'accumulent, notamment dans la vacuole, et dans les espaces intercellulaires occupés par les agents pathogènes. La vacuole est une volumineuse poche au sein des cellules végétales qui sert à stocker différents composés, parfois toxiques.

Bien qu'elles soient produites abondamment, l'identification de leur activité biologique a été difficile. En 1987, nous avons montré que certaines ont une activité enzymatique identique à celle de la β -1,3-glucanase ou de la chitinase, enzymes qui dégradent, parfois en synergie, la paroi des champignons et des bactéries. Depuis, l'activité biologique d'autres protéines PR a été élucidée. Certaines inhibent des protéases ou des polygalacturonases microbiennes, importantes pour le pouvoir pathogène des micro-organismes : les protéines PR désarment ainsi leur agresseur. D'autres protéines de défense perforent les membranes des champignons. Aujourd'hui, on a établi que les protéines PR sont présentes dans toutes les plantes et ont toutes d'intenses activités antimicrobiennes (antifongique et antibactérienne).

Détecteurs d'effraction

L'étude des réactions de défense en a révélé un aspect surprenant : elles ne sont pas spécifiques de l'agent agresseur. C'est, par exemple, le cas du tabac infecté par le virus de la mosaïque du tabac. Parmi les défenses mises en place par le tabac pour confiner le virus sur son site d'attaque, plus d'une trentaine de protéines de défense de type PR sont produites, mais aucune n'a d'activité antivirale spécifique. Ainsi les premières réactions de défense déclenchées par un virus consistent, d'une part, à confiner au maximum le virus sur son site d'attaque et, d'autre part, à produire en abondance des substances antibactériennes et antifongiques. Cette réaction non spécifique de l'agresseur est paradoxale dans la mesure où le déclenchement de ces réactions tous azimuts dépend, au contraire, d'une reconnaissance très spécifique de l'agent pathogène par la plante hôte.

C'est l'envahisseur lui-même qui produit une molécule, nommée éliciteur, que la plante attaquée reconnaît : il code sa propre perte. Les gènes qui codent ces protéines reconnues par les plantes sont nommés gènes d'avirulence : ils déclenchent les réactions de la plante qui vont neutraliser l'envahisseur, et le rendre « avirulent ». Chez

la plante, le gène codant la protéine (jouant le rôle de récepteur) qui reconnaît l'éliciteur produit par l'assaillant est nommé gène de résistance (il rend la plante résistante à l'agent pathogène exprimant le gène d'« avirulence » correspondant, dans une relation gène-pour-gène).

Les sélectionneurs ont, dès le début du XX^e siècle, remarqué l'existence de tels gènes de résistance chez les plantes ; ces gènes se transmettent selon les lois de Mendel. Dans les années 1940, le biologiste américain Harold Flor a étudié les interactions du lin et de l'agent de la rouille du lin, *Melampsora lini*. Il fut le premier à formaliser l'existence d'une reconnaissance d'origine génétique. En 1983, les premiers gènes d'avirulence ont été isolés chez les bactéries, puis chez un virus et chez des champignons. Il faudra dix années supplémentaires pour que le premier gène de résistance de plante soit isolé : c'était le gène *Pto* de tomate.

Aujourd'hui, une trentaine de gènes de résistance ont été isolés. Bien qu'ils rendent les plantes résistantes à des agents pathogènes de nature variée (virus, bactéries, champignons, nématodes), les produits des gènes de résistance ont des structures similaires. Ainsi, à l'exception du produit du gène *Pto* de la tomate, toutes les protéines codées par les gènes de résistance ont des motifs riches en leucine (la leucine est un acide aminé constituant des protéines). Ces motifs interviennent dans les interactions des protéines. On a récemment montré que les échanges de séquences d'ADN non codant (les séquences situées entre les gènes), notamment dans la région qui code les motifs riches en leucine, contribuent à la diversité des gènes de résistance et, par conséquent, à la spécificité de la reconnaissance entre le pathogène et la plante hôte.

La majorité des gènes de résistance codent des protéines ayant des domaines caractéristiques de récepteurs présents chez les mammifères, la drosophile ou encore la levure. Ainsi le domaine nommé Toll / interleukine 1 ressemble au domaine de la protéine Toll de drosophile et au récepteur de l'interleukine 1 de mammifère (on dit que ces domaines présentent de fortes homologies). Les produits des gènes de résistance qui ont ce domaine déclencheraient une cascade de signaux intracellulaires similaire à celle due à l'interaction de Toll et du récepteur de

l'interleukine 1. On en déduit que les systèmes de reconnaissance sont très conservés parmi tous les organismes vivants.

De multiples systèmes de détection

D'autres molécules, les éliciteurs généraux, sont des systèmes de perception moins spécifiques que les éliciteurs décrits précédemment. Les cellules végétales peuvent détecter des composants issus des micro-organismes pathogènes, nommés éliciteurs exogènes, ou issus de la plante elle-même, les éliciteurs endogènes. De nature chimique variée, ce sont des protéines, telles les élicitines produites par les champignons de l'espèce *Phytophthora* responsable du mildiou chez de nombreuses plantes cultivées, des lipides, tel l'acide arachidonique, des oligosaccharides, tels les β -glucanes et la chitine issus de la paroi des champignons, et des oligogalacturonides dérivés de la pectine des parois des cellules végétales. Certains éliciteurs généraux déclenchent une réaction d'hypersensibilité au même titre que les éliciteurs spécifiques, d'autres seulement des réactions de défense, sans mort cellulaire.

Pourquoi, au cours de l'évolution, les micro-organismes ne se sont-ils pas débarrassés de ces molécules qui éveillent si efficacement les systèmes de défense de leurs proies? Parce que ces molécules sont généralement indispensables à la survie des micro-organismes. Ainsi, l'équipe de Jean-Pierre Blein, de l'Institut national de recherche agronomique, l'INRA, à Dijon, a montré que, dans le cas des champignons *Phytophthora*, les élicitines assurent le transport des stéroïdes, des substances nécessaires à leur métabolisme, mais qu'ils ne synthétisent pas eux-mêmes. Par ailleurs, l'équipe d'Alain Pugin de l'Université de Bourgogne, à Dijon, a montré que ces élicitines sont aussi reconnues spécifiquement via un récepteur par les cellules de tabac, où elles déclenchent une réaction d'hypersensibilité.

Comment les éliciteurs généraux activent-ils les cascades d'événements biochimiques qui aboutissent à la stimulation des réactions de défense? La plupart ont des récepteurs (intra- ou extracellulaires), mais certains interagissent directement avec la membrane cellulaire. Dès que l'éliciteur est perçu, une cascade de signaux s'active. Pour

identifier les éléments d'une voie de signalisation, on étudie l'action d'éliciteurs sur des systèmes simplifiés, des suspensions cellulaires. On utilise des inhibiteurs ou des activateurs de divers composants des voies de signalisation étudiées chez les animaux (par exemple, des inhibiteurs des canaux ioniques ou de diverses enzymes). Nous décrivons les réactions déclenchées par la cryptogéine, une élicitine issue du champignon *Phytophthora cryptogea*, sur des suspensions de cellules de tabac. Les élicitines, découvertes par l'équipe de Pierre Rici de l'INRA, à Antibes, sont un outil performant pour l'étude de la cascade de signalisation.

La détection de la cryptogéine modifie la perméabilité membranaire : des ions calcium affluent dans la cellule et des ions potassium et chlore en sortent massivement. Les ions calcium jouent un rôle essentiel dans la cascade de signalisation qui aboutit aux réactions de défense, notamment parce qu'ils activent des enzymes, nommées protéines kinases, qui phosphorylent diverses protéines (c'est-à-dire leur ajoutent des groupes phosphate). Certaines de ces protéines kinases présentent de fortes homologues avec une classe de kinases de mammifères et de levures, nommées les MAP-kinases. L'activation des protéines G, généralement associées à des récepteurs membranaires, constituent également l'un des événements les plus précoces après l'étape de reconnaissance. Ces protéines assurent la transmission des messages, et leur activation semble même précéder l'entrée des ions calcium dans la cellule.

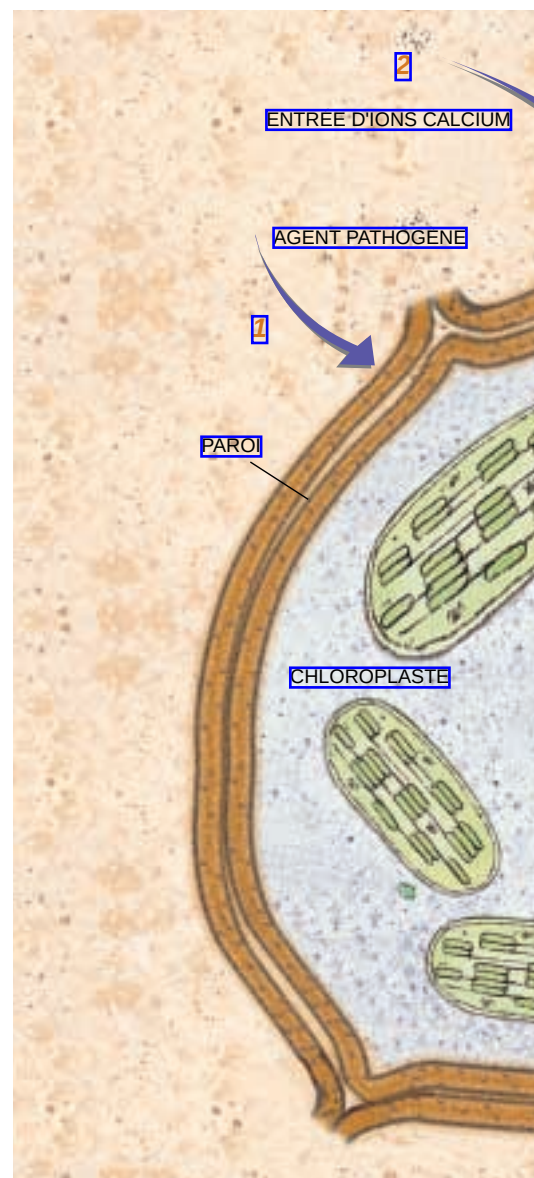
Le stress oxydatif

Parmi les réactions précoces déclenchées par la perception de cryptogéine, on observe aussi la production de formes réactives de l'oxygène (ou radicaux oxydants). La production rapide de radicaux oxydants, ou stress oxydatif, est un phénomène qui se produit chez toutes les plantes qui ont subi une perturbation biologique ou une dégradation physique.

Au cours des dernières années, plusieurs équipes, dont la nôtre, ont étudié le rôle des radicaux oxydants dans les réactions de défense des plantes. C'est surtout le cas des anions superoxydes (O_2^-) et du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Le radical O_2^- est instable et forme facilement H_2O_2 .

Plusieurs études ont confirmé la production de O_2^- et de H_2O_2 lors d'interactions de plantes et d'agents pathogènes ou d'éliciteurs. Une enzyme, la NADPH-oxydase localisée sur la membrane des cellules végétales, participe en tout premier chef à la production de radicaux oxydants. Certaines cellules du système immunitaire des mammifères, les macrophages, disposent d'une enzyme similaire qui produit aussi des radicaux oxydants lors des réactions immunitaires.

Les formes réactives de l'oxygène produites lors d'un stress oxydatif peuvent être directement toxiques pour le parasite et jouer alors le rôle



3. LES RÉACTIONS qui suivent l'attaque d'un agent pathogène (1) commencent par une entrée massive d'ions calcium (2) dans la cellule, accompagnée d'une sortie d'ions potas-

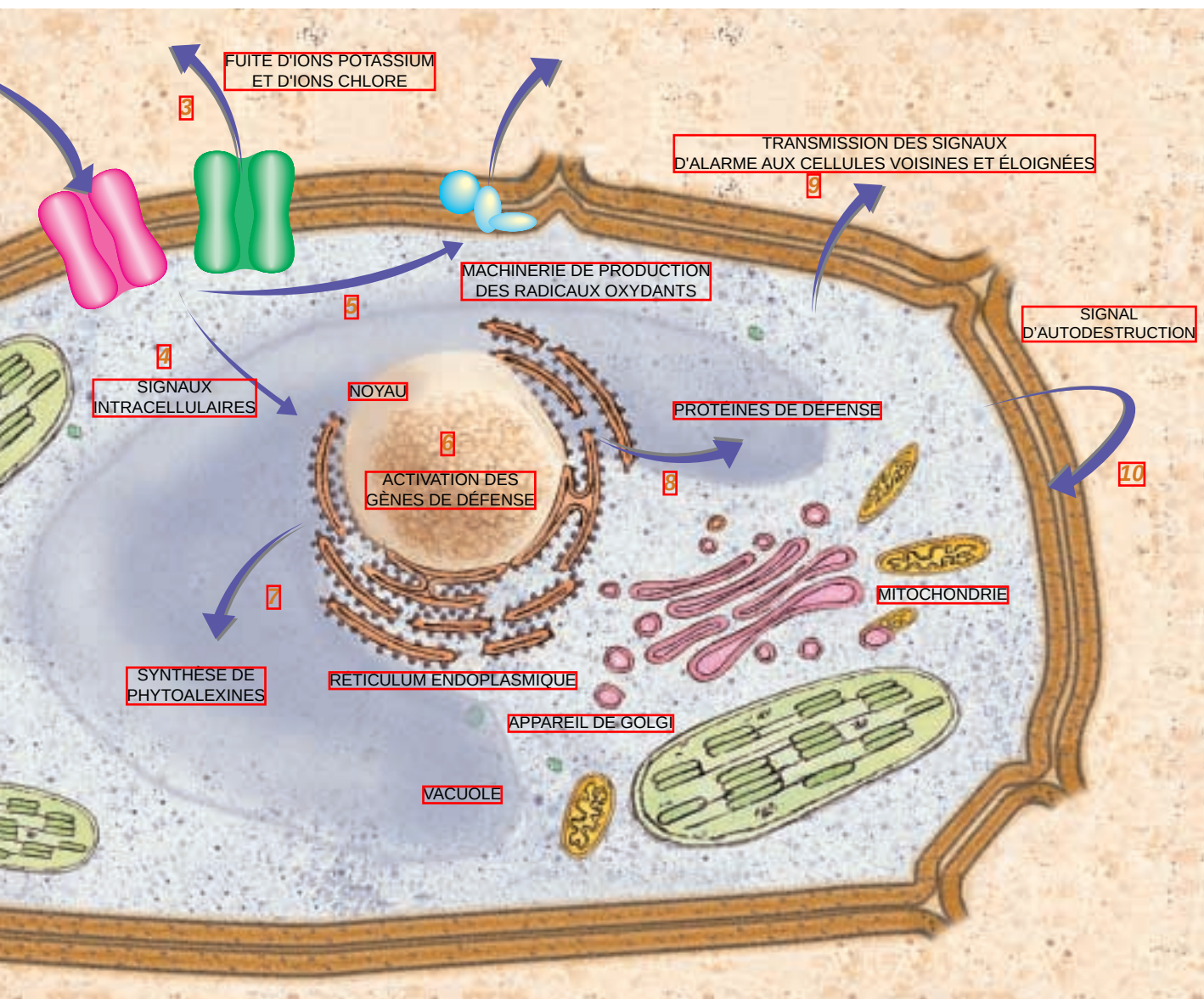
d'antimicrobiens. Ainsi, H_2O_2 inhibe la germination des spores de plusieurs champignons pathogènes. Des plants transgéniques de pomme de terre exprimant l'enzyme glucose oxydase qui produit H_2O_2 résistent mieux à la bactérie *Erwinia*, responsable du «feu bactérien», et au champignon *Phytophthora infestans*, qui attaqua la pomme de terre et fut responsable de la famine en Irlande au début du XX^e siècle, que les plantes qui ne l'expriment pas. Les radicaux oxydants renforcent également la paroi végétale : le mécanisme d'éllicitation conduit parfois très rapidement à la polymérisation, en présence de H_2O_2 des protéines de la paroi végétale.

Les radicaux oxydants activent les gènes de défense, et la forme la plus stable, H_2O_2 , semble déclencher la synthèse de phytoalexines chez le tabac. Cette molécule stimule aussi l'expression des protéines de défense : des plants transgéniques de tabac qui accumulent H_2O_2 expriment naturellement des protéines PR. On a observé un résultat similaire chez la pomme de terre et chez le soja. Ainsi, les formes réactives de l'oxygène participent au déclenchement de diverses réactions de défense.

Outre leur rôle dans le déclenchement des réactions de défense, les formes oxydantes interviendraient dans les réactions liées à la mort de certaines

cellules végétales : parce que ces radicaux peroxydent les lipides qui constituent les membranes, ils sont toxiques pour les cellules végétales. Enfin, les formes oxydantes pourraient aussi jouer le rôle de molécule signal dans le déclenchement de la mort cellulaire programmée.

Le monoxyde d'azote, NO , est une forme particulière de radical oxygéné qui intervient dans différentes situations normales ou pathologiques, par exemple les mécanismes inflammatoires chez les mammifères. Récemment, on a montré que l'application de substances libérant NO sur des feuilles de tabac déclenche la synthèse de protéines PR. Ainsi, NO fonctionne comme



sium et d'ions chlore (3). Ensuite, des signaux d'alarme sont émis vers l'intérieur de la cellule (4) et vers la machinerie de production des radicaux oxydants. La cascade des réactions, qui s'enchaînent ou se déroulent parallèlement, aboutit à l'activation des gènes de défense (6),

puis à la synthèse d'antibiotiques végétaux, les phytoalexines (7), et de protéines de défense (8). La cellule infectée transmet les signaux d'alarme aux cellules voisines et éloignées (9) et s'autodétruit (10). Elle meurt avant que les étapes 7 et 8 soient achevées.

PERCEPTION DE L'AGRESSEUR

REACTION D'HYPERSENSIBILITÉ

RÉSISTANCE LOCALE ACQUISE

RÉSISTANCE SYSTÉMIQUE ACQUISE

ACTIVATION DU PROGRAMME DE MORT CELLULAIRE

ACTIVATION DES GÈNES DE DÉFENSE DE CLASSE I

INTERVENTION DE L'ACIDE SALICYLIQUE

ACTIVATION DES GÈNES DE DÉFENSE DE CLASSE I

INTERVENTION DE L'ACIDE SALICYLIQUE

ACTIVATION DES GÈNES DE LA RÉSISTANCE SYSTÉMIQUE ACQUISE

ACTIVATION DES GÈNES DE DÉFENSE DE CLASSE II

PRODUCTION DE PROTÉINES DE DÉFENSE PR

SARPE AOUT 1999

4. LA PERCEPTION D'UN AGENT PATHOGENE déclenche plusieurs cascades de réactions. La première, la réaction d'hypermensibilité, est la plus localisée, puisqu'elle ne concerne que la ou les toutes premières cellules infectées. Les signaux d'autodestruction (ou mort cellulaire programmée) sont émis en même temps que des signaux d'activation de l'expression de différents gènes (classe i) indispensables notamment à la production des antibiotiques végétaux. Toutefois, la cellule infectée meurt avant d'avoir eu le temps de produire ces molécules de défense. Simultanément, des signaux sont émis vers les cellules voisines qui, elles, produisent de grandes quantités d'antibiotiques végétaux et de protéines de défense (produits des gènes de classe ii) : c'est la réaction de résistance locale acquise. Ces deux réactions localisées ont pour but d'arrêter la progression de l'agent pathogène. Enfin, des signaux sont émis vers la plante entière, laquelle se met dans un état de veille qui potentialise son aptitude à lutter contre une éventuelle nouvelle agression : c'est la résistance systémique acquise. L'acide salicylique est un signal indispensable à l'établissement de ces résistances.

une molécule signal aussi bien chez les animaux que chez les végétaux.

Des réactions locales à la résistance globale

Trois types de molécules endogènes semblent agir dans la signalisation intercellulaire lors de l'interaction d'une plante et d'un agent pathogène : l'acide salicylique (dont dérive l'aspirine), l'éthylène et l'acide jasmonique. Depuis quelques années, un grand nombre d'études ont confirmé que l'acide salicylique joue un rôle clé de molécule signal dans la résistance systémique acquise. L'acide jasmonique et l'éthylène se sont également révélés indispensables au bon fonctionnement des voies de signalisation parallèles à celle de l'acide salicylique.

La production d'acide salicylique augmente localement et globalement après infection par différents types d'agents pathogènes. L'acide salicylique participe à la fois au confinement de l'agresseur sur le site primaire d'infection et à la mise en place de la résistance systémique acquise. Il déclenche l'expression de protéines de défense, notamment des protéines PR. On sait depuis longtemps que le signal responsable de l'établissement de la résistance systémique acquise est transporté

par voie générale des feuilles où a lieu l'infection primaire jusqu'aux feuilles non infectées. Ce signal chimique est peut-être l'acide salicylique : des expériences de marquage ont montré qu'une partie de l'acide salicylique présent dans les portions non infectées d'une plante provient de l'acide salicylique synthétisé dans la feuille infectée. Toutefois, d'autres expériences menées par le groupe de John Ryals, alors aux Laboratoires Ciba-Geigy, aux États-Unis, indiquent que l'acide salicylique ne serait pas le «vrai» signal mobile.

Ce groupe a établi l'importance de l'acide salicylique dans l'acquisition de la résistance locale et de la résistance systémique. Les expériences ont été faites sur des plants de tabac exprimant un gène bactérien qui code l'enzyme salicylate hydroxylase, laquelle catalyse la dégradation de l'acide salicylique. Dans ces plantes, l'activation des gènes commandés par l'acide salicylique diminue ; elle est même parfois totalement inhibée. Ces plantes transgéniques n'acquièrent aucune résistance systémique, et la résistance locale est notablement atténuée, voire abolie.

Outre son rôle dans l'expression des protéines de défense, l'acide salicylique participerait aussi, localement, au mécanisme de mort cellulaire hypersensible :

quand on bloque l'accumulation précoce d'acide salicylique lors d'une attaque du tabac par le virus de la mosaïque du tabac, la mort cellulaire des cellules infectées est retardée.

L'éthylène, une hormone végétale volatile, participe à plusieurs mécanismes physiologiques, notamment au mûrissement et au vieillissement des plantes, mais aussi à leurs mécanismes de défense. Il ne semble pas conditionner toutes les résistances dans toutes les espèces végétales, mais seulement la résistance à certains types d'agents pathogènes. L'éthylène étant un gaz, il diffuse partout dans la plante, et jouerait un rôle de signal endogène mobile.

Une dernière entité chimique, l'acide jasmonique, et son dérivé, le méthyle jasmonate, sont synthétisés à partir de l'acide linoléique ; ils participent à la croissance et au développement des plantes, mais également à la signalisation aboutissant aux réactions de défense. Les différentes voies de signalisation – celle de l'acide salicylique et celles de l'éthylène et de l'acide jasmonique – ne sont pas indépendantes. Dans certains cas, les signaux agissent en synergie pour activer la synthèse des protéines de défense. Par exemple, dans des plantules de tabac, l'expression des gènes des protéines PR est supérieure lorsque l'on applique sur les feuilles une combinaison de méthyle jasmonate et d'éthylène.

Ainsi, la transduction des signaux dans les cellules ou entre elles repose sur différents systèmes d'interaction. De nombreux composants de la signalisation intracellulaire sont les mêmes dans les différentes espèces étudiées, et certains participent aussi à la signalisation chez les animaux. De surcroît, bien que les signaux intercellulaires tels que l'acide salicylique, l'acide jasmonique et l'éthylène soient aussi présents ensemble dans de nombreuses interactions, ils semblent commander deux voies de signalisation intercellulaires distinctes : une voie où intervient l'acide salicylique et une autre pour l'acide jasmonique et l'éthylène. Selon la voie empruntée, les plantes acquièrent des résistances à des agents pathogènes différents. Ces différentes voies ne sont pas complètement indépendantes et une régulation fine s'exerce entre les différents composants pour optimiser l'établissement de la résistance.

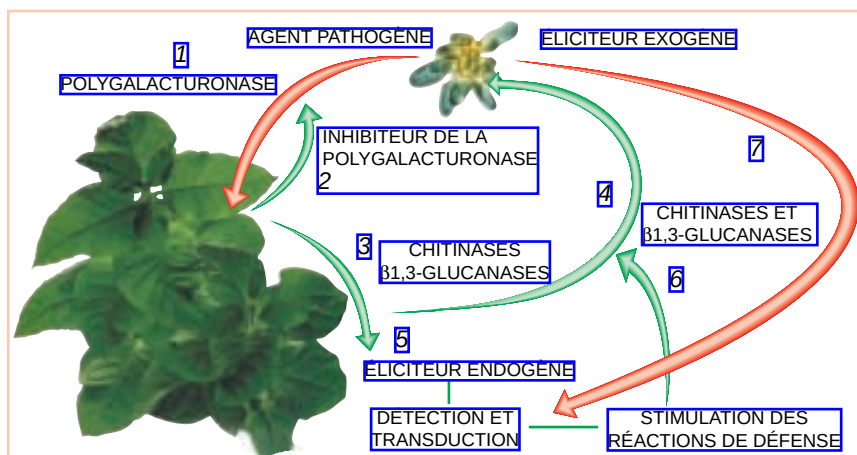
D'autres signaux interviennent pour amplifier les réactions de défense.

Il s'agit d'oligosaccharides produits par des enzymes d'origine microbienne et d'origine végétale. Ainsi, certains champignons produisent des polygalacturonases qui dégradent rapidement la paroi végétale. La plante riposte contre ces facteurs d'agressivité en synthétisant des inhibiteurs de polygalacturonases qui freinent la dégradation de la paroi végétale et, par conséquent, freinent la progression de l'agent pathogène. Comme ces inhibiteurs n'inactivent pas totalement la polygalacturonase, la paroi végétale continue à être partiellement dégradée ; des fragments oligosaccharidiques ayant une activité d'éléciteurs sont alors libérés de la paroi et activent les réactions de défense. La paroi végétale est à la fois un rempart mécanique et un réservoir de signaux d'activation des réactions de défense.

Un système d'amplification

De surcroît, la plante utilise également la paroi des cellules de champignons agresseurs comme une source d'oligosaccharides qui déclenchent les réactions de défense. Ce sont certaines enzymes de la plante, telles les β -1,3-glucanases ou les chitinases, qui permettent la libération de nouveaux signaux qui, eux-mêmes, déclenchent la synthèse de nouvelles β -1,3-glucanases et chitinases végétales : le système de défense de la plante est ainsi amplifié. Parfois, l'agent pathogène riposte en produisant un inhibiteur de ces enzymes végétales.

Le système de défense des plantes vis-à-vis d'agents pathogènes très variés comporte donc différentes stratégies complémentaires, simultanées ou différées, localisées ou globales. Les mécanismes sous-jacents sont coordonnés dans l'espace (dans la plante) et dans le temps : certaines réactions se déclenchent en quelques secondes ou en quelques minutes sur le site d'infection, d'autres, éloignées apparaissent après plusieurs heures. Certaines cessent avec l'emprisonnement, parfois la mort, du parasite, d'autres persistent plusieurs semaines, notamment celles qui assurent un état de veille préparant la plante entière à être encore plus performante lors d'une nouvelle agression. Les modalités de la contre-attaque de la plante mettent en jeu un arsenal d'armes diverses qui visent plusieurs cibles de l'agent pathogène, augmentant d'autant l'efficacité de la défense.



5. DES MÉCANISMES D'AMPLIFICATION renforcent les défenses des plantes. L'agent pathogène produit l'enzyme polygalacturonase (1) qui dégrade la paroi de la plante, laquelle synthétise un inhibiteur de l'enzyme (2). Dès l'attaque, elle libère aussi les enzymes chitinases et β 1,3-glucanases (3) qui attaquent la paroi des cellules de l'agent pathogène (4). L'inhibiteur de la polygalacturonase n'empêche pas totalement l'enzyme d'agir : la paroi végétale est un peu dégradée et libère des éléciteurs endogènes (5) ; ces derniers activent les réactions de défense, notamment la synthèse de nouvelles enzymes chitinases et β 1,3-glucanases (6), lesquelles renforcent l'action des premières. Ces enzymes, agissant sur la paroi des cellules de l'agent pathogène libèrent des éléciteurs exogènes qui stimulent aussi les réactions de défense de la plante (7).

Aujourd'hui, nous connaissons des signaux capables de déclencher, hors de toute infection, une partie, voire la totalité, de ces réactions de défense. Ainsi, avec la Société Goëmar, à Saint-Malo, et la Société Biotransfer, à Montreuil, nous avons montré que des extraits d'algues, nommés laminarines et contenant des glucanes, sont de puissants éléciteurs de réactions de défense qui ne déclenchent pas de mort cellulaire. Ils protègent efficacement des plantes d'intérêt agronomique telles que le blé, l'orge, le riz, la vigne ou les pommiers contre différentes maladies. Une telle démarche, fondée sur la stimulation des défenses des plantes à l'aide de composés naturels non toxiques, concilie agriculture performante et respect de l'environnement. On envisage d'étendre ce type d'actions protectrices ; en utilisant de tels

produits naturels en synergie avec les pesticides chimiques, on pourrait diminuer les volumes des pesticides et des fongicides. Cette démarche pourrait éviter la production de plantes transgéniques qui rencontre, pour l'instant, des oppositions par crainte d'une éventuelle dissémination non maîtrisée des gènes étrangers introduits dans ces plantes. Simultanément, avec la Société Rhône-Poulenc Agro, nous cherchons à élucider la nature des signaux émis par la plante lors de l'induction de la résistance locale acquise. Nous pourrions peut-être les utiliser pour stimuler cette réaction locale de défense, particulièrement efficace.

De ces recherches des mécanismes de défense des plantes naîtront sans doute des méthodes de protection des cultures plus efficaces et qui, surtout, respecteront mieux l'environnement.

Serge KAUFFMANN est directeur de recherche au CNRS, dans le laboratoire de Phytopathologie moléculaire à l'Institut de biologie moléculaire des plantes (IBMP) de Strasbourg, où Stéphane DOREY a préparé une thèse sur les mécanismes de la réaction hypersensible. Bernard FRITIG dirige le département Mécanismes moléculaires des réponses des végétaux aux agents pathogènes et aux xénobiotiques de l'Institut de biologie moléculaire des plantes.

Plant-Microbe Interactions, in *The Plant Cell*, numéro spécial, vol. 10, n° 10, 1996.
J. T. GREENBERG, *Programmed Cell Death in Plant-Pathogen Interactions*, in *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* vol. 48, pp. 525-545, 1997.
B. FRITIG et al., *Antimicrobial proteins in induced plant defense*, in *Curr. Opin. Immunol.*, vol. 10, pp. 16-22, 1998.
X. Dong, *Salicylic Acid, Jasmonic Acid, Ethylene, and Disease Resistance in Plants*, in *Curr. Opin. Plant Biol.*, vol. 1, pp. 316-323, 1998.

Les villes des Mayas

WOLFGANG WURSTER

Au Nord du Guatemala, en pleine forêt tropicale, les archéologues étudient des villes qui étaient très peuplées à l'époque des conquistadores. Sous une pyramide, on a même trouvé une tombe princière qui échappa aux pillers.

En 1525, Hernán Cortés (1485-1547) et son armée atteignirent le cœur de la civilisation maya, dans la forêt tropicale du Petén, au Nord du Guatemala actuel. Dans ses lettres à l'empereur Charles Quint, Cortés décrit Tayasal, l'ancienne capitale construite sur une île, au milieu d'un lac. Celle-ci ne céda qu'en 1697 aux assauts des Espagnols, qui la rasèrent alors. À l'emplacement de cette ville insulaire des Itzas (l'un des groupes mayas originaires de la côte du Mexique qui s'étaient installés dans cette région vers les années 1200) se dresse aujourd'hui Flores, la capitale de la province du Petén (voir la figure 2).

Toutefois une autre agglomération insulaire, encore très peuplée au XV^e siècle et située à une cinquantaine de kilomètres à l'Est, échappa aux Espagnols : la ville de Topoxté, bâtie sur une île du lac Yaxhá. C'est seulement en 1831 que le gouverneur Juan Galindo découvrit ce lieu, déserté depuis le XVI^e siècle et complètement reconquis par la jungle.

Cette petite ville fut active longtemps après la fin de la période «classique», qui s'est étendue du IV^e au IX^e siècle de notre ère, alors que de nombreux centres mayas étaient abandonnés. En 1904, l'architecte Badois Teobert Maler (1842-1917), qui servit comme officier dans le corps expéditionnaire de l'empereur du Mexique Maximilien (1832-1867), en prit de nombreuses photographies pour le compte du Musée Peabody d'archéologie et d'ethnologie de Cambridge. Ces images montrent que les pyramides étaient encore assez bien conservées (voir la figure 3) ; elles sont des documents irremplaçables, car l'état de ces monuments s'est considérablement dégradé depuis cette époque.

Des missions archéologiques américaines fouillèrent quelques monu-

ments, mais aucune fouille d'ensemble ne fut malheureusement réalisée. Grâce à une aide financière et technique considérable fournie par l'Allemagne, on a sauvé *in extremis* les monuments subsistants d'une ville maya de la période tardive. Le sauvetage et les fouilles systématiques de cette ville ne représentent cependant que la première étape d'un très ambitieux projet de développement du Petén central, mené par l'Allemagne et le Guatemala : on veut sensibiliser les populations locales à la valeur de ces monuments et leur permettre d'en faire un outil de développement régional qui préserverait le milieu. Du point de vue archéologique, l'objectif est d'explorer comment les Mayas, à cette période tardive de leur développement, avant qu'ils n'aient été perturbés par les Européens, s'y prenaient pour nourrir une population qu'on évalue à environ deux millions de personnes dans un environnement très difficile à exploiter : au milieu de la forêt tropicale, marécageuse, un kilomètre carré assurait la subsistance de quelque 200 personnes (cette valeur est proche de celles des pays industrialisés modernes).

Topoxté, une forteresse flottante

On ignore généralement que certaines régions sont restées peuplées après la fin de la période classique. Dans ces régions, une transition vers la haute culture maya avait eu lieu plusieurs siècles avant la transition généralement admise : étaient déjà présents les mystérieux systèmes d'écriture et de calendrier, le système de construction des voûtes jusque-là inconnu en Amérique centrale, et les temples impressionnants érigés sur d'importantes pyramides, qui marquaient le centre vital d'agglomérations urbaines

parfois gigantesques. Beaucoup de ces centres urbains et, notamment, la métropole Tikal semblent s'être considérablement dépeuplés vers les années 900 de notre ère ; d'autres ne furent plus habités que par des agriculteurs. Toutefois la forêt du Petén resta exploitée, et les populations bâtirent des villes fortifiées sur les îles des nombreux lacs présents dans cette région karstique. La plupart de ces villes n'existent plus qu'à l'état de ruines, et seule Topoxté, avec ses principaux monuments encore dressés, donne une idée de l'urbanisme de la période tardive.

Le sauvetage de cette forteresse lacustre fut très difficile, en particulier à cause des pluies : l'humidité et la végétation avaient dégradé les murs de pierre, à joints de chaux, et les tunnels creusés par les pillers de tombes avaient fragilisé les constructions.

Même les fouilles archéologiques antérieures avaient souvent endommagé les monuments : comme dans de nombreux sites d'Amérique centrale, la recherche des tombes enterrées avait été insuffisamment délicate, et les chantiers n'avaient même pas été refermés. En 1990, la pyramide principale de Topoxté était largement effondrée, et les murs du temple érigé à son sommet menaçaient de s'effondrer.

L'Institut guatémaltèque d'anthropologie et d'histoire consolida hâtivement les édifices menacés d'effondrement : il posa des toits en feuilles de palmier pour protéger les ruines des pluies torrentielles et

1. TEL UN PHARE BLANC, le temple élevé sur la pyramide principale de Yaxhá émerge de la forêt tropicale. Cet ensemble, qui date de la fin de la période classique de la culture maya, risquait de s'effondrer. Il a été restauré par des équipes allemandes et guatémaltèques, qui explorent simultanément de nombreux campements mayas, dans la jungle du Petén.



ceintura les murs par des échafaudages en bois maintenus par des lianes. C'est alors que des collaborations avec la Commission pour l'archéologie générale et comparée (KAVA) de l'Institut allemand d'archéologie conduisirent à l'idée d'une fouille systématique des ruines mayas du Petén central et d'une restauration des bâtiments en vue d'une conservation durable.

Topoxté semblait un bon point de départ pour ce programme, car on y trouve les derniers grands monuments de l'époque postclassique dans l'intérieur des terres, et les dimensions réduites de cette île (400 mètres par 500) permettent d'avoir une vue d'ensemble du champ de fouilles.

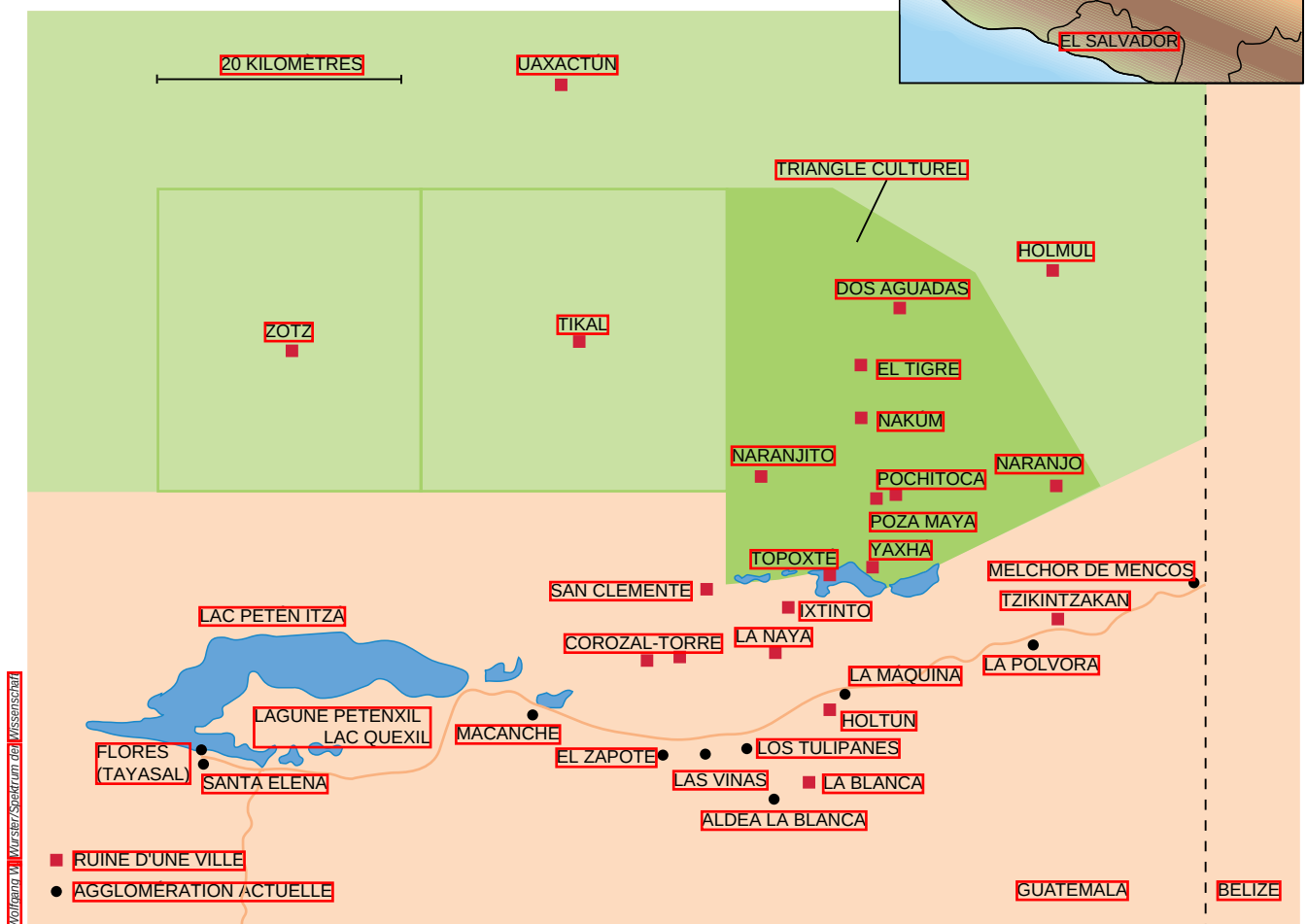
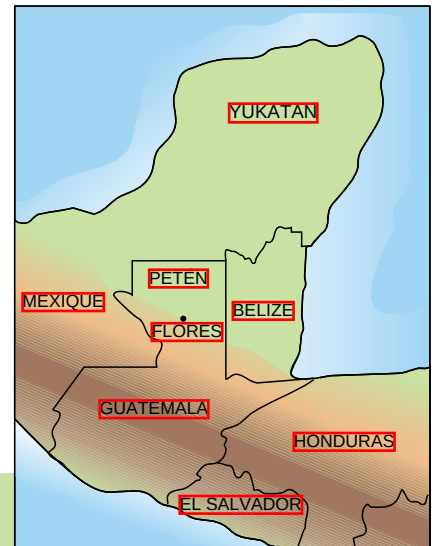
Nous nous sommes fixé trois objectifs principaux : dresser un plan d'ensemble du complexe urbain, identifiant notamment tous les bâtiments qui avaient échappé aux précédentes campagnes de fouilles parce qu'ils étaient cachés par la végétation ; identifier

les niveaux d'occupation successifs ; préserver les vestiges des monuments et éviter la poursuite de leur dégradation. Aujourd'hui les deux premiers objectifs de ce programme sont quasi atteints, et la préservation de Topoxté semble en bonne voie.

Pour effectuer les relevés topographiques et recenser les bâtiments, les équipes durent commencer par éclaircir la végétation au prix d'un travail pénible. Ce travail a été récompensé : nous connaissons aujourd'hui tous les bâtiments de cette ville qui resta très peuplée jusqu'au XV^e siècle (voir la figure 6). Le sommet du site était occupé par des temples pyramidaux qui entouraient une place allongée. Sur cette place, les Mayas avaient dressé des autels et des stèles en pierre sur lesquelles ils consignaient des événements importants. À proximité du centre de culte se trouvaient les quartiers occupés par l'élite, ainsi que des salles de réunion couvertes (on a retrouvé des piliers maçonnés). À partir de ce centre,

la ville descendait, par terrasses successives jusqu'aux rives abruptes de l'île. Avec ses décorations de stuc et ses crépis de chaux, Topoxté devait être une forteresse blanche dressée au-dessus de la forêt qui se reflétait dans les eaux du lac.

Des fouilles profondes ont donné quelques indications sur l'histoire ancienne de la ville. Les études ont



2. UNE ZONE TRIANGULAIRE, dans la région du Petén, est aujourd'hui classée, à côté de la réserve archéologique de Tikal. Ce « triangle culturel » comprend les anciennes villes mayas de Yaxhá, de Nakúm et de Naranjo. La région du Petén, aujourd'hui enfouie sous la végétation tro-

pical, était le centre de la culture maya. Le classement de zones de forêts (encadrées sur la carte) a pour objectif de stopper la colonisation anarchique des forêts à peine explorées (en vert) qui se trouvent au Nord de la route entre Melchor de Mencos et Flores.

été facilitées par l'heureuse habitude qu'avaient les Mayas d'ériger de nouveaux monuments et bâtiments de culte au-dessus des précédents, sans détruire ces derniers. C'est ainsi que s'érigèrent des pyramides de plus en plus hautes, structurées comme des poupées russes. De même, les places furent progressivement surélevées par l'adjonction de nouvelles couches.

Ces recherches ont montré que la ville fut un centre de culte pendant les 2 000 ans qu'a duré son occupation. On a notamment daté du III^e siècle avant notre ère les marches des temples les plus anciens, grâce aux céramiques qui leur étaient associées. Mieux encore, on a découvert un complexe de cryptes sacrées, creusées dans le calcaire tendre du sous-sol et datant de la période ancienne (voir la figure 7). Ce complexe semble être à l'origine des monuments pyramidaux qui furent ultérieurement construits au-dessus de lui. Les nombreuses offrandes retrouvées dans ces cryptes – essentiellement des récipients en céramique – renseignent sur le début du culte des morts.

Aujourd'hui les premières mesures de conservation sont prises ; les équipes ont plus de temps pour affiner le travail. Les ruines les plus atteintes ont été consolidées, les murs d'enceinte ont été renforcés, on a comblé les trous creusés par les pillards de tombes et consolidé avec du mortier à la chaux les couronnements des murs lessivés par la pluie. Toutefois l'équipe de conservation s'est gardée de reconstituer des bâtiments perdus, cherchant d'abord à maintenir les ruines dans l'état actuel.

Alors que l'on finissait de fouiller l'île de Topoxté, nous avons fait une découverte inattendue : sous une pyramide, nous avons trouvé une chambre mortuaire complètement intacte. L'accès à cette pièce, par des passages souterrains difficiles à trouver, avait évité le pillage de la tombe, dont le mobilier funéraire était intact. Le cercueil, rectangulaire, avait été creusé dans le calcaire. Il était recouvert d'un couvercle constitué de poutres de bois ; son fond et ses parois étaient enduits d'une couche de stuc. La chambre contenait une banquette maçonnée et des niches.

La tombe contenait le squelette d'un homme, sous une couche de cinabre. Les riches enduits indiquent que la tombe fut réalisée à la fin de l'époque classique de la culture maya, vers le milieu du VIII^e siècle de notre ère. Les

dents du mort étaient incrustées de jade. Le fond de la tombe, autour du squelette, était tapissé d'une mosaïque de jade, de coquilles et de perles. L'ensemble représentait des scènes animales mythologiques.

De très beaux récipients, des coupes colorées et des assiettes étaient déposés dans la chambre funéraire. Le prince mort était enseveli avec des atours ornés de coquilles de crustacés et d'escargots, et de jade. Au total, quelque 260 pièces de jade constituaient sa couronne, son pectoral et ses chaînes. La



LEOUE MALER VOIGER WORSZAKA

3. LES MONUMENTS DE TOPOXTE étaient encore relativement bien conservés en 1904 : cette photographie prise par l'architecte allemand Teobert Maler représente la face Sud-Ouest de la grande pyramide. Le mur externe de la pyramide, ainsi que les murs du temple, étaient encore debout à l'époque. Une grande partie du seul temple maya postclassique encore conservé dans la région du Petén s'est malheureusement effondrée en 1990 (schéma).

découverte d'un miroir rituel rond était inattendue, ainsi que celle un plateau de schiste, avec une inscription circulaire de hiéroglyphes, qui indiquait probablement le nom du mort. De tels miroirs rituels, très coûteux, étaient l'apanage des prêtres ; le miroir avait d'ailleurs été placé sur la poitrine, comme ornement.

Sous le mobilier funéraire, on a également trouvé un os humain taillé ; il porte le signe de la ville maya de Tikal, ce qui prouve que l'élite de Topoxté était liée à celle de Tikal.

La chambre funéraire de l'île de Topoxté n'est pas seulement remarquable par la beauté des céramiques peintes ou par le travail des objets de jade ; elle est bien plus intéressante par les informations qu'elle donne sur la fin de la période classique dans la culture maya du Petén central.

Protection et développement

Nous l'avons vu, le projet Topoxté place la restauration du site archéologique au centre d'un vaste programme de développement de la province du Petén. Cette immense région à peine explorée fait face à des problèmes quasi insolubles. Tout d'abord, la culture sur brûlis détruit chaque année quelque 60 000 hectares de forêt tropicale. Toutefois cette pratique n'est que la conséquence d'un accroissement démographique excessif et d'une occupation anarchique des sols. La dégradation de l'environnement, l'extension de la culture du pavot et la guerre civile aggravent les difficultés.

Le développement de la région ne peut être durable que si l'on exploite rationnellement la forêt tropicale et si l'on conserve les ruines les plus importantes de la culture maya, après les avoir restaurées. L'Allemagne a alloué plusieurs millions de francs à l'aide au développement, mandant l'Institut de crédit pour la reconstruction et le KAVA pour la gestion de ces fonds. Le projet établi en collaboration avec le Guatemala, nommé *Triangulo Cultural* (le Triangle culturel), couvre une zone de jungle

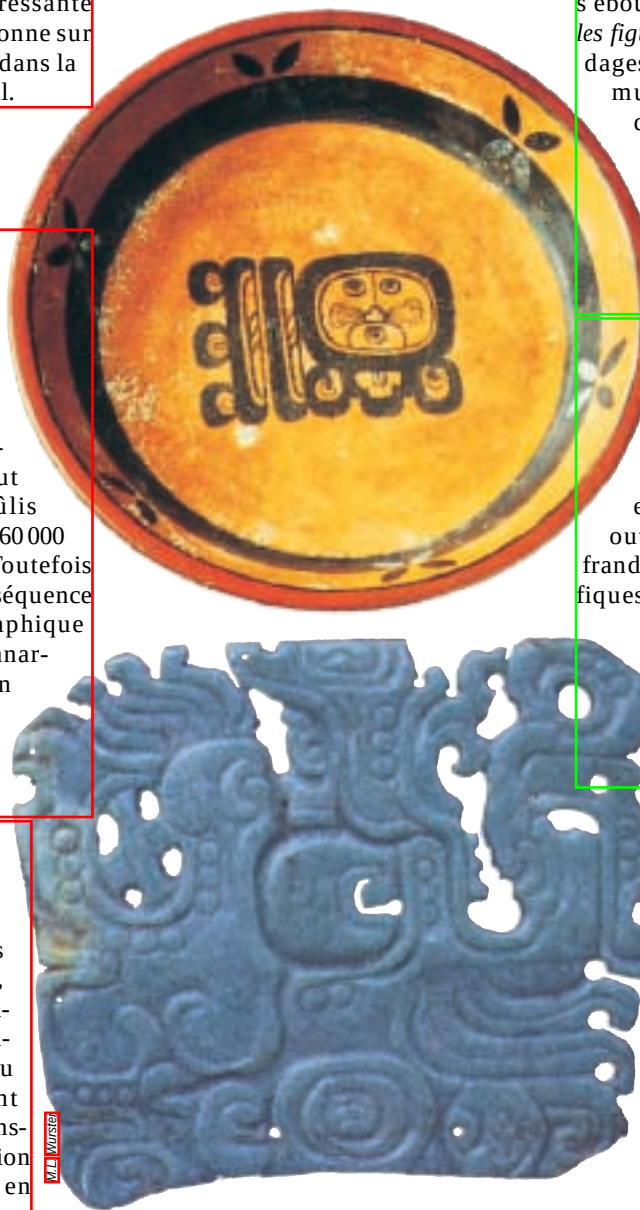
d'environ 1 200 kilomètres carrés. Y figurent les ruines de trois villes importantes dont l'âge d'or se situe à la fin de la période classique (Yaxhá, Nakúm et Naranjo), ainsi que les vestiges de nombreux autres petits peuplements mayas qui, pour la plupart, n'ont pas encore été fouillés. Le gouvernement guatémaltèque a classé la région zone archéologique et parc naturel (voir la figure 2). Elle jouxte une zone déjà classée, de 24 kilomètres de côté, où l'on avait découvert les ruines de la ville de Tikal. L'ensemble des zones protégées doit bloquer l'avancée des brûlis sauvages, qui remontent du Sud, et protéger la forêt tropicale encore intacte, au Nord.

Les travaux sur le terrain ont commencé en 1994. Il fallut d'abord expédier beaucoup de matériel (véhicules tout terrain, échafaudages, etc.) dans la zone d'études, quasi dépourvue d'infrastructure. Puis les équipes durent dresser un camp archéologique comportant des parties d'hébergement et des ateliers, avant d'assembler les échafaudages en acier qui permettaient de travailler sans danger. Les études ont commencé rapidement avec les relevés topographiques de Yaxhá, une ville qui s'élevait au-dessus du lac du même nom, sur une bonne partie de sa rive Nord. La pyramide principale de Yaxhá, qui s'élève au point le plus élevé de la ville, menaçait de s'effondrer : elle dut être consolidée (voir les figures 1 et 5). À partir d'échafaudages dressés autour du bâtiment, les murs furent d'abord stabilisés par des entretoises métalliques ; les (fausses) voûtes – qui constituent une spécificité de la culture maya – furent renforcées au mortier de chaux, et les murs nettoyés et rejointoyés.

Des sondages effectués dans le plancher du temple le plus récent (il date de la fin de l'époque classique) révélèrent qu'il était construit au-dessus d'un autre bâtiment extrêmement bien conservé. En outre, on découvrit un dépôt d'offrandes intactes, constituées de magnifiques poteries et de figurines portant une mosaïque de jade et de coquillages. Le dernier temple réservait des surprises : dans les murs crépis, des dessins gravés représentent des scènes de la vie maya.

D'autre part, l'ancienne petite résidence royale de Nakúm impressionne par ses palais érigés au sommet d'imposantes plateformes artificielles superposées. Là, le chantier est en cours ; on recense les bâtiments, on dresse progressivement la carte du site et l'on prévoit des sondages afin de dater les différentes constructions.

Les travaux de conservation des monuments de Nakúm sont très onéreux : on a dû, par exemple, ceinturer la grande pyramide sur l'ensemble de



4. DANS UNE TOMBE, sous une pyramide de Topoxté, on a retrouvé le corps d'un prince et de nombreux ornements parmi lesquels cette céramique de 33 centimètres de diamètre et cet ornement de jade travaillé, de neuf centimètres de large.



Volfgang W. Vortier/Kommission für Zentren und Vergleichende Archäologie (KAVA)

5. CETTE ÉCHELLE très raide (à gauche) mène au temple érigé au sommet de la pyramide principale de Yaxhá : les escaliers existants étaient impraticables, et des travaux considérables furent nécessaires pour stabiliser l'ensemble de la pyramide et du temple, et éviter son effondrement. À Topoxté, on a dû construire un échafaudage autour de la pyramide principale afin d'éviter l'éboulement des murs pendant les travaux (ci-dessus).



6. RECONSTITUTION DU CENTRE de Topoxté à la fin de l'époque post-classique. La place centrale était bordée par des temples pyramidaux et par les demeures des classes dominantes. De nombreuses stèles étaient réparties dans la ville. Construite sur une île, Topoxté exista pendant près de 2 000 ans, jusqu'à l'époque des conquistas.

dores, qui ne la découvrirent pas. Au cours des siècles, l'île fut progressivement surélevée, tandis que les habitants construisaient des terrasses. Dès le III^e siècle avant notre ère, des bâtiments sacrés avaient été construits, et des récipients en céramique avaient été déposés comme offrandes sur leurs marches.



7. LES CRYPTES qui se trouvent sous le centre de Topoxté ont été creusées il y a plus de 2 000 ans dans le calcaire. La céramique représentée à droite, qui date du 1^{er} siècle avant notre ère, a été retrouvée dans une crypte ; offerte en offrande, elle est la preuve que les cryptes étaient des lieux de culte.



Volperra L. Wurster/Commission für Allgemeine und Vergleichende Archäologie (KAVA)

sa hauteur avec des échafaudages en acier et l'étayer avant de reboucher les fissures du corps de la pyramide et de réparer les murs du temple.

Les leçons du passé

On connaît encore mal les centres urbains mayas, et moins bien encore leurs environs ruraux. Pourtant les archéologues ont établi que des champs suspendus, cultivés de manière intensive dans des zones humides, des champs en terrasse dans les zones vallonnées, ainsi que des jardins alimentaient la population urbaine. On imagine difficilement un tel système quand on voit aujourd'hui les ruines dans la forêt tropicale. Pourquoi les Mayas s'établirent-ils ici ?

Pour étudier cette question, nous avons percé dans la forêt des trouées rectilignes de plusieurs kilomètres de long et nous avons ensuite étudié systématiquement une bande de 500 mètres de large autour de ces axes. Nous avons ainsi découvert une foule de petits campements, dont 13 ont été fouillés. Dans six des sites explorés, des bâtiments, bien qu'endommagés, avaient résisté à la végétation et aux intempéries. Les chercheurs de trésors, en revanche, avaient fait de graves dégâts.

Une fois comblés leurs trous et galeries, on a réparé les constructions et bloqué l'accès aux fouilles. Une surveillance continue des sites n'est

possible que pour les plus grands des sites archéologiques, mais nous invitons les habitants de la région à participer à la protection de leur patrimoine. Nous les recrutons en priorité, lors des travaux de sauvetage, et nous leur montrons qu'un tourisme policé permettrait à la fois d'assurer le développement local et de préserver leur patrimoine.

Les méthodes d'approvisionnement alimentaire qui furent utilisées à la fin de la période classique pourraient-elles être reprises aujourd'hui ? En leur temps, les Mayas avaient drainé des zones gorgées d'eau et irrigué des terres sèches. L'analyse des sols

et des pollens devraient nous renseigner sur les plantes qu'ils cultivaient et sur leurs méthodes de culture.

Le Guatemala et les pays voisins ont été profondément perturbés par les colons européens installés après que Christophe Colomb a longé pour la première fois la côte d'Amérique centrale, entre le Honduras et le Panama, lors de son quatrième voyage, de 1502 à 1504. Les pays industrialisés peuvent, certes, aider les descendants des Mayas à construire une infrastructure technique, mais l'étude et la préservation du Petén seraient une sorte de compensation également importante : ne s'agit-il pas de réhabiliter une culture ?

Wolfgang WURSTER dirige la Commission pour l'Archéologie générale et comparée (KAVA) de l'Institut archéologique allemand, à Bonn.

Wolfgang W. WURSTER, *Erforschung und Erhaltung von Maya-Städten im zentralen Petén Guatemalas. Aktueller Stand des archäologischen Regionalprojektes «Triangulo Cultural Yaxhá-Nakum-Naranjo»*, in AVA-Beiträge, vol. 15, pp. 203-227, 1995.

Wolfgang W. WURSTER, *Maya-Architektur auf der Insel Topoxté im See von Yaxhá, Petén, Guatemala*, in AVA-Beiträge, vol. 12, pp. 261-302, 1992.

Wolfgang W. WURSTER, *Maya-Ruinen im Urwald Guatemalas*, in *Archäologie in Deutschland*, vol. 10, n° 3, pp. 10-15, 1993.

Bernard Hermes CIFUENTES, *La secuen-*

cia cerámica de Topoxté, un informe preliminar, in AVA-Beiträge, vol. 13, pp. 221-252, 1993.

Raul Noriega GIRÓN, *La pirámide C en la isla Topoxté, Petén, Guatemala, trabajos de conservación*, in AVA-Beiträge, vol. 15, pp. 203-227, 1995.

Berthold Riese, *Die Maya. Geschichte, Kultur, Religion*, Beck, 1995.

Die Ruinenstädte der Maya, Time Life, 1993.

Linda SCHELE et David FREIDEL, *Die unbekannte Welt der Maya. Das Geheimnis ihrer Kultur entschlüsselt*, Bechtermünz, 1994.

Eva et Arne EGGBRECHT, *Die Welt der Maya. Archäologische Schätze aus drei Jahrtausenden*, Zabern, 1992.

L'organisme distingue

L'orientation des organes internes des vertébrés est déterminée

**JUAN CARLOS
IZPISÚA BELMONTE**

Le côté gauche du corps humain est l'image dans un miroir du côté droit. Chaque structure anatomique a sa contrepartie. En revanche, cette latéralisation n'existe pas pour les organes internes : nous n'avons qu'un cœur, un foie, un estomac, un pancréas, une rate, et l'intestin s'enroule sans symétrie. De plus, certains organes doubles sont asymétriques eux aussi. Par exemple, le poumon droit a trois lobes, tandis que le gauche n'en a que deux, et certaines structures cérébrales sont localisées dans un seul hémisphère.

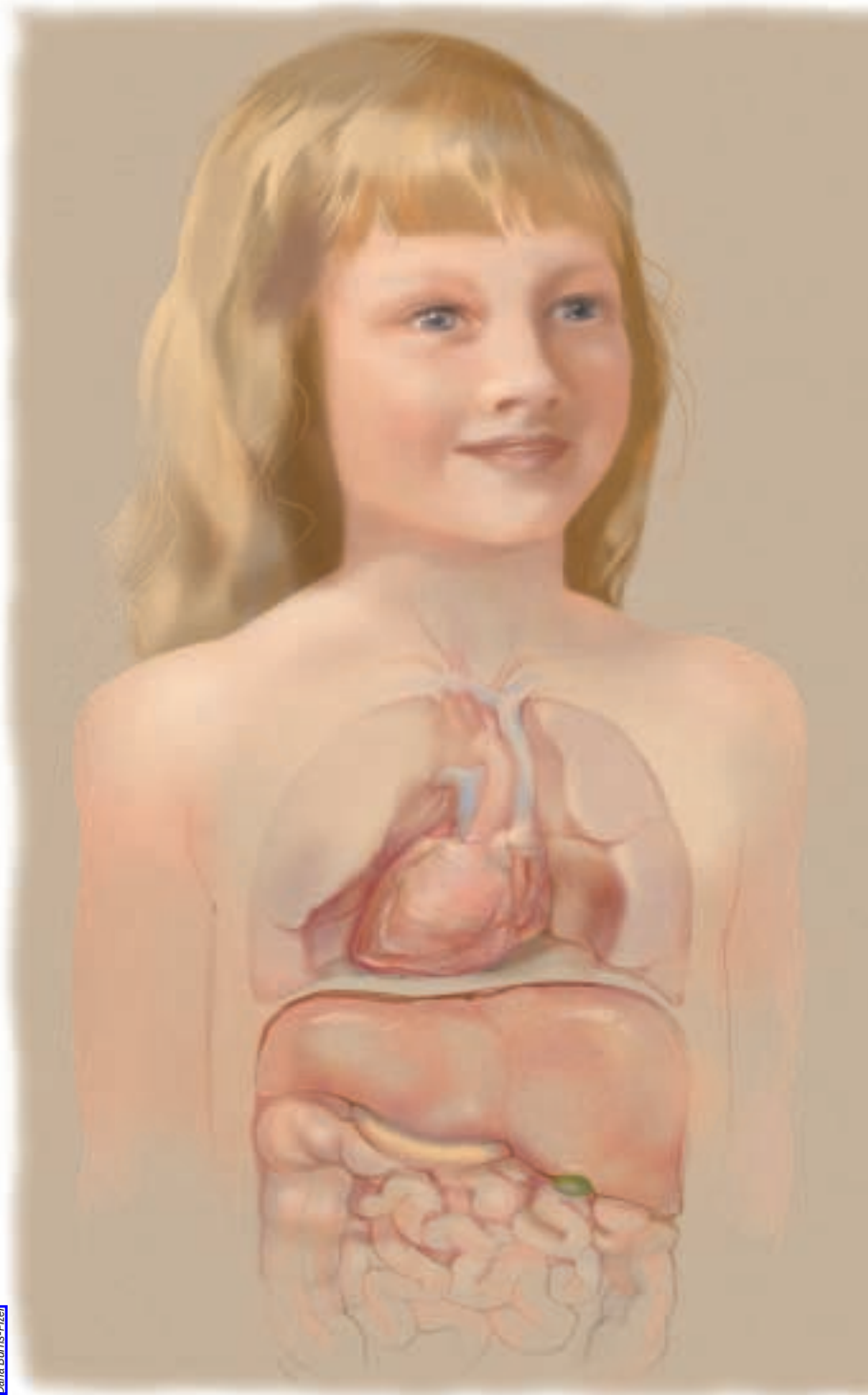
Pourquoi les organes internes ne sont-ils pas symétriques ? Les embryologistes ont identifié plusieurs molécules qui guident la mise en place des organes, leur constitution et leur orientation. En comprenant le mode d'action de ces facteurs, nous apprendrons à soigner et à prévenir les maladies liées à leur absence ou à leur synthèse inappropriée.

Une place pour chaque chose

L'asymétrie d'un organe a des avantages adaptatifs. Par exemple, le système digestif des vertébrés supérieurs occupe mieux la cavité abdominale lorsqu'il suit un schéma asymétrique. Selon Joseph Yost, de l'Université de l'Utah, l'asymétrie cardiaque permet un pompage et une distribution sanguine plus efficaces, car elle est à la base de la séparation des deux systèmes de pompage distincts : l'un envoie le sang vers les poumons, où l'oxygène se dissout et où le dioxyde de carbone est éliminé, tandis que le second distribue le sang oxygéné dans tout l'organisme.

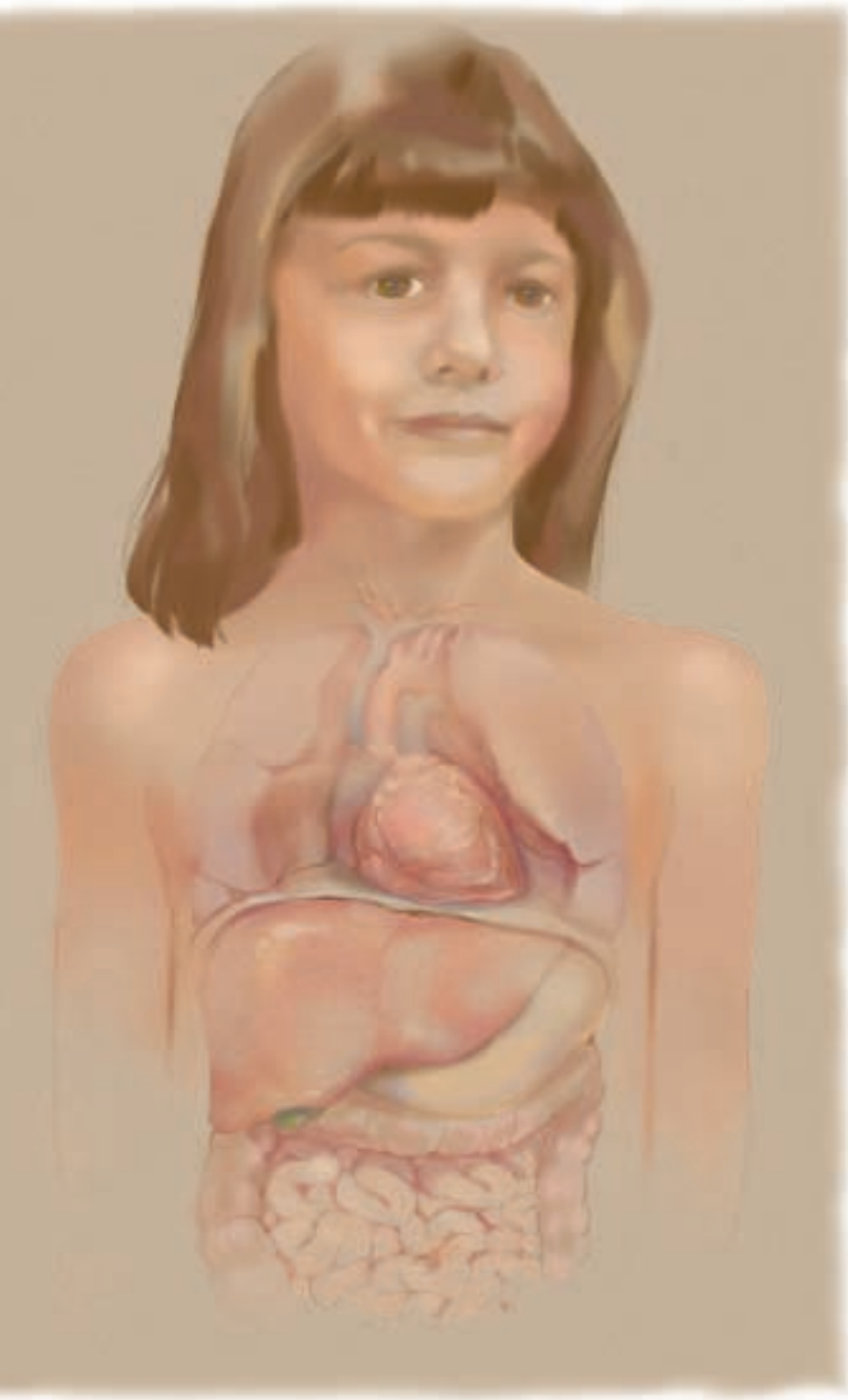
Toutefois, les organes restent efficaces quand ils sont inversés. Une personne sur

1. LES ORGANES D'UN ENFANT né avec un situs inversus (à gauche) ont une orientation inverse de celle des organes normaux (à droite). Si cette anomalie est bénigne, des pathologies apparaissent lorsque l'individu naît avec deux côtés gauches ou deux côtés droits : les organes normalement asymétriques, tel le cœur, sont alors symétriques et fonctionnent mal.



la gauche de la droite

par des protéines qui ne sont produites que par un seul côté de l'embryon.



15 000 présente un situs inversus, c'est-à-dire que la position de tous les organes internes est inversée par rapport à leur situation normale, dite situs solitus : le cœur et l'estomac sont à droite, le foie à gauche, etc. Ces personnes sont généralement en bonne santé, ce qui indique que l'orientation de l'ensemble des organes n'importe pas ; seul leur propre orientation et le respect d'une logique interne comptent.

En revanche, les personnes qui naissent avec des organes qui ne sont pas l'image dans un miroir du schéma habituel, une situation nommée situs ambiguus, décèdent souvent prématurément de maladies cardiaques ou pulmonaires. De même, l'isométrie (avec deux côtés gauches ou deux côtés droits) est souvent associée à des troubles variés. Les personnes ont, par exemple, soit deux rates, soit aucune, et leur cœur est exactement symétrique. La liste des pathologies des personnes atteintes d'isométrie est longue. Toutefois, sans que l'on puisse l'expliquer, ceux qui ont une isométrie gauche se portent souvent beaucoup mieux que ceux dont l'isométrie est droite.

Les embryologistes ont élucidé beaucoup de mécanismes qui déterminent l'asymétrie gauche-droite en étudiant les stades précoces du développement embryonnaire du cœur (ce dernier est l'organe le plus sensible aux anomalies de l'organisation interne de l'organisme).

Tous les organismes asymétriques commencent sous une forme à symétrie bilatérale parfaite. Puis, assez rapidement, la symétrie disparaît. Le cœur se forme à partir de deux groupes symétriques de cellules précardiaques, qui fusionnent, puis forment le tube cardiaque, symétrique (voir la figure 3), qui se courbera vers la droite : c'est le premier signe visible d'asymétrie ; cet événement détermine la structure du double système de pompage.

En 1995, Clifford Tabin, de l'École de médecine de Harvard, et Claudio Stern, de l'Université de Columbia, ont observé que, chez les embryons de poulets, la courbure du tube cardiaque n'apparaît que lorsqu'une protéine nommée Sonic Hedgehog est synthétisée du côté gauche. Cette protéine doit

son nom («hedgehog» signifie «hérisson», en anglais) à l'aspect des larves de la drosophile qui en sont dépourvues. Elle est produite par un groupe de cellules embryonnaires, nommé nœud de Hensen. Il s'agit de la zone d'un tout jeune embryon de poulet qui s'enfonce sous d'autres cellules et forme ainsi la première structure en trois dimensions (un nœud analogue existe chez les mammifères). Lorsque la protéine Sonic Hedgehog est synthétisée du côté droit du nœud, l'ébauche du cœur s'enroule vers la gauche.

D'autres protéines interviennent également dans l'asymétrie gauche-droite du cœur des vertébrés : les protéines Nodal et Lefty, ne sont présentes que du côté gauche du tout jeune embryon, tandis que les protéines Activine β B, Snail et FGF8 ne sont produites que du côté droit. Quand l'une de ces protéines est produite à un endroit ou à un moment inapproprié, des anomalies apparaissent.

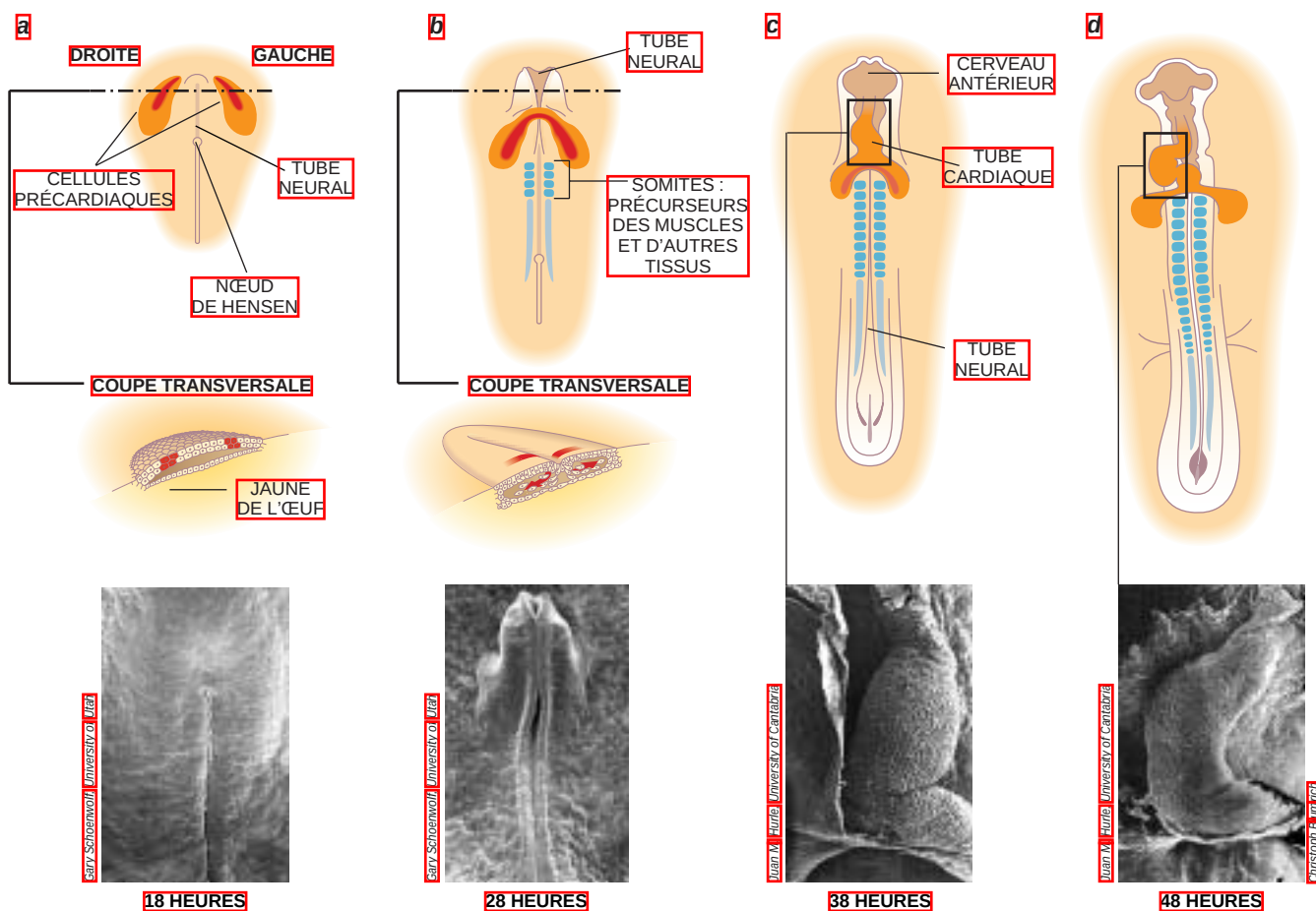


2. UN TÊTARD NORMAL (à gauche) a un cœur orienté vers la droite et un intestin enroulé dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Cette asymétrie est due à la protéine Pitx2, qui n'est synthétisée que du côté gauche. Chez un animal où le gène Pitx2 ne s'exprime que du côté droit (à droite), le cœur s'oriente vers la gauche, et l'intestin s'enroule dans le sens des aiguilles d'une montre.

Par exemple, dans les embryons de poulet, les protéines Sonic Hedgehog et Nodal du côté gauche du nœud de Hensen, et l'Activine β B du côté droit, provoquent la formation d'un cœur

normalement asymétrique. En revanche, lorsque les deux côtés du nœud sont exposés aux protéines Sonic Hedgehog et Nodal, l'Activine β B devient alors inopérante, et le développement est perturbé : les cœurs de la moitié des embryons se forment normalement, tandis que les tubes cardiaques de l'autre moitié se courbent dans la direction opposée. Un ou plusieurs facteurs supplémentaires interviennent peut-être en induisant automatiquement une courbure : les protéines Sonic Hedgehog, Nodal et Activine β B influencent alors sa direction. D'autre part, la présence de la protéine Hedgehog des deux côtés du nœud entraîne la synthèse de la protéine Nodal également des deux côtés. Faute de signaux clairs, l'ébauche de cœur s'incurve au hasard.

Lorsque les deux protéines Sonic Hedgehog et Nodal sont absentes des deux côtés, le résultat est identique. Ainsi, l'absence de signaux sur le nœud ou la présence de signaux des deux côtés provoque une courbure aléatoire



3. LE CŒUR D'UN EMBRYON DE POULET, comme celui de n'importe quel vertébré, se développe à partir d'un tube cardiaque qui s'incurve vers la droite (ici, l'embryon est vu du dessus). Le tube est formé par deux populations symétriques de cellules (a, en rouge et en orange) de la surface de l'embryon. Ces cellules migrent vers

un pli, au-dessus d'une région nommée nœud de Hensen. Après leur fusion (b), ces deux populations forment un tube initialement symétrique qui se courbe rapidement vers la droite (c et d). Les images au microscope électronique montrent les stades de développement correspondant aux schémas.

du cœur. Certains biologistes pensent que les cas de situs inversus ou d'isomérisie sont dus à des mutations des gènes qui codent les protéines Sonic Hedgehog et Nodal.

Quelles sont les protéines qui déterminent l'asymétrie des autres organes? Six équipes de biologistes, dont la nôtre, ont récemment identifié un gène qui code une protéine nommée Pitx2. À l'instar des protéines Sonic Hedgehog et Nodal, Pitx2 apparaît du côté gauche du cœur en développement et influence le sens de la courbure. Cependant, elle se distingue par une synthèse asymétrique jusqu'à un stade avancé du développement embryonnaire et par une présence du côté gauche dans tous les organes asymétriques.

L'insertion de plusieurs exemplaires du gène de Pitx2 dans un embryon provoque une isomérisie ou une inversion des organes asymétriques, probablement en fonction de la quantité de protéine produite. La protéine Pitx2 est sans doute l'un des premiers facteurs qui établit l'orientation à gauche au cours du développement embryonnaire ; toutefois, son mode d'action est encore inconnu.

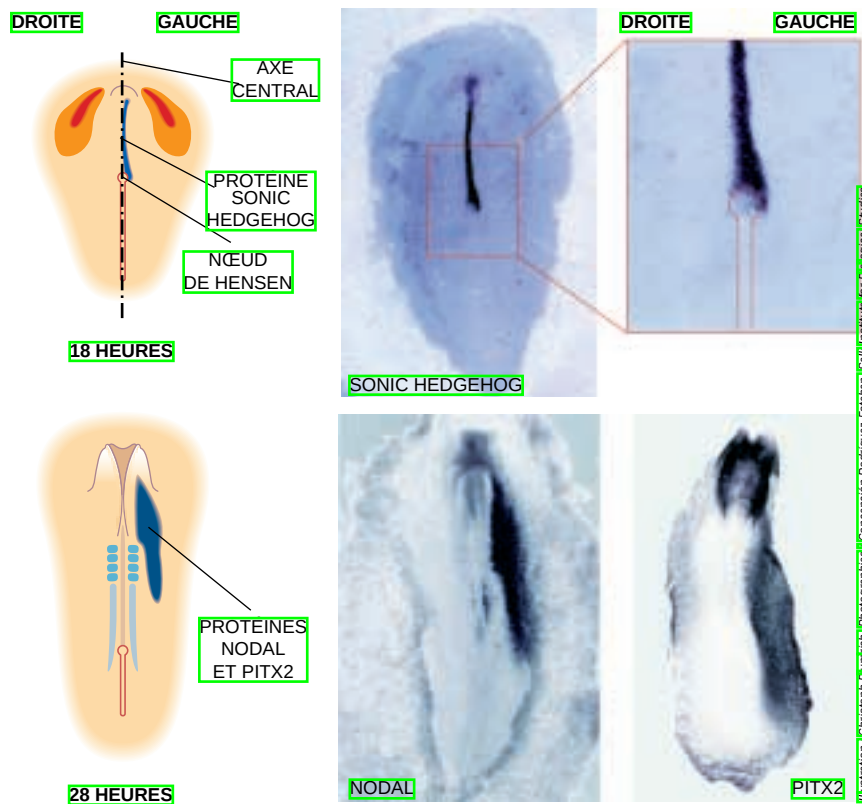
Quels mécanismes la production de Sonic Hedgehog, de l'Activine β B ou de Lefty déclenche-t-elle? Ces dernières années, des embryologistes ont découvert que la vitamine A détermine les types de cellules qui se forment dans un embryon, ainsi que la polarité de l'embryon : gauche / droite, tête / queue, arrière / avant.

Chez des rongeurs et chez des oiseaux, un excès d'acide rétinoïque (une forme de la vitamine A) supprime l'asymétrie normale du cœur : la synthèse des protéines telles que Hedgehog, Activine β B et Lefty semble perturbée.

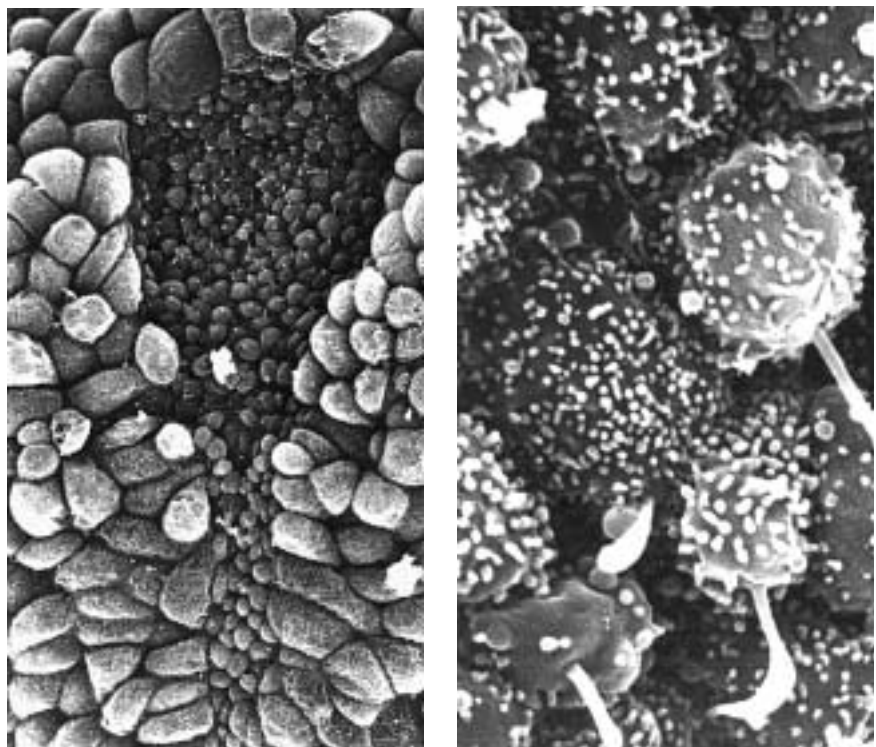
Le facteur flagellaire

Par ailleurs, des expériences ont indiqué que les cils jouent un rôle essentiel dans l'asymétrie des organes. Les cils sont des structures flagellaires présentes sur la membrane externe de cellules spécialisées, telles celles qui tapissent l'intestin ou celles qui rendent mobiles les spermatozoïdes. Les cellules des nœuds d'embryons de diverses espèces ont un cil mobile unique, au centre de la face cellulaire qui est tournée vers le côté ventral de l'embryon.

Les cils de plusieurs types de cellules, notamment ceux des spermatozoïdes, sont défectueux chez les



4. LES GÈNES EXPRIMÉS D'UN SEUL CÔTÉ de l'embryon établissent l'asymétrie des organes internes. Le gène codant la synthèse de la protéine Sonic Hedgehog (*en haut, en bleu foncé*) est l'un des premiers activés au-dessus du nœud de Hensen. Dix heures plus tard, l'expression du gène cesse, tandis que les gènes qui codent les protéines Nodal et Pitx2 sont exprimés (*en bas, en bleu foncé*).



5. LES CELLULES D'UNE ZONE EMBRYONNAIRE nommée nœud, chez la souris (à gauche), sont équivalentes à celles du nœud de Hensen des poulets. Elles forment une structure particulière à la surface de l'embryon (ici, elles sont observées au microscope électronique à balayage). Un plus fort grossissement (à droite) montre que chaque cellule du nœud a un cil qui tourne uniquement dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Ce mouvement déplace des protéines qui déterminent l'asymétrie de l'embryon.

personnes atteintes du syndrome de Kartagener. Ces personnes sont plus souvent sujettes aux infections respiratoires, car les cils qui repoussent normalement les micro-organismes hors des voies respiratoires sont absents et, de plus, ils ont souvent un situs

inversus. Les organes des souris porteuses d'une mutation d'une protéine qui compose les cils s'orientent aléatoirement.

En 1998, Nobutaka Hirokawa et ses collègues de l'Université de Tokyo ont observé que les cils des cellules de

nœud de souris tournent, dans le liquide qui entoure l'embryon, en sens inverse des aiguilles d'une montre. Ce mouvement crée un courant qui rassemble vers la gauche du nœud les facteurs importants tels que l'acide rétinoïque et les protéines Nodal et Lefty. Cette accumulation de liquide et de protéines sur le côté gauche correspond peut-être au signal qui déclenche la rupture de la symétrie embryonnaire. La façon dont nos organes internes se développent est donc commandée par une caractéristique architecturale des cellules du nœud : le sens de rotation des cils.

Ce processus dépend probablement de l'asymétrie des molécules qui dirigent le mouvement ciliaire. Cependant, pour la moitié des individus totalement dépourvus de cils au niveau du nœud, les organes s'organisent normalement : les cils ne sont pas nécessaires au développement des organes, mais interviennent plutôt dans leur orientation et dans leur positionnement.

La compréhension de l'orientation gauche-droite au cours de l'embryogenèse a récemment progressé grâce à la découverte des gènes qui agissent de manière asymétrique chez l'embryon précoce. La nature exacte de l'initiation de l'asymétrie dans l'embryon reste inconnue, mais l'identification récente de protéines impliquées dans les événements suivants facilitera la découverte des protéines impliquées dans d'autres aspects du développement. La mise au point de nouvelles méthodes de diagnostic prénatal pour des pathologies liées à ces protéines sera alors possible.

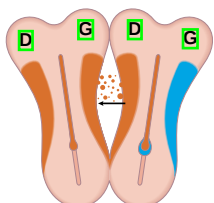
Les siamois

Chez certains siamois, les organes se développent à une place anormale, qui dépend de l'endroit par où ils sont reliés. Pour la moitié des siamois soudés par le côté (siamois bicéphales), telles Abigail et Brittany Hensel (voir la photographie), l'un des membres de la paire, souvent celui qui est à droite, a son cœur à droite et non à gauche. Les siamois bicéphales se développent à partir d'un ovule unique fécondé, qui ne se divise pas complètement : les deux embryons qui se forment sont alors souvent parallèles (voir la figure). Selon l'équipe de Clifford Tabin et ses collègues de Harvard, cette proximité permet aux facteurs sécrétés, qui s'expriment dans un nœud de l'un des jumeaux, d'avoir une influence sur l'autre. La protéine nom-



Steve Wavert / Impact Visuals

JUMEAU DROIT JUMEAU GAUCHE



EMBRYONS SIAMOIS

mée Activine β B produite du côté droit du jumeau de gauche (*en rouge*), réprime probablement la production de la protéine Sonic Hedge-

hog du côté gauche du jumeau de droite. Celui-ci a donc autant de chances d'avoir un cœur à droite qu'à gauche.



John M. HERSH, University of Cambridge

6. LA VITAMINE A REGLE le développement du cœur (*en rouge*) de jeunes embryons de poulet. En présence d'une concentration normale d'acide rétinoïque (une forme de la vitamine A), le cœur s'incurve correctement (*à gauche*). Un excès d'acide rétinoïque provoque une déviation inverse (*à droite*). Les embryologistes pensent que l'acide rétinoïque favorise la régulation des gènes, tel le gène Nodal, qui gouvernent l'asymétrie gauche-droite.

Juan Carlos Ispisua BELMONTE est professeur de biologie du développement à l'Université de Californie, à San Diego.

William B. WOOD, *Left-Right Asymmetry in Animal Development*, in *Annual Review of Cell and Development Biology*, vol. 13, pp. 53-82, 1997.

Michael LEVIN et Mark MERCOLA, *The Compulsion of Chirality : Toward an Understanding of Left-Right Asymmetry*, in *Genes and Development*, vol. 12, pp. 763-769, 15 mars 1998.

Ann F. RAMSDELL et H. Joseph YOST, *Molecular Mechanisms of Vertebrate Left-Right Development*, in *Trends in Genetics*, vol. 14, n° 11, pp. 459-465, novembre 1998.

Recherche intelligente sur l'Internet

LES MEMBRES DU PROJET CLEVER

La quantité d'informations en ligne sur le réseau Internet a tant augmenté que les outils actuels de recherche manquent d'efficacité. On améliore les recherches quand on analyse comment les pages du réseau mondial sont interconnectées.

Aujourd'hui, le réseau Internet donne accès à plusieurs centaines de millions de pages et s'enrichit d'un million de pages par jour. Plus d'un milliard de connexions entre les pages, les hyperliens, structurent cet impressionnant volume d'informations. Pour la première fois dans l'histoire, des millions de personnes ont accès, de leur domicile ou de leur bureau, aux productions intellectuelles d'une partie importante de la population de la planète.

Toutefois, en raison de son développement rapide et anarchique, Internet est un réseau d'informations sans organisation ni structure, de sorte que la recherche efficace d'information y est difficile. Le réseau est devenu un bric-à-brac gigantesque : les pages sont écrites par des personnes aux formations, aux intérêts ou aux motivations variés. Certaines pages ne contiennent que quelques caractères ; d'autres plusieurs centaines de milliers. Selon les cas, les informations sont justes, fausses, précises, floues ; la propagande avoisine les documents officiels et les inepties.

Les moteurs de recherche actuels cherchent des mots-clés présents dans les pages, mais ils identifient ainsi des dizaines de milliers de pages, dont la plupart sont inutiles. Comment localiser rapidement l'information voulue, et seulement elle, tout en étant sûr qu'elle soit authentique et fiable ?

Nous avons mis au point un nouveau type de moteur de recherche qui exploite la plus importante des ressources du réseau : ses innombrables hyperliens. Grâce à l'analyse de ces interconnexions, notre système localise

automatiquement deux types de pages : celles qui font autorité et celles qui servent de pivot. Les premières sont supposées être les meilleures sources d'information sur un sujet particulier ; les secondes sont des groupes de liens qui pointent vers les premières. Notre méthodologie permettra aux utilisateurs de localiser rapidement et efficacement la plupart des informations qu'ils désirent.

Les défis des moteurs de recherche

Les moteurs de recherche sont des programmes, accessibles aux utilisateurs du réseau, qui consultent une gigantesque mémoire où est enregistré pour chaque mot-clé présent dans les pages d'Internet, une liste des pages contenant ce mot. Un groupe de telles listes est nommé index. Ainsi, quand un utilisateur cherche des informations sur la revue *Pour la Science*, le moteur de recherche lui communique la liste de toutes les pages qui contiennent ce groupe de mots.

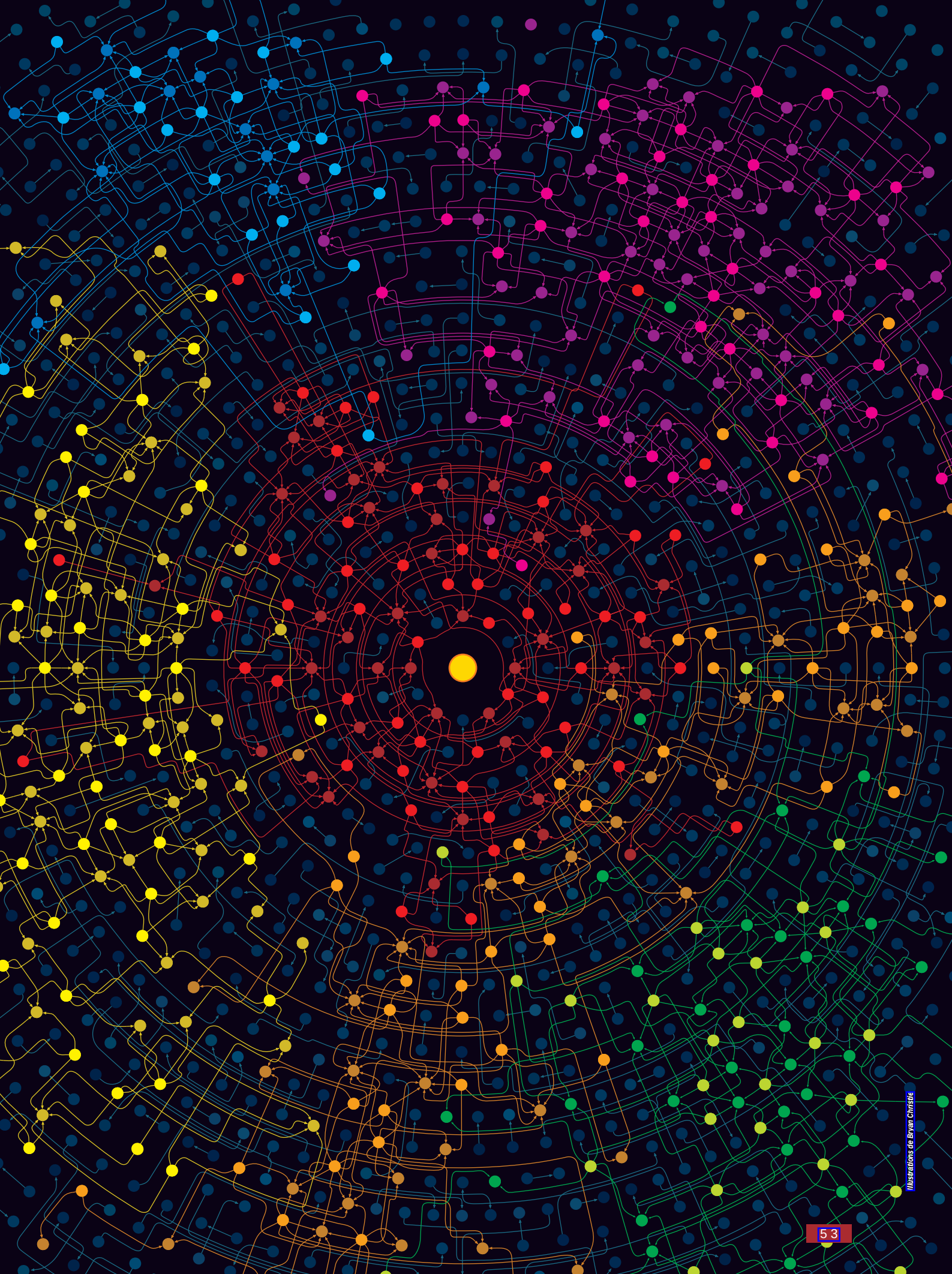
La création et la maintenance de ces index sont des tâches très lourdes (voir *La recherche d'informations*, par Clifford Lynch, *Pour la Science*, mai 1997) et c'est toujours un problème redoutable que de déterminer quelle information retourner en réponse à la question d'un utilisateur. Supposons que quelqu'un

cherche des informations sur la compagnie aérienne népalaise *Nepal Airways*. Sur la centaine de pages qui contiennent aujourd'hui cette expression, comment décider quelles sont les 20 meilleures ? Cette question est difficile, parce qu'on ne sait pas mesurer ce que «meilleure» veut dire : la réponse dépend du demandeur.

Des moteurs de recherche comme *AltaVista*, *HotBot*, *Lycos*, *Infoseek* et *Excite* utilisent des règles empiriques pour ordonner les réponses. Ces «recettes», nommées fonctions de classement, sont appliquées non seulement aux requêtes précises (*Nepal Airways*), mais aussi à des requêtes plus générales, comme «avion», un mot qui apparaît dans 150 000 pages, ou son équivalent en anglais, *plane*, qui apparaît dans plus d'un million de pages. Comment un moteur de recherche retiendra-t-il seulement 20 pages ?

On obtient un classement très simple en comptant le nombre de fois où le mot demandé apparaît dans les pages. On peut aussi placer en premier les pages où le mot requis apparaît le plus tôt. Toutefois, de telles approches ne donnent pas toujours de bons résultats. Par exemple, la recherche du mot *contribuable* avec de telles règles de classement trouverait que *Polyptote*, extrait des *Exercices de style* de Raymond Queneau, répond très bien à la requête, puisqu'il contient 22 occurrences de ce mot dans un texte

1. LES COMMUNAUTES DU CYBERESPACE (montrées ici par des couleurs) cohabitent sur le réseau. L'exploration de la structure du réseau a révélé des communautés sur des sujets aussi variés que les marées noires sur la côte Ouest du Japon, les pompiers d'Australie ou les ressources pour les Turcs vivant aux États-Unis. Le réseau comprend des centaines de milliers de petites communautés de ce type.



de 140 mots environ. Diverses améliorations pondèrent l'importance des mots selon qu'ils apparaissent dans les titres, au début des chapitres ou en caractères plus gros que le corps du texte.

De nombreux sites abusent de ces règles, afin que leurs pages soient bien classées. C'est pour cette raison que le titre de certaines pages est étrangement rédigé, tel «billets avion soldés, billets avion soldés, billets avion soldés». D'autres sites incluent plusieurs fois dans leurs pages des phrases judicieusement choisies, dans

des polices et des couleurs invisibles à l'œil. De telles pratiques, qui inondent les moteurs de recherche avec des informations non pertinentes (le *spamming*), compliquent la tâche des gestionnaires de ces moteurs (le mot anglais *spam* vient d'un épisode de la série télévisée *Monty Python's Flying Circus*, où le mot *Spam*, une marque de jambonneau, couvre les dialogues).

Même sans cette difficulté, le bien-fondé des méthodes de recherche textuelles est douteuse : des pages qui intéresseraient beaucoup un utilisateur

ne contiennent pas le mot qui a été transmis au moteur de recherche, tandis que d'autres pages qui contiennent le mot spécifié sont sans intérêt. Cette seconde difficulté provient de l'abondance de synonymes et de mots polysémiques (des mots qui ont plusieurs sens) : une demande d'information sur les «automobiles» laissera de côté une kyrielle de pages qui évoquent les «voitures». En raison des polysémies, une simple requête sur «jaguar» donnera des milliers de pages concernant, entre autres, l'automobile de ce nom, le félin et une équipe de football américain.

On améliore les recherches en utilisant les relations sémantiques entre les mots. Certains moteurs de recherche utilisent de telles relations, nommées «réseaux sémantiques», identifiées par les linguistes. À la réception de la requête «automobile», un moteur de recherche couplé à un réseau sémantique détermine d'abord qu'«automobile» est un mot équivalent à «voiture», puis il donne la liste des pages qui contiennent l'un des deux mots. Toutefois, cette méthode est à double tranchant : elle résout le problème des synonymes, mais aggrave celui de la polysémie.

De surcroît, l'établissement des réseaux sémantiques est une tâche redoutable, car, surtout sur le réseau Internet, multiculturel, les néologismes fleurissent. Des mots sont apparus, tels que «FAQ» (Foire Aux Questions), «zines» (diminutif de fanzines, de petits journaux diffusés sur le réseau) ou «internaute» ; d'autres mots ont de nouvelles acceptions, tels «surfer» ou «naviguer».

Recherche avec les hyperliens

Le projet *Clever* de la Société IBM voulait résoudre ces difficultés. Très tôt, nous avons compris que l'indexation ou la récupération de pages perdait beaucoup à ne se fonder que sur le texte : plus d'un milliard de liens ne révèlent-ils pas les relations entre les pages. Comment tirer parti de ces informations ?

Lorsqu'ils recherchent «Harvard», par exemple, beaucoup d'internautes désirent en fait des informations sur les équipes sportives qui s'y trouvent. Toutefois, plus d'un million de pages contiennent ce mot, et la page d'accueil de l'Université Harvard n'est pas celle qui l'utilise le plus souvent, de sorte qu'elle ne sera pas la première choisie, ni même jugée importante à l'aide des fonctions de

La «cinétique chimique» sur l'Internet

Tous les moteurs de recherche ne donnent pas de résultats équivalents. Nous avons comparé des moteurs de recherche en analysant les réponses à la requête «cinétique chimique» (l'étude de la vitesse de réactions chimiques).

Plusieurs objectifs se dégagent pour cette recherche : le moyen d'établir un contact entre enseignants pour une mise en commun d'expériences pédagogiques, la recherche des enseignements de troisième cycle dispensés dans cette matière et la recherche de documentation.

Nous avons comparé les résultats donnés par une sélection de moteurs francophones (*Ecila*, *Eureka*, *Excites*, *Francité*, *Lokace*, *Yahoo! France*), à laquelle nous avons ajouté deux moteurs anglophones (*AltaVista* et *GoTo*) et deux métamoteurs, des moteurs qui recherchent dans plusieurs moteurs (*MetaCrawler*, *Savvy Search* et *Trouvez*).

La recherche s'est effectuée uniquement par mot clé, car cette méthode est commune à tous les moteurs. Plusieurs requêtes ont été saisies avec des contraintes de plus en plus fortes. Nous avons d'abord fait la requête *cinétique*, puis *+cinétique +chimique* (qui recherche toutes les pages où les deux termes sont présents) et enfin *cinétique chimique*, qui renvoie les pages où l'expression «cinétique chimique» est présente.

Nous avons classé les moteurs selon deux critères : la quantité de pages indexées et la qualité (renvois

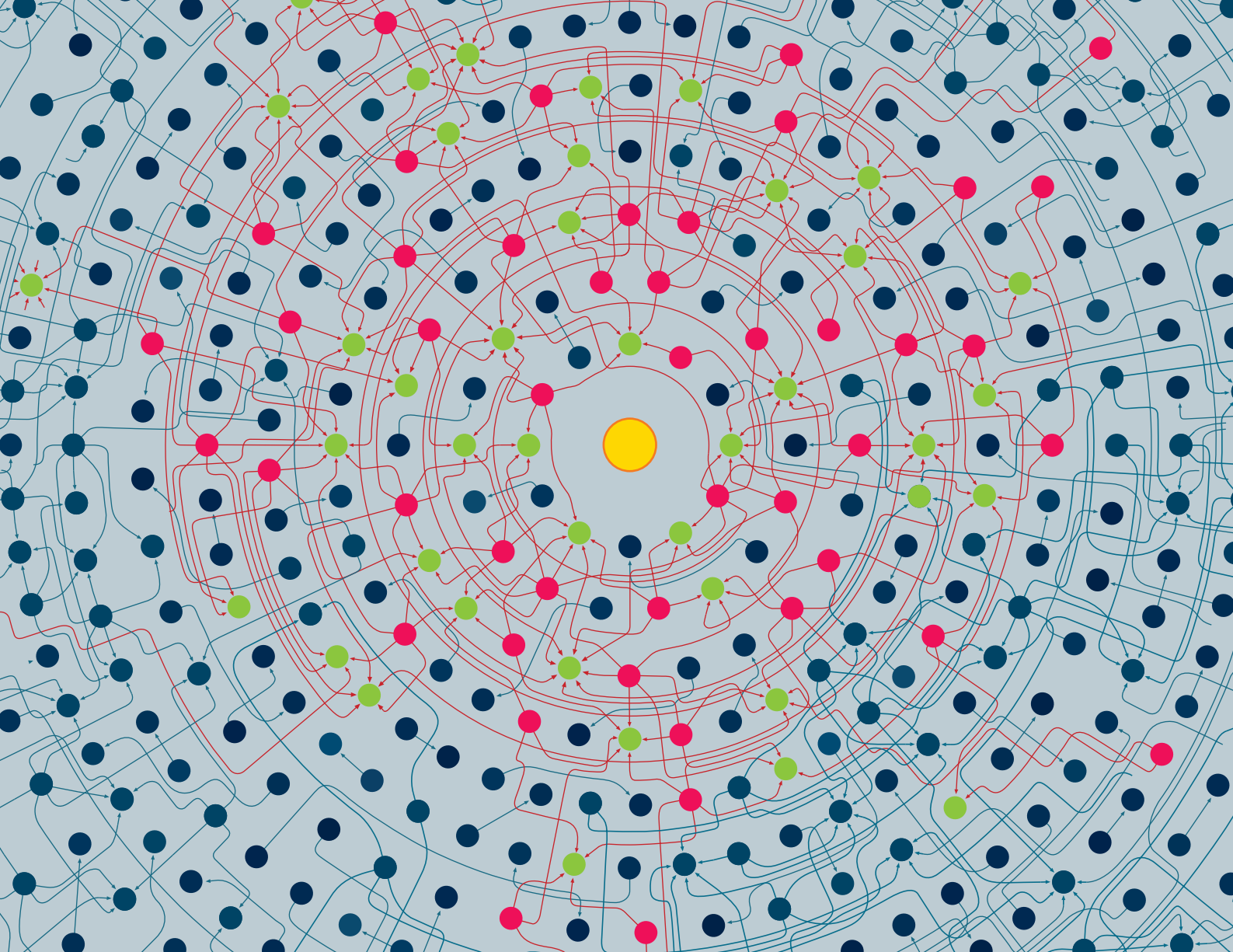
de pages traitant de cinétique chimique jugées pertinentes).

Pour l'étude quantitative, trois moteurs sortent du lot : ce sont *Carrefour*, *Nomade* et *AltaVista*. Ils renvoient 500 à 6 000 pages selon les contraintes imposées. D'autres moteurs donnent de bons résultats (entre 50 et 200 pages) et, enfin, d'autres sont insuffisants.

Pour l'étude qualitative, nous avons prédéfini comme pages pertinentes cinq pages d'universités ou d'écoles qui enseignent la cinétique chimique (un des objectifs précités) : l'Université catholique de Louvain (Belgique), l'École nationale supérieure des industries chimiques à Nancy, l'Université de Pau, l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) et l'Université de Laval (Canada). Avec la saisie de «cinétique chimique», nous avons classé les différents moteurs en cinq groupes, du meilleur au moins bon, les meilleurs étant ceux qui contiennent les cinq pages d'accueil des institutions précitées parmi les 30 premières pages retournées. Les plus performants sont *Trouvez*, *SavvySearch*, *Metacrawler* et *GoTo*.

Les trois moteurs qui renvoyaient le plus grand nombre de pages ne sont pas les plus performants sur la qualité de l'information. On retrouve ainsi les préoccupations du projet *Clever* : la quantité n'est pas toujours liée à la qualité, d'où l'importance d'un moyen de retrouver une information pertinente.

J. BENAÏM et V. VIOSSAT
Université P. et M. Curie, Paris



2. L'INFORMATION EST STRUCTURÉE par les sites de référence et par les sites pivots. Les sites de référence (●) sont des sites qui contiennent de l'information et, en conséquence, sont référencés par de nombreuses pages. Sur le sujet des droits de l'homme,

par exemple, la page d'accueil d'*Amnesty International* est un tel site. Les pivots (●) sont des sites qui pointent vers de nombreux sites de référence ; ce sont par exemple des listes de liens ou les rubriques «Mes sites préférés» des pages personnelles.

classement classiques. Aucune caractéristique interne de cette page ne révèle son importance.

En effet, les concepteurs des sites Internet ont des intentions précises. Les grandes entreprises, par exemple, préfèrent souvent transmettre une image plutôt que de décrire leur activité réelle. Par exemple, la page d'accueil d'*IBM* ne contient pas le mot «ordinateur». Face à ce type de pages, les techniques de recherche classiques échouent.

Les concepteurs des moteurs de recherche sont tentés d'intervenir directement pour résoudre ces problèmes : pour certaines questions, l'humain n'est-il pas plus efficace que l'ordinateur ?

Plusieurs moteurs de recherche utilisent cette approche. Un annuaire de sites comme *Yahoo!* ne contient même que des pages sélectionnées

manuellement. Cependant, le nombre de requêtes possibles est virtuellement infini. Comment un nombre fini d'experts humains mettrait-il à jour toutes ces listes de réponses prédéfinies, alors que le nombre de pages croît au rythme d'un million par jour ?

Nous avons pris le problème par un autre bout : en utilisant les hyperliens, nous avons mis au point une technique automatique qui trouve les sites qui font autorité sur des sujets larges. Cette idée tire parti de la fonction des hyperliens : ce sont eux qui structurent les millions de pages en un tissu de connaissances. C'est grâce à eux que l'utilisateur navigue sur le réseau et découvre fortuitement des informations utiles, en passant par des pointeurs et par des recommandations de personnes qu'il n'a jamais rencontrées.

Cette approche est fondée sur l'hypothèse que chaque lien matérialise une parenté sémantique entre la page initiale et la page vers laquelle il pointe. Par exemple, un militant des droits de l'homme dont la page pointe vers la page d'accueil d'*Amnesty International* approuve clairement ce site.

Certains liens existent aussi pour de simples raisons de navigation («Cliquez ici pour retourner au menu principal»), de publicité («Les vacances de vos rêves ne sont qu'à un clic de souris») ou pour marquer un désaccord («Allez sur ce site pour lire ce que cet imbécile raconte»). Néanmoins, nous pensons que, dans l'ensemble, c'est-à-dire lorsque l'on considère beaucoup de liens, les pointeurs sont une marque d'adhésion et confèrent aux sites un statut de référence.

La conception de nouveaux moteurs de recherche

En juillet 1998, le moteur *AltaVista* a récupéré 170 millions de pages (sur un total estimé à 350 à cette période), dont 125 millions ont été indexées, ce qui représente environ 800 gigaoctets de texte brut (un gigaoctet, ou milliards d'octets, correspond au contenu en texte de l'intégrale d'une grosse encyclopédie), soit, après traitement, à un index de près de 250 gigaoctets installé sur plus d'une vingtaine de machines de très haut de gamme (dix processeurs et dix gigaoctets de mémoire vive par machine). Ces machines sont interrogées 37 millions de fois par jour, en semaine, avec un temps de réponse moyen de 0,6 seconde. Ces quelques chiffres aident à apprécier la difficulté de la conception et de la mise en œuvre d'un moteur de recherche généraliste.

Afin d'améliorer la pertinence des documents retournés, les moteurs de recherche mettent en œuvre plusieurs solutions. L'une concerne les requêtes elles-mêmes, par exemple la correction orthographique ou la détection automatique des phrases. Ainsi, un moteur fournira de meilleures réponses si la requête est l'expression «effet de serre» plutôt que les trois mots «effet», «de» et «serre», car l'expression est plus discriminante que les trois mots pris séparément. Ce fait est bien connu des linguistes : le sens des textes est en grande partie contenu dans les groupes nominaux. Depuis l'été 1998, *AltaVista* reconnaît automatiquement les phrases, ce qui améliore sensiblement la qualité du moteur.

Cependant, le principal levier dont dispose l'architecte d'un moteur de recherche reste encore l'amélioration de l'algorithme d'évaluation de pertinence (le *ranking*). Sur le réseau, les algorithmes fondés sur la mise en correspondance des mots des requêtes et des mots contenus dans les documents trouvent rapidement leurs limites : documents volontairement biaisés par les «spammers», polysémie importante, nombre de documents trop élevé, duplication anarchique des documents, etc. Tout concourt à faire échouer les algorithmes classiques d'évaluation et de pertinence. Pour ces raisons de nouveaux algorithmes,

tels ceux utilisés par *Clever* ou *Goggle*, sont élaborés avec des premiers résultats prometteurs.

Un autre élément important de la conception d'un moteur de recherche réside en la prise en compte de la polysémie, problème particulièrement épineux sur l'Internet. Un acronyme comme «BSE» signifie, entre autres, *Bovine Spongiform Encephalopathy* («encéphalopathie spongiforme bovine»), *Breast Self Examination* («auto-examen des seins»), ou encore *Bombay Stock Exchange* («Bourse de Bombay»). Lorsqu'un utilisateur effectue la requête «BSE», il est donc essentiel que le moteur lui fournisse un moyen de préciser de manière simple l'objet réel de sa recherche. C'est ainsi qu'avec notre équipe de l'École des mines de Paris, nous avons mis au point la technique *Cow9*, utilisée par le moteur *AltaVista* depuis 1997.

Cette technique permet d'affiner les requêtes à l'aide d'une liste thématique construite automatiquement à partir des résultats des recherches. Les thèmes non pertinents peuvent être exclus d'un simple clic de souris, tandis qu'un zoom est possible sur les thèmes jugés les plus pertinents. Une approche similaire, permettant le classement des résultats des recherches dans des dossiers thématiques (dont la liste est établie manuellement), a plus récemment été déployée sur le moteur de recherche *NorthernLight*.

D'autres approches sont utilisées sur certains moteurs pour aider les utilisateurs dans leurs recherches. Citons par exemple la fonction *What's Related* de *Netscape*, qui propose des liens vers des pages au contenu proche d'une page donnée.

Des approches différentes de celles qui sont suivies par les moteurs améliorent aussi la recherche d'information pertinente, comme la recherche par nom de marques de *RealNames*, la reformulation de requêtes en questions aux réponses connues, voie suivie par *AskJeeves*, l'approche des anneaux (*rings* en anglais) qui consiste à relier entre eux par des liens hypertextes les sites aux contenus voisins (ce qui ne résout toutefois pas le problème de trouver un premier site situé

dans l'anneau), ou encore les méta-moteurs qui interrogent en parallèle plusieurs moteurs de recherche classiques et fusionnent ensuite de manière intelligente les résultats.

Sachant que le taux de couverture d'un moteur (c'est-à-dire la proportion de documents qui se trouve effectivement dans la base de données du moteur) est au maximum de 30 pour cent, l'utilisation de métamoteurs peut sembler intéressante. Malheureusement, la pratique montre que la valeur ajoutée de ces outils est bien faible et que, malgré son taux de couverture limité, un moteur classique estime mieux la pertinence des documents qu'un métamoteur.

Le monde des outils de navigation est en perpétuelle mutation, et les défis auxquels sont confrontés les architectes des moteurs de recherche sont légion. D'abord, comment espérer maintenir, à un coût raisonnable, un taux de couverture du Web suffisant quand le nombre de documents disponibles augmente de six pour cent par mois? Comment fournir des réponses pertinentes à un utilisateur qui fournit très peu d'indications sur ce qu'il recherche vraiment? Et comment amener, sans le décourager, l'utilisateur à en dire plus?

La prise en compte des liens hypertextes, comme avec *Clever*, améliore la pertinence des documents retournés, mais ces solutions sont loin d'être parfaites et on ne fera pas l'économie d'une réflexion approfondie sur les impacts socio-économiques et culturels de ces méthodes, notamment les impacts liés au risque de consolidation des positions dominantes et au risque de perte du «service universel» (c'est-à-dire la garantie de pouvoir se faire entendre sur le réseau) pour le citoyen et les minorités. Il faudra d'autres approches fondées sur la collaboration, comme *The Open Directory Project*, pour faire le pendant aux guides commerciaux, un peu à la manière dont le logiciel libre, tel le tandem GNU/Linux, est en train de s'imposer dans une industrie du logiciel dominée par quelques grands acteurs.

François BOURDONCLE
École des mines de Paris

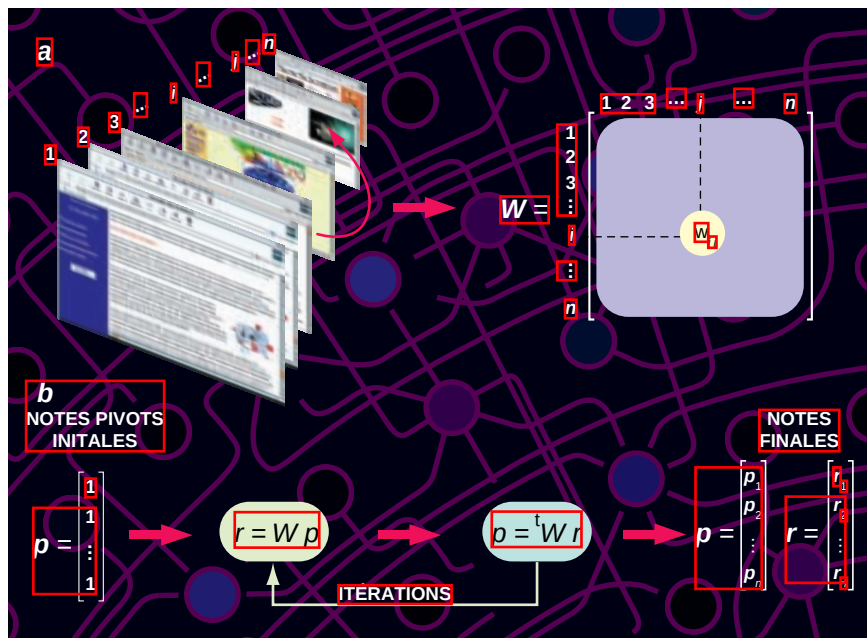
En plus de ces sites de référence, le réseau contient beaucoup de sites d'un autre type, des «pivots», qui sont connectés à ces endroits prestigieux et qui répercutent leur influence. Les sites pivots sont variés : ce sont aussi bien les listes professionnelles réalisées par les sites commerciaux que les sites personnels où l'on trouve des pages telles que «Mes sites préférés». Nous supposons qu'une page de référence est citée par beaucoup de bons pivots, et qu'un pivot utile est un site qui pointe vers beaucoup de sites de référence.

Comment obtenir une méthode d'identification des sites de référence et des sites pivots à partir de définitions aussi circulaires? Nous examinons d'abord un certain nombre de pages pouvant *a priori* répondre convenablement à une requête particulière, et nous attribuons à chacune d'elles une estimation de la fonction référence ou de la fonction pivot. À partir de ces évaluations initiales, nous exécutons ensuite un algorithme itératif en deux étapes.

La première utilise les estimations des sites de référence pour améliorer les estimations des sites pivots : nous repérons les meilleurs sites de références selon cette première estimation, puis nous analysons quelles pages pointent vers eux et jugeons ces sites comme étant de bons pivots. Lors de la deuxième opération, nous utilisons ces informations actualisées sur les pivots pour affiner les évaluations des sites de référence : nous regardons vers où pointent les meilleurs pivots et considérons ces sites comme de bonnes références. La répétition de ces corrections affine les résultats.

Nous avons programmé cet algorithme dans *Clever*, un moteur de recherche prototype. Pour chaque requête sur un sujet, par exemple l'hépatite B, *Clever* obtient d'abord une liste de 200 pages en utilisant un moteur de recherche classique comme *AltaVista*. Le système ajoute alors à ces 200 pages toutes celles qui y sont connectées par un hyperlien entrant ou sortant. Dans notre expérimentation, nous recueillons ainsi 2 000 à 5 000 pages, que nous nommons l'ensemble de base.

Chacune de ces pages reçoit deux notes initiales, une en tant que référence et une autre en tant que pivot. Puis *Clever* affine ces valeurs : pour chacune des pages, il calcule une nouvelle note de référence en additionnant les notes



3. COMMENT FAIRE MATHÉMATIQUEMENT LA RECHERCHE des pages de référence et des pages pivots? À partir d'un ensemble de n pages, on construit la matrice W dont chaque élément représente l'importance d'un lien d'une page à une autre (a). Par exemple, si la page i a beaucoup de liens vers la page j , l'élément w_{ij} de la matrice est élevé. Pour commencer le calcul, on pose toutes les notes pivots des pages égales à un (b), puis on calcule les notes de référence et les nouvelles notes pivots suivant un processus itératif : on obtient les notes de référence (r) en multipliant les notes pivots par la matrice W et on obtient les nouvelles notes pivots (p) en multipliant les notes de référence trouvées à l'itération précédente par la matrice transposée de W (${}^tW$, symétrique de W par rapport à la diagonale). Les calculs se terminent lorsque les notes sont à peu près stables. Ces notes peuvent alors être utilisées pour la détermination des meilleurs sites de référence et des meilleurs pivots.

des pivots qui pointent vers elle, une note pivot en additionnant les notes de référence des pages vers lesquelles elle pointe. Ainsi la note de référence d'une page augmente quand beaucoup de pivots bien notés pointent vers cette page et une page qui pointe vers des sites de référence bien notés a sa propre note de pivot qui augmente en proportion. *Clever* répète ces calculs jusqu'à ce que les notes se stabilisent. Puis il classe les sites selon les notes de référence et de pivot. Remarquons que cet algorithme n'interdit pas qu'une page soit bien notée dans les deux catégories, ce qui arrive parfois.

Pour mieux comprendre les opérations effectuées par l'algorithme utilisé, représentons le réseau Internet par un immense réseau de sites reliés d'une manière apparemment aléatoire. Pour un certain ensemble de pages contenant un mot donné, *Clever* cible les structures de liens les plus denses entre ces pages.

La sommation itérative des notes de référence et de pivot peut être analysée dans le cadre de l'algèbre linéaire : l'itération effectuée correspond à la multiplication répétée d'un vecteur (une colonne de nombres représentant les

notes de référence ou les notes pivots) par une matrice, c'est-à-dire un tableau à deux dimensions, où chaque élément représente un lien d'une page à une autre dans l'ensemble de base. Après quelques itérations, les composantes des vecteurs pivots et des vecteurs de référence deviennent stationnaires et révèlent quelles pages sont les meilleurs pivots ou les meilleures références. Ces colonnes de nombres stabilisés sont des «vecteurs propres».

Le processus itératif converge rapidement vers un ensemble de notes à peu près stable. Dans le cas d'un ensemble de base de 3 000 pages, le calcul converge en cinq itérations seulement et, ce qui est plus intéressant, le résultat est indépendant du choix des notes initiales : la méthode fonctionne même si toutes les notes initiales sont égales à un, de sorte que les notes finales sont intrinsèques aux pages retenues (voir la figure 3).

L'algorithme de *Clever* a l'avantage de regrouper automatiquement les sites en catégories. Par exemple, une recherche sur l'avortement produit deux types de sites, ceux qui sont pour et ceux qui sont contre, parce que les

pages d'une catégorie sont plus souvent liées entre elles qu'à celles de l'autre communauté.

Plus généralement, *Clever* révèle la structure sous-jacente du réseau. Bien que ce dernier ait crû de façon fulgurante et anarchique, il possède une structure intrinsèque – bien qu'imparfaite – fondée sur les liaisons entre pages.

Le lien avec l'analyse de citations

Par son principe, *Clever* ressemble à l'analyse de citations, l'étude de la manière dont les articles scientifiques se citent : la principale mesure de l'importance des articles est le «facteur d'impact», qui juge les publications d'après le nombre de références que les autres articles en font. Mis au point par Eugene Garfield, un spécialiste de l'information scientifique, le facteur d'impact préside à l'«Index des citations scientifiques» (*Science Citation Index*).

Sur le réseau, le facteur d'impact d'une page pourrait être le nombre de liens qui pointent vers elle. Toutefois, cette approche simpliste favoriserait, même pour des requêtes sur des sujets spécifiques, les pages généralistes très connues, telle la page d'accueil du *Monde*.

Dans le domaine de l'analyse des citations, les chercheurs ont tenté d'améliorer la mesure de E. Garfield, qui compte de la même façon toutes les références. Ne serait-on pas avisé de donner plus de poids aux citations d'un journal plus important? Le problème, avec cette approche, est qu'on donne une définition circulaire du mot «importance», comme dans la définition des pivots et des références.

Dès 1976, Gabriel Pinsky et Francis Narin, du Laboratoire de recherches du CHI, dans le New Jersey, ont éliminé cet obstacle en mettant au point une méthode itérative de calcul qui aboutit à un ensemble stable de notes, qu'ils nomment poids d'influence. Toutefois, ils ne distinguent pas référence et pivot.

Cette différence révèle une particularité entre les pages Internet et la littérature scientifique classique : dans le cyberspace, des sites de référence en compétition, comme *Netscape* et *Microsoft*, ne reconnaissent pas leur existence mutuelle et ne peuvent donc être reliés que par un ensemble de pivots tiers ; inversement, les revues scientifiques rivaux pratiquent des

citations croisées qui rendent le rôle des pivots moins crucial.

D'autres équipes utilisent différemment les hyperliens, pour la recherche sur le réseau. À l'Université de Stanford, Serge Brin et Larry Page ont mis au point un moteur de recherche, nommé *Google*, qui utilise un classement fondé sur les poids d'influence de G. Pinsky et F. Narin. L'équipe de Stanford considère un internaute qui suit des liens en faisant un certain nombre de sauts au hasard, qui le mènent à certaines pages plus fréquemment qu'à d'autres. Ainsi *Google* trouve un seul type de pages universellement importantes, intuitivement celles qui sont fréquemment visitées lors d'une marche au hasard dans la structure des liens du réseau. Concrètement, pour chaque page, *Google* additionne les notes des sites qui pointent vers la page. C'est pourquoi, lors d'une requête spécifique, *Google* répond rapidement en trouvant toutes les pages qui contiennent le texte recherché et en les ordonnant selon leur rang prédéterminé.

Les moteurs *Google* et *Clever* diffèrent cependant par deux aspects importants. D'une part, *Google* élabore un ordre de classement initial et l'utilise quelle que soit la requête, alors que *Clever* construit un ensemble de base différent pour chaque terme recherché, puis fixe les priorités des pages dans le contexte de cette requête. Au total, *Google* répond plus rapidement. D'autre part, *Google* ne regarde que dans une seule direction, d'un lien vers un autre, alors que *Clever* regarde aussi dans l'autre direction, pour savoir quels sont les sites qui pointent vers une page de référence. *Clever* tire ainsi parti du phénomène sociologique qui fait que les humains construisent naturellement des contenus qui expriment leur expertise sur un sujet donné.

La recherche continue

Nous cherchons encore à améliorer *Clever*. Dans notre démarche, nous cherchons à associer texte et hyperliens. Pour ce faire, nous estimons que certains liens ont plus de poids que d'autres suivant la pertinence du texte qui se trouve en regard. Plus précisément, nous analysons le contenu des pages dans l'ensemble de base et nous cherchons le nombre d'occurrences et les positions relatives du terme recherché. Ces informations pondèrent ensuite certaines connexions entre

pages. Si, par exemple, le texte de la requête apparaît fréquemment à proximité d'un lien, alors la pondération correspondante est augmentée.

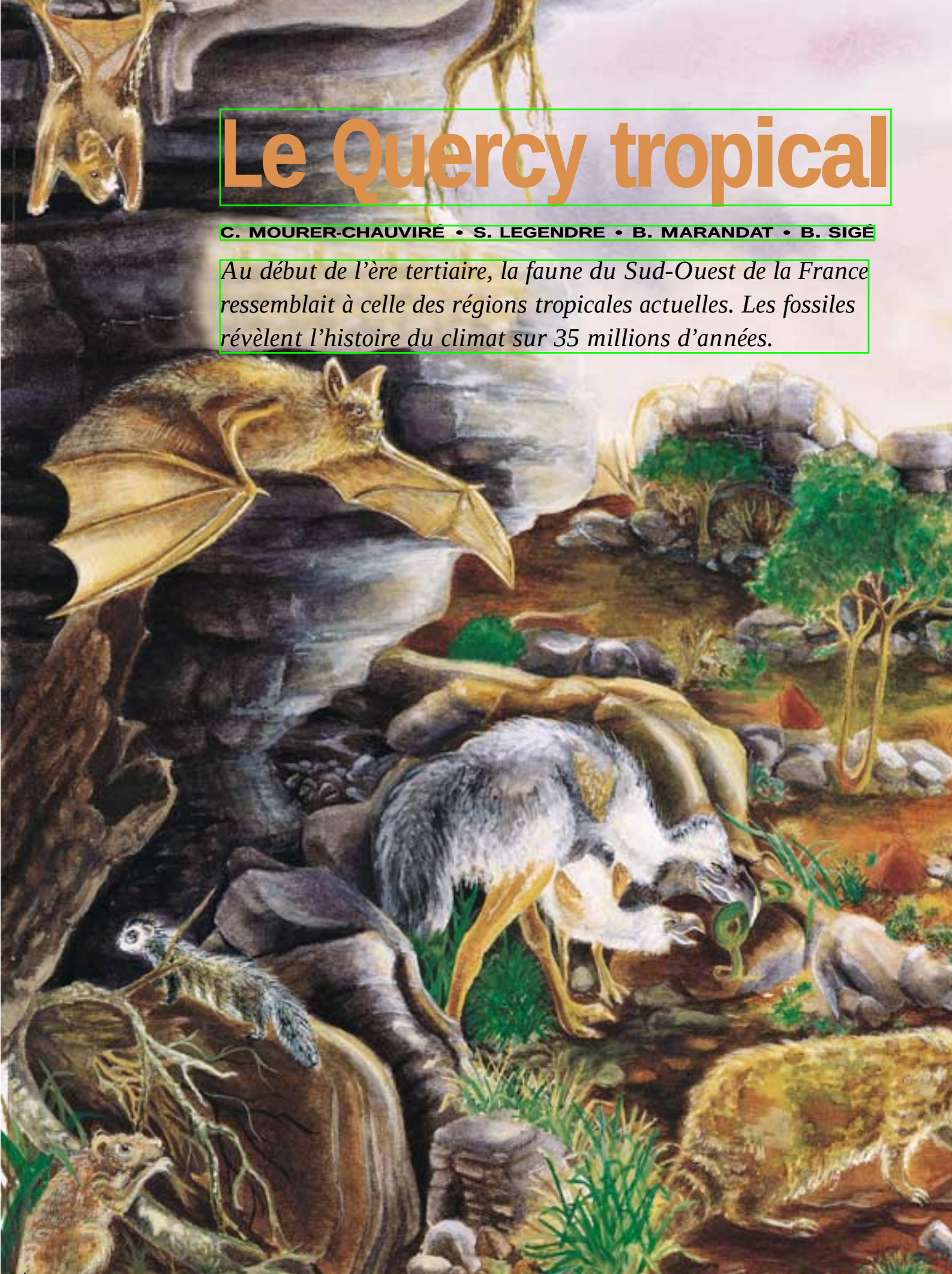
Nos premières expériences indiquent que ce raffinement améliore substantiellement la pertinence des résultats (une imperfection de *Clever* a parfois l'inconvénient d'élargir trop sa recherche, quand la requête est très précise : ainsi, si l'on cherche la Maison Ozenfant, de Le Corbusier, le système élargit sa recherche et retrouve des informations sur un sujet général comme l'architecture contemporaine). Nous expérimentons d'autres améliorations qui tiennent compte des divers styles de réalisation de pages Internet.

Nous avons aussi commencé à construire automatiquement des listes de ressources Internet, similaires aux annuaires de sites élaborés manuellement par les employés de sociétés comme *Yahoo!* ou *Infoseek*. Les premiers résultats sont aussi bons que ceux des annuaires. De surcroît, ce travail nous a montré que le réseau est plein de petites communautés très liées, avec des intérêts particuliers (les amateurs de sumo, les passionnés de yo-yo de la Creuse ou les amateurs de sauce ketchup au petit déjeuner). Nous recherchons comment découvrir automatiquement ces communautés cachées (voir la figure 1).

Le réseau Internet est aujourd'hui très différent de ce qu'il était il y a seulement cinq ans. Personne ne peut dire ce qu'il sera dans cinq ans. L'indexation du réseau deviendra-t-elle impossible? Et comment la notion de recherche changera-t-elle alors? Aujourd'hui, la seule chose dont nous soyons certains est que la croissance du réseau continuera à lancer des défis informatiques à ceux qui veulent naviguer dans cet océan d'informations.

Le projet *Clever*: Soumen Chakrabarti, Byron Dom, Ravi Kumar, Prabhakar Raghavan, Sridhar Rajgopalan et Andrew Tomkins travaillent au Centre de recherche Almaden d'IBM, à San Jose (Californie). Jon Kleinberg travaille au département d'informatique de l'Université Cornell. David Gibson termine sa thèse au département d'informatique de l'Université de Berkeley.

De nombreux liens pour cet article sont disponibles sur notre site Web : <http://www.pourlascience.com/numeros/pls-262/clever.htm>



Le Quercy tropical

C. MOURER-CHAUVIRÉ • S. LEGENDRE • B. MARANDAT • B. SIGÉ

Au début de l'ère tertiaire, la faune du Sud-Ouest de la France ressemblait à celle des régions tropicales actuelles. Les fossiles révèlent l'histoire du climat sur 35 millions d'années.





1. CE PAYSAGE TROPICAL aurait pu être observé près du site d'Itardiès, dans le Tarn-et-Garonne, il y a 30 millions d'années. Le Soleil se couche. Nous sommes placés sous un porche rocheux, à l'entrée d'une grotte creusée dans le calcaire. Sur le plateau, le sol est partiellement couvert d'une argile rougeâtre formée par la dissolution et l'altération chimique de la roche calcaire. La végétation clairsemée, herbacée en touffes et faiblement arborée correspond à un climat assez chaud et aride. Les animaux qui peuplent ce paysage sont très différents de ceux que l'on trouve aujourd'hui dans la région, en particulier les oiseaux, dont les formes apparentées actuelles vivent surtout sous les tropiques. Au premier plan figurent, de gauche à droite : (1) *Issiodoromys medius*, rongeur de la famille des thériidomyidés, représentant un grand groupe endémique et éteint du Paléogène d'Europe (il y a 65 à 23 millions d'années) ; (2) deux chauves-souris à feuillets nasaux, d'un genre éteint de la famille des hipposidéridés, *Palaeophyllophora quercyi* ; (3) une civette de moyenne taille, *Stenoplesictis minor* (famille des viverridés) ; (4) *Palaeotodus itardiensis*, todier de la famille des todidés ; (5) *Caenomeryx cf. procommunis*, petit herbivore artiodactyle de la taille d'un lapin, de la famille éteinte des cainothériidés. Au deuxième plan : (6) un grand oiseau carnivore, la mère et son petit, *Ameghinornis minor* (famille des phororhacidés) ; (7) *Stenogale gracilis*, petit carnivore du groupe des putois (famille des mustélidés) ; (8) *Idiornis itardiensis*, échassier voisin des cariamidés. Plus en arrière : (9) une famille de grands rhinocéros primitifs, *Ronzotherium sp.* (famille des rhinocerotidés) ; (10) *Nimravus intermedium*, grand carnivore félin à dents de sabre. Perché sur l'arbre, (11) un rolrier, *Geranopterus alatus* (famille des coraciidés).



2. UN CRANE ET UNE MANDIBULE d'un mammifère artiodactyle ruminant (le groupe qui renferme les vaches, les chameaux et les girafes) d'une quinzaine de kilogrammes, *Diplobune minor*, retrouvés dans la position même où ils étaient lorsque l'animal est mort, il y a 30 millions d'années. Le site d'Itardiès, d'où ils proviennent, a aussi livré des pattes du même animal en connexion anatomique. Leur analyse révèle que cette espèce était adaptée au déplacement sur des terrains boueux instables : l'environnement était sans doute marécageux. La qualité de préservation des fossiles du Quercy apporte ainsi de précieuses informations sur les parentés entre les espèces, mais aussi sur les évolutions de l'environnement pendant 35 millions d'années.

L'origine des chauves-souris

Dans l'ordre des chauves-souris, les Chiroptères, les fossiles du Quercy révèlent la diversification précoce, dès l'Éocène moyen (il y a 44 millions d'années), c'est-à-dire peu après son apparition, du genre *Stehlinia*, forme primitive de la superfamille des vespertilionoïdes, très répandue et très diversifiée dans la nature actuelle (et comprenant, entre autres, les chauves-souris que l'on rencontre aujourd'hui en France, tels les murins, les sérotines et les pipistrelles).

Le genre *Stehlinia* a été décrit en 1919 d'après un unique spécimen, un petit crâne (non daté) des anciennes collections des phosphorites du Quercy. Grâce aux fouilles modernes, des spécimens de ce genre ont été retrouvés, parfois assez complets, et datés avec précision. Un inventaire, établi en 1987, montre la coexistence de plusieurs lignées de *Stehlinia*, dans différentes catégories de taille, de l'Éocène supérieur à l'Oligocène supérieur (il y a entre 38 et 23 millions d'années).

Des *Stehlinia* plus anciens, de l'Éocène moyen (il y a 50 à 38 millions d'années), avaient été reconnus dans quelques faunes karstiques ou dans des dépôts lacustres d'Europe occidentale (en France, en Suisse et en Allemagne). En général, il s'agissait de dents isolées ou de rangées dentaires partielles, dont l'attribution à une espèce plutôt qu'à une autre était impossible. Seule la cavité de Cuzal, découverte récemment dans le Quercy, a livré des restes plus complets, qui ont permis à l'un d'entre nous (B. Sigé) et à Gerhard Storch de démontrer la coexistence de trois lignées dès l'Éocène moyen en Europe, qui perdurent entre 44 et 41 millions d'années.

Cette diversité, quasi contemporaine de la plus ancienne trace de *Stehlinia*, atteste la diversification adaptative précoce de ce genre en différentes catégories de taille. Cette diversification a-t-elle suivi de peu l'émergence en Europe du type morphologique *Stehlinia* à partir d'une forme plus primitive, ou est-elle consécutive à l'arrivée en Europe d'une forme plus ancienne apparue sur un autre continent ? Quelques éléments autorisent cette dernière hypothèse, notamment la présence en Tunisie de chiroptères anciens, de l'Éocène inférieur, ce qui montre la précocité de l'ensemble vespertilionoïde dans cette aire géographique.

Le Soleil disparaîtra bientôt à l'horizon. Dans la savane, des rhinocéros paissent paisiblement, tandis qu'un félin à dents de sabre guette ses proies, petits herbivores et rongeurs. D'étranges oiseaux carnivores, au bec puissant et acéré, dévorent serpents et lézards. Des bosquets d'arbres abritent de nombreux autres oiseaux, échassiers, todiers ou rolliers. Dans des anfractuosités rocheuses nichent des chauves-souris.

Ce paysage n'est ni africain, ni Sud-américain, ni Sud-asiatique : nous aurions pu le contempler, avec les animaux qui le peuplaient, il y a 30 millions d'années, dans les environs d'Itardès, aujourd'hui dans le Tarn-et-Garonne. De cette faune, il ne subsiste que des fossiles. Toutefois, malgré leur ancienneté, leur abondance et leur bon état de conservation nous permettent de décrire les espèces presque aussi bien que celles qui peuplent les savanes tropicales actuelles : nous avons retrouvé

de nombreux crânes de mammifères, des squelettes en connexion anatomique (dont les os n'avaient pas bougé depuis la mort de l'animal) et des restes d'espèces forestières qui se fossilisent rarement.

Nous connaissons aujourd'hui, dans le Quercy, 150 gisements fossilières analogues. Ils forment l'un des ensembles les plus riches au monde et donnent, à eux seuls, une image quasi complète de la faune des vertébrés d'Europe occidentale au début de l'ère tertiaire, de l'Éocène au début du Miocène (il y a entre 55 et 20 millions d'années). Les fossiles retracent l'évolution des espèces disparues et leurs liens de parenté sur plusieurs millions d'années.

Les méthodes d'étude sont proches de celles qu'utilisent les biologistes pour l'étude des faunes actuelles. Nous reconstituons ainsi l'histoire des différents groupes et nous affinons l'échelle de datation relative fondée sur les faunes européennes de cette période. En outre, la connaissance approfondie des faunes, en particulier des mammifères, nous a permis de mettre au point de nouvelles méthodes paléontologiques, pour la datation absolue des gisements et pour la reconstitution du climat et de l'environnement.

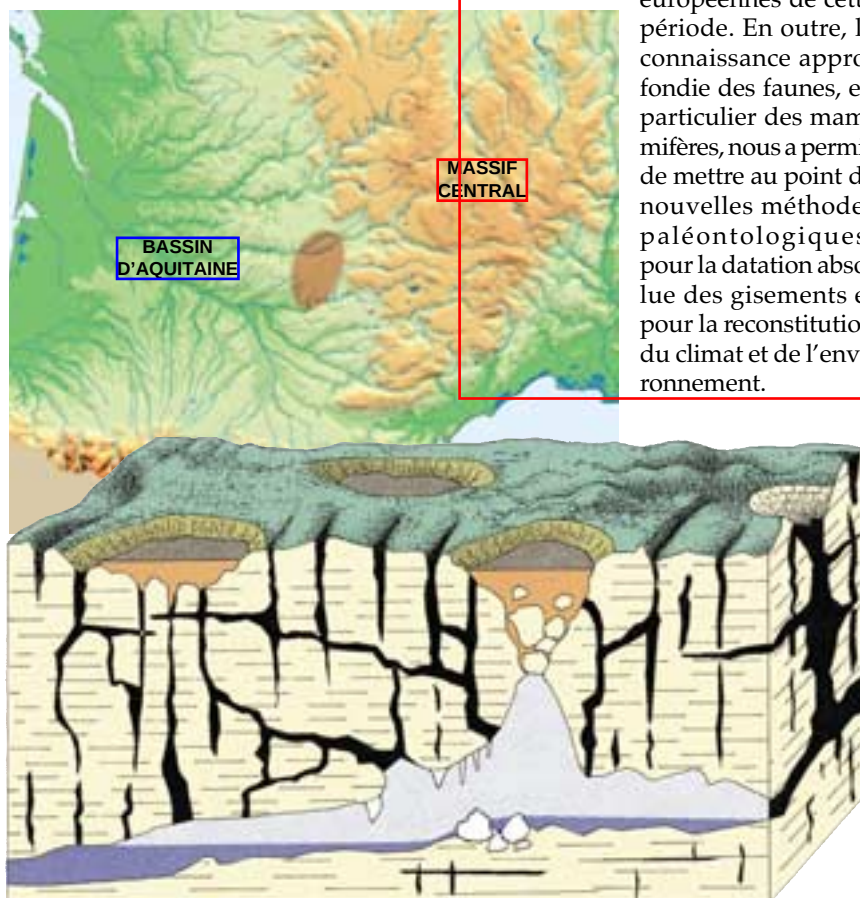
Un ancien fond marin

Adossé aux contreforts Sud-Ouest du Massif central, le Quercy, dont le nom vient d'une ancienne province française, forme la bordure Nord-Est du bassin d'Aquitaine. À l'Est, cette région est formée de causses, plateaux calcaires, à sol peu profond, dont l'altitude moyenne est d'environ 300 mètres.

Ces plateaux se sont formés pendant le Jurassique, il y a entre 190 et 140 millions d'années. Le Sud-Ouest du Massif central était alors recouvert par une mer peu profonde, située en bordure d'un immense océan, la Téthys, qui séparait le bloc formé par l'Eurasie et l'Amérique du Nord, alors reliées, de celui formé par les continents du Sud (Amérique du Sud, Afrique, Australie et Antarctique). Au fond de cette mer, des sédiments carbonatés, surtout des coquilles de minuscules organismes marins et des boues calcaires, se sont déposés sur une épaisseur totale de plusieurs centaines de mètres. À plusieurs reprises, le niveau marin a baissé et les plates-formes calcaires, émergées, ont été soumises à l'érosion.

La dernière de ces phases d'érosion, après le retrait définitif de la mer, il y a 70 millions d'années environ, a été très intense : les circulations d'eaux souterraines ont ouvert de longues et vastes galeries à l'intérieur du calcaire, donnant naissance à un relief karstique. Après avoir servi à l'évacuation des produits d'érosion, ces galeries et ces puits ont été remplis par des matériaux provenant de l'altération des produits d'érosion des massifs voisins et des résidus de dissolution des roches carbonatées : surtout des argiles et des sables rouges, mais aussi des concrétions de fer (nommées pisolithes) et des concrétions de phosphate tricalcique (nommées phosphorites). De nombreux ossements d'animaux ont aussi été entraînés parmi ces sédiments.

Ce remplissage des réseaux souterrains s'est poursuivi jusqu'à il y a 20 millions d'années. Il a été interrompu à plusieurs reprises par des réactivations de l'érosion karstique, liées à la baisse des niveaux de base des réseaux hydrographiques souterrains, et certaines cavités ont même été déblayées partiellement. Ensuite, à la fin de l'Oligocène et au début du Miocène, il y a 23 millions d'années, de grands lacs d'eau douce confinés auparavant au Sud-Ouest du Quercy



3. LES CAUSSES CALCAIRES DU QUERCY, sur la bordure Sud-Ouest du Massif central (zone en rouge sur la carte), sont érodés physiquement et chimiquement par l'écoulement de l'eau, qui y creuse des fissures, des puits et des galeries, verticaux ou quasi horizontaux (en bas). Ce réseau débouche, en profondeur, dans des cavités vastes et hautes, partiellement noyées, (en bleu) et dont le niveau de remplissage contrôle le régime des écoulements. Les dépressions de surface, reliées à ce réseau, retiennent les sédiments (couleur brique) et se remplissent : c'est là que se sont déposés de nombreux fossiles au début de l'ère tertiaire, il y a entre 55 et 20 millions d'années.



4. CETTE GRENOUILLE MOMIFIÉE par le phosphate de calcium témoigne de l'exceptionnel état de conservation des fossiles du Quercy. Ce spécimen de six centimètres de long, conservé au Muséum national d'histoire naturelle, provient malheureusement de fouilles anciennes, et son origine exacte n'est pas connue. Paradoxalement, son positionnement précis dans une lignée évolutive est difficile : on ne voit pas ses os, qui servent aux comparaisons.

se sont étendus vers l'Est et ont recouvert la plus grande partie des causses quercinois méridionaux. Au fond de ces lacs, une nouvelle couche de sédiments carbonatés s'est déposée, scellant le karst et ses cavités fossilifères.

Puis, il y a trois millions d'années, un mouvement tectonique régulier a soulevé le Sud-Ouest de la France par rapport au niveau de la mer : les causses du Quercy, à nouveau émergés, sont depuis soumis à l'érosion, qui a décapé les calcaires miocènes et jurassiques et a tronqué la partie supérieure des remplissages karstiques... juste à temps pour que l'homme en exploite le contenu !

Du phosphate aux fossiles

Du fer a été extrait de quelques amas de pisolithes, probablement depuis le Moyen Âge, mais l'exploitation des cavités ne commença vraiment qu'en 1870, avec l'extraction du phosphate : en une trentaine d'années, des centaines de poches d'argile phosphatée du plateau du Quercy furent vidées. Le phosphate, séparé de l'argile, était ensuite broyé et calciné, pour être utilisé comme engrais. Simultanément, on exhuma une énorme quantité de restes d'animaux fossilisés et minéralisés dans ces remplissages argileux.

Les fossiles sauvés du broyage industriel alimentèrent un trafic, la plupart des ouvriers carriers les vendant à des collectionneurs, ou à des collecteurs qui agissaient pour le compte de savants ou

d'institutions ; les plus anciens travaux sur ces fossiles datent du début des années 1870. Pendant un siècle, de nombreux auteurs, français et européens, étudièrent ces riches récoltes et firent progresser la connaissance anatomique et systématique de nombreux groupes animaux, surtout des carnivores et des primates, mais aussi des insectivores, des chiroptères (ordre des chauves-souris), des rongeurs, des ongulés, des oiseaux, des reptiles et des insectes.

Les fossiles du Quercy sont remarquablement préservés. Généralement bien minéralisés, non déformés, ils ont conservé les détails de leur structure originelle. Certains animaux ont été minéralisés au tout début de leur décomposition. Ainsi une grenouille a-t-elle été transformée en une statuette de phosphate (voir la figure 4) ! Le plus souvent, il ne reste toutefois que les parties dures (carapaces des arthropodes, coquilles des gastéropodes, restes squelettiques dissociés de vertébrés), mais, même dans ce cas, on a parfois la chance de découvrir des squelettes en connexion, ce qui permet une compréhension plus globale des organismes, de leurs aptitudes fonctionnelles et de leurs modes de vie.

Un bestiaire complet

Les invertébrés trouvés dans les gisements du Quercy sont des gastéropodes terrestres et des arthropodes : des insectes, surtout diptères (mouches)

représentés par leurs pupes (stade de repos correspondant au moment où la larve se transforme en adulte), ainsi que des isopodes, petits crustacés cavernicoles. Les vertébrés sont les plus nombreux.

Les amphibiens, les lézards et les serpents sont nombreux et diversifiés ; les tortues sont plus rares, mais parfois complètes, comme dans la cavité du Garouillas ; les restes de crocodiliens sont exceptionnels. Les oiseaux sont aussi bien représentés, mais moins que les mammifères, dont un catalogue, portant sur les collections antérieures à 1972 recense 12 ordres, 59 familles, 150 genres, 326 espèces et variétés nommées. Les récoltes récentes et leur analyse ont porté ces nombres à 159 pour les genres et à 420 pour les espèces.

Par ailleurs, certaines cavités contiennent jusqu'à 50 espèces de mammifères, dont certaines sont représentées par plusieurs centaines, voire plusieurs milliers, de spécimens. Nous disposons ainsi, pour différentes époques de l'Éocène et de l'Oligocène, d'un catalogue assez complet de la faune terrestre d'Europe occidentale. Par exemple, dans les remplissages de la transition entre l'Oligocène inférieur et l'Oligocène supérieur, il y a environ 30 millions d'années, l'ordre des Chiroptères est représenté par cinq familles, huit genres et 14 espèces, qui forment probablement une part importante de la faune réelle de la période considérée : sa diversité est proche de celle de la faune actuelle des chauves-souris d'Europe, dont la composition est très différente, et qui contient quatre familles, 11 genres, et 29 espèces.

Grâce au grand nombre de spécimens d'une même espèce, nous mesurons la variabilité interindividuelle de différentes parties du squelette. Nous distinguons mieux les phénomènes liés à l'évolution, et nos reconstitutions phylogénétiques sont plus précises.

Aussi grand qu'ait été leur apport à ces études phylogéniques, l'intérêt des collections anciennes est limité. Nous ne savons pas, ou pas assez précisément, d'où a été extrait chaque fossile, les carriers et les revendeurs les ayant mélangés et souvent vendus par lots : l'ensemble donne une image très hétérogène de la faune, des formes primitives côtoyant des formes évoluées plus tardives, chez les gastéropodes et les mammifères par exemple.

Des oiseaux tropicaux et voyageurs

Grâce aux fossiles du Quercy, nous suivons l'évolution des oiseaux d'Europe occidentale pendant plus de 15 millions d'années. Nous ne retrouvons que des formes de taille moyenne ou petite, voire très petite : les très grandes espèces, s'il en existait, n'ont pas été entraînées par l'eau dans les cavités. En revanche, de nombreuses formes forestières, qui se fossilisent rarement, sont présentes. Ces oiseaux sont différents des oiseaux modernes : les Passeriformes, les plus courants aujourd'hui, des corbeaux aux moineaux, sont quasi absents (on n'en connaît avec certitude qu'un seul os). Ils seraient diversifiés dans l'hémisphère Sud et ne se seraient installés dans l'hémisphère Nord qu'à partir du début du Miocène, il y a 23 millions d'années. Toutes les niches écologiques qu'ils occupent aujourd'hui étaient peuplées par une très grande variété de petits oiseaux, dont beaucoup appartiennent à des groupes qui existent encore aujourd'hui, mais qui ne sont représentés, pour la plupart, que par des formes reliques, cantonnées à quelques zones du globe, surtout dans des régions tropicales, à l'abri de la concurrence avec des groupes d'apparition plus récente (voir ci-dessous ; on a indiqué en gras les groupes présents dans le Quercy au Tertiaire).

Les groupes encore présents en Europe ont beaucoup changé depuis l'époque où les cavités karstiques du Quercy se sont remplies, notamment dans l'importance relative des différentes familles d'un même ordre. Ainsi, les Strigiformes (les chouettes et les hiboux) ne comptent aujourd'hui que deux familles : les Tytonidés, ou effraies, qui ne sont représentés que par deux genres, et les Stri-

gidés, très diversifiés, qui incluent tous les autres genres de chouettes et de hiboux. En revanche, dans le Quercy, les Strigidés sont absents : les nombreux Strigiformes appartiennent à deux familles éteintes et aux Tytonidés (avec au moins trois sous-familles, toutes éteintes). Les Strigidés n'apparaissent qu'à partir du Miocène inférieur, il y a entre 23 et 16 millions d'années, et supplantent progressivement les Tytonidés, dans la plupart des milieux terrestres, y compris dans les régions arctiques : les Tytonidés actuels vivent surtout dans les régions tropicales ou tempérées et ne supportent pas les climats froids.

Nous précisons aussi l'origine géographique de certains groupes. Ainsi, les Galliformes, l'ordre des poules, des paons et des pintades, seraient apparus dans l'hémisphère Nord. Les deux familles de Galliformes les plus primitives actuelles, les Megapodiidés et les Craciidés, vivent surtout dans l'hémisphère Sud, en Australie et dans les régions avoisinantes pour les premiers, en Amérique centrale et en Amérique du Sud pour les seconds. Nous avons retrouvé dans le Quercy deux familles de Galliformes encore plus primitives, les Paraortytidés et les Quercymegapodiidés, qui ont vécu dans l'hémisphère Nord jusqu'à l'Oligocène supérieur pour les premiers, et jusqu'au Miocène inférieur pour les seconds. La troisième famille de Galliformes actuels, les Phasianidés (paons, faisans, perdrix, dindons, pintades), qui ont probablement évolué en Asie du Sud-Est, n'apparaissent dans le Quercy, comme dans d'autres régions d'Europe occidentale, que vers la fin de l'Oligocène inférieur. À partir de cette époque ils se diversifient et supplantent les autres familles.

Cathartidés (genres *Plesiocathartes* et *Diatropornis*) : les plus anciens représentants de la famille des Vautours du Nouveau Monde (condors, urubus). Aujourd'hui : dans les régions tropicales des deux Amériques.



Archaeotrogonidés (genre *Archaeotrogon*) : apparentés aux Caprimulgidés (engoulevents) actuels ; leur aile présentait un éperon pointu. Éteints.

Horusornithidés (genre *Horusornis*) : petits rapaces, de la taille d'un petit faucon, mais avec des pattes très étroites et très allongées qui leur permettaient peut-être de capturer des insectes dans les cavités des arbres. Éteints.

Sylphornithidés (genre *Sylphornis*) : minuscules oiseaux, proches des Coraciiformes (groupe des todiers, des rolis, des guépiers et des huppés). Éteints.

Quercypsittidés (genre *Quercypsitta*) : formes primitives de perroquets. Aujourd'hui : dans toutes les régions tropicales, particulièrement diversifiés en Australie et en Amérique du Sud.

Todiers (genre *Palaeotodus*) : petits oiseaux de quelques centimètres de long. Aujourd'hui : un seul genre, *Todus*, et cinq espèces vivant uniquement dans les Grandes Antilles.



Idiornithidés (genres *Idiornis* et *Elaphrocnemus*) : échassiers de taille moyenne. Aujourd'hui : proches des Cariamidés (*Cariama huppé* et *Cariama de Burmeister*), dans les pampas et les forêts clairsemées du centre de l'Amérique du Sud.



Sagittaires (genre *Pelargopappus*) : oiseaux de proie à grandes pattes d'échassiers. Aujourd'hui : un seul genre et une seule espèce, dans les steppes et dans les savanes africaines.



Gangas (genres *Archaeoganga* et *Leptoganga*) : proches des pigeons et particulièrement adaptés à la vie dans les régions semi-désertiques ou désertiques. Représentés dans le Quercy par des formes énormes. Aujourd'hui : Afrique, Madagascar, Sud de l'Europe et Asie centrale.



Martinets arboricoles (genre *Cypselavus*) : se différencient des autres martinets par leur plumage brillant et leur habitude de se percher et de nicher sur des arbres. Aujourd'hui : un genre et quatre espèces, en Asie du Sud-Est.



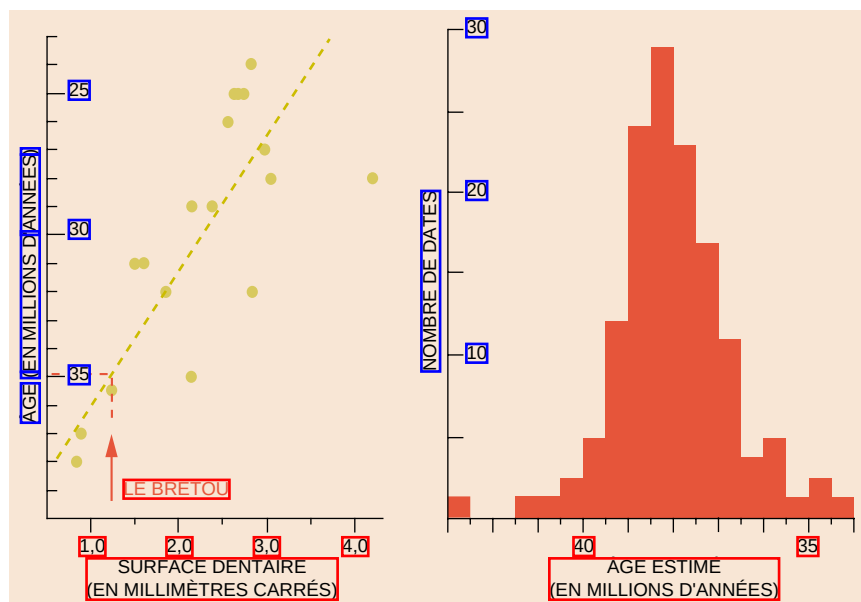
Phororhacidés (genre *Ameghinornis*) : oiseaux géants incapables au vol, carnivores pourvus d'un énorme bec tranchant. Abondants et diversifiés en Amérique du Sud au Tertiaire (des formes géantes se sont développées). Éteints.



Colious (genre *Primocolius*) : petits oiseaux gris, se faufilent comme des rongeurs au milieu du feuillage. Aujourd'hui : deux genres et six espèces vivant uniquement en Afrique, au Sud du Sahara.

Podarges (genre *Quercypodargus*) : sortes d'engoulevents avec une immense bouche de grenouille, qui n'attrapent pas des insectes au vol, mais restent sur le sol et capturent des animaux rampants. Aujourd'hui : deux genres et 13 espèces, en Australie et en Asie du Sud-Est.





5. LA DATATION ABSOLUE DES SITES DU QUERCY est obtenue grâce à la variation de taille des dents des mammifères. Pour chaque lignée spécifique (à gauche, pour une lignée de petits rongeurs du genre éteint *Elfomys*) et chaque catégorie dentaire (ici les première et deuxième molaires inférieures, indistinguables lorsqu'elles sont isolées), on porte l'âge estimé du gisement dans l'échelle biochronologique relative (obtenu par répartition équidistante de niveaux repères dans l'intervalle de temps considéré) en fonction de la surface dentaire (produit de la longueur par la largeur). On trace ensuite la droite moyenne, qui correspond à une relation plus vraie : l'âge d'un gisement est celui qui correspond, sur cette droite, à la surface dentaire moyenne du gisement. On répète cette opération sur toutes les catégories dentaires de toutes les lignées disponibles et on obtient, pour chaque site, une distribution d'âges (à droite, pour le site du Bretou, 116 valeurs provenant de 28 lignées) qui permet le calcul d'un âge moyen et d'un intervalle d'incertitude : 38,05 millions d'années, plus ou moins 0,116 million d'années (la probabilité que la date soit dans cet intervalle est de 67 pour cent).

En revanche, les prospections purement paléontologiques, anticipées par le travail précurseur mais limité de Bernard Gèze en 1938, puis véritablement engagées par un travail collectif à partir de 1965, ont révélé que la faune de chaque cavité (ou parfois de chaque ensemble sédimentaire bien individualisé à l'intérieur d'une cavité) est très homogène : l'ensemble des espèces identifiées dans une même cavité sont contemporaines, à l'échelle des temps géologiques et de l'évolution. Chaque cavité a été comblée en quelques milliers d'années tout au plus. Les cavités sont petites par rapport aux zones lessivées par les écoulements : aussi une épaisseur donnée de sédiments se dépose-t-elle en un temps plus court que lors des sédimentations lacustres ou marines.

La datation des dépôts

Chaque population de la faune d'une cavité donnée représente un stade évolutif au sein d'une lignée. La comparaison de ces stades évolutifs indique la chronologie relative au sein de chaque lignée, et la confrontation des

chronologies des différentes lignées permet la définition d'une échelle «biochronologique» générale.

Cette démarche est classique en paléontologie. Ainsi, pour le Paléogène (il y a entre 65 et 24 millions d'années), une succession d'une trentaine de niveaux repères ont été définis à partir des faunes de mammifères : chaque niveau de référence correspond à une faune fossile de mammifères issue d'un gisement choisi pour sa richesse et sa valeur de représentation géographique la plus large possible. Plusieurs des faunes du Quercy, dégagées lors de fouilles récentes, ont été choisies comme niveaux repères.

En dehors de toute autre indication, on attribue habituellement un âge théorique, appelé bioâge, à chacun de ces niveaux repères, en les plaçant simplement à intervalles réguliers dans l'intervalle de temps considéré. Ces bioâges sont toutefois entachés d'une forte incertitude. Pourrait-on dater précisément les niveaux repères ?

Outre les transformations morphologiques, l'évolution des espèces se traduit par des changements de taille, le plus souvent des augmentations. Cet

accroissement de la taille, connu sous le nom de loi de Cope, est en particulier mesurable sur les dents, éléments du squelette généralement les mieux conservés (cette augmentation n'est toutefois pas une règle absolue : l'évolution conduit parfois à la réduction, puis à la disparition de certaines dents).

Lorsque l'on porte, sur un graphique, la taille moyenne des dents des populations successives d'une lignée spécifique, en fonction des bioâges des gisements d'où proviennent ces populations, les points se répartissent de part et d'autre d'une droite moyenne, dont on calcule les caractéristiques par régression linéaire (voir la figure 5). Cette droite représente la relation linéaire qui relie la taille des dents et le temps écoulé.

Si l'on considère que la droite représente une relation vraie, et que les écarts des points ne sont dus qu'à l'incertitude sur les bioâges, alors on peut replacer chaque point sur la droite, par translation en suivant l'axe temporel, et l'on obtient pour chaque gisement un nouvel âge, plus proche de l'âge véritable. On calcule ensuite la moyenne des âges obtenus pour toutes les dents de la lignée spécifique, et pour toutes les lignées spécifiques présentes. On calcule bien entendu simultanément l'intervalle d'incertitude associé à l'âge, qui est d'autant plus étroit que le nombre de lignées et le nombre de dents pour chaque lignée sont grands.

Nous avons vérifié que les âges numériques ainsi obtenus sont compatibles avec les dates fournies indépendamment par une méthode physique, la magnétostratigraphie. Le champ magnétique terrestre s'est inversé à de nombreuses reprises au cours de l'histoire de la Terre : son enregistrement dans les sédiments, lorsqu'ils se déposent dans des conditions calmes, définit une échelle de temps magnétostratigraphique valable sur tout le Globe. La datation de diverses roches a permis l'attribution d'un âge à chaque inversion du champ magnétique.

En 1993, François Lévêque, aujourd'hui au CEREGE, a montré que les sédiments des remplissages du Quercy ont enregistré le paléochamp magnétique terrestre. Les dates obtenues de cette façon pour les cavités étudiées concordent avec celles que nous avons calculées à partir des tailles des dents. Par exemple, la faune de la cavité du Bretou place celle-ci près du seizième niveau repère de l'échelle biochronologique, à la fin de l'Éocène moyen.

Dans l'échelle magnétostratigraphique, Le Bretou est daté de 38,426 à 38,113 millions d'années, tandis que le calcul fondé sur la taille des dents indique 38,05 millions d'années, plus ou moins 0,116 million d'années (moyenne de 116 valeurs données par 28 espèces de mammifères marsupiaux, insectivores, rongeurs, primates, créodontes (groupe de carnassiers primitifs) et ongulés).

De même, le remplissage de la cavité du Garouillas, qui a été choisie comme vingt-cinquième niveau repère (transition entre l'Oligocène inférieur et supérieur, il y a 28 millions d'années), est de 28,365 à 28,066 millions d'années sur l'échelle magnétostratigraphique et de 28,25 millions d'années plus ou moins 0,171 par le calcul de régression linéaire (moyenne de 141 valeurs pour 33 espèces de mammifères marsupiaux, insectivores, rongeurs, créodontes et ongulés).

De la faune au climat

La connaissance de la faune et sa comparaison avec les groupes actuels, par exemple pour les oiseaux (voir l'encadré page 65) donnent une idée de l'environnement et de ses changements pendant le Tertiaire : à l'Éocène, le Quercy est couvert de forêts, ouvertes par des espaces de savane. On y trouve des échassiers, dont les équivalents actuels vivent soit dans les pampas, soit dans les forêts clairsemées d'Amérique du Sud, ainsi que des formes forestières. Ce paysage s'ouvre progressivement, surtout à l'Oligocène supérieur, où il se transforme en savane arborée : les échassiers et les oiseaux forestiers sont toujours présents, mais ces derniers sont moins abondants à partir de l'Oligocène inférieur. Cette ouverture du paysage s'accompagne d'un assèchement : les formes qui préfèrent les milieux aquatiques, toujours rares, ne sont présentes qu'à l'Éocène, tandis que les formes qui vivent dans les steppes ou les savanes, ou dans les milieux semi-désertiques, apparaissent seulement à l'Oligocène supérieur.

Ce type de reconstitution du climat et de l'environnement végétal, à partir des caractéristiques morphologiques des espèces présentes, reste qualitatif. Pourrions-nous obtenir des informations plus précises ? Dans ce but, et en nous fondant sur la représentativité des restes de mammifères retrouvés dans les cavités du Quercy, nous avons mis au point une méthode

quantitative d'analyse des faunes, fondée sur la taille des animaux, nous inspirant d'une idée émise en 1964 par l'écologiste espagnol J. A. Valverde.

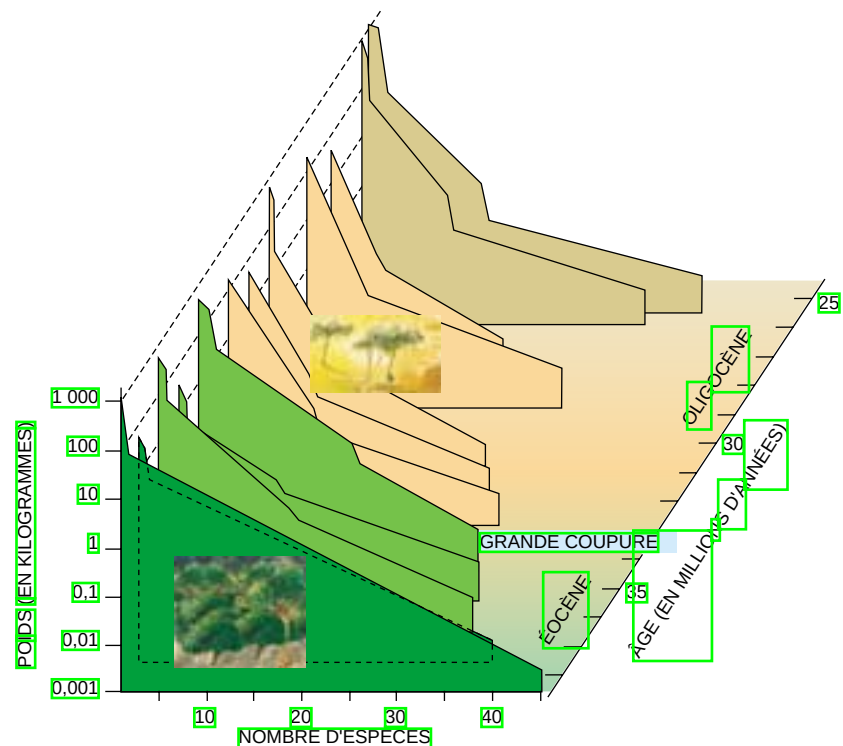
Notre analyse détaillée de nombreuses communautés actuelles de mammifères, sur différents continents et dans différents environnements tropicaux et subtropicaux, a démontré que, dans un ensemble biologique homogène, la distribution du poids moyen des espèces de mammifères est indépendante de la nature de ces espèces : elle est liée à des paramètres de l'environnement, tels les régimes de températures ou de précipitations, et le type de paysage. La taille détermine de nombreuses caractéristiques biologiques et écologiques des mammifères : les durées de vie et de gestation, les dimensions des territoires et les densités des peuplements, les relations de compétition et de prédation.

Les espèces de 0,5 à 10 kilogrammes sont rares lorsque le milieu est ouvert, de type savane ou désert, mais elles sont abondantes lorsque le milieu est fermé, de type forestier dense. Les espèces de

plus de dix kilogrammes sont abondantes lorsque le milieu est humide, alors qu'elles sont rares en milieu aride. Une baisse de température s'accompagne d'une diminution du nombre des espèces, en particulier pour celle de poids inférieur à 0,5 kilogramme.

On quantifie la structure pondérale d'une faune en construisant un diagramme nommé *cénogramme* (« graphique d'une communauté », en grec) (voir la figure 6) : on porte en ordonnée le logarithme du poids moyen des espèces, que l'on classe en abscisse par ordre de poids décroissant. Le profil ainsi défini, schématisé par des droites, est caractéristique de la communauté de mammifères étudiée : sur un intervalle pondéral donné, plus la pente est faible, plus il y a d'espèces ; la longueur de l'abscisse correspond au nombre total d'espèces dans la communauté.

Nous avons construit des *cénogrammes* pour les cavités les plus riches, qui couvrent près de 15 millions d'années entre la fin de l'Éocène et l'Oligocène supérieur (il y a 40 à 25 millions d'années). Chacune est représentative



6. LES CÉNOGRAMMES de plusieurs faunes de mammifères fossiles du Quercy représentent le poids moyen des espèces en fonction de leur nombre. Ils révèlent les variations climatiques et environnementales. Les faunes de l'Éocène, les plus anciennes (en vert) correspondent à des milieux forestiers et humides : il y a beaucoup d'espèces différentes, et dans toutes les catégories de taille. Après la Grande Coupure, qui marque la transition entre l'Éocène et l'Oligocène il y a environ 34 millions d'années et qui correspond au rattachement de l'Europe à l'Asie, le milieu ressemble plutôt à une savane aride (en beige) : en particulier, les grosses espèces sont moins nombreuses. Il y a 26 millions d'années (en beige), le milieu, toujours ouvert, redevient plus humide et plus chaud : le nombre total d'espèces réaugmente.

de la faune sur une période de temps assez courte. Nous avons mis en évidence un changement important de structure des communautés à la transition entre l'Éocène et l'Oligocène, il y a environ 34 millions d'années. Ce changement reflète la crise climatique qui se produit à l'échelle du globe au tout début de l'Oligocène : dans le Quercy, le climat se refroidit et s'aridifie, et la forêt recule.

Les faunes anciennes de l'Éocène supérieur, avec de nombreuses espèces de moyenne et de grande taille, correspondent à des milieux forestiers et humides proches des forêts tropicales actuelles d'Afrique. Un léger décrochement observé dans la distribution des espèces vers 0,5 kilogramme témoignerait de la présence de zones ouvertes dans ces forêts. À partir du début de l'Oligocène, les espèces de grande taille sont moins nombreuses et les espèces de taille intermédiaire deviennent rares : les milieux sont plus arides et plus ouverts, et les paysages ressemblent aux savanes plus ou moins arborées de l'Est africain actuel. La réduction du nombre des espèces marque aussi un refroidissement, ou tout au moins une saisonnalité des températures, avec un hiver plus froid. Cette saisonnalité thermique, qui se superpose à une saisonnalité des pluies, laisse penser que, dès le début de l'Oligocène, le climat préfigurerait le climat méditerranéen actuel.

Cette détérioration climatique correspond à un événement paléogéographique important : l'Europe, jusqu'alors isolée vers l'Est par des bras

de mer, est mise en connexion avec l'Asie. Une vague d'immigration, connue sous le nom de Grande Coupure, se produit alors, bouleversant les faunes d'Europe occidentale. L'arrivée en Europe de nombreuses familles nouvelles est favorisée par le changement de milieu qui y est survenu.

Un laboratoire de l'Évolution

En 1977, lors du premier colloque de paléontologie consacré aux gisements des phosphorites du Quercy, la région a été qualifiée de «laboratoire naturel de l'Évolution». Cette appellation n'était pas usurpée : non seulement le Quercy est un exceptionnel observatoire de l'Évolution, mais il permet aussi de tester et de mettre au point de nouvelles méthodes d'analyse en paléontologie.

Les prospections continuent, et le temps est notre allié : dans les prochains siècles, l'érosion continuera de découvrir de nouvelles poches argileuses contenant de nouveaux fossiles. Des zones aujourd'hui boisées en cachent aussi de nombreuses. Les plus récentes découvertes ont étendu l'intervalle de temps connu par ces dépôts du Quercy sur une durée continue de près de 35 millions d'années, de l'Éocène inférieur (il y a 55 millions d'années) au Miocène inférieur (il y a 20 millions d'années), et de nouveaux gisements datés du Pliocène (entre 5 et 2 millions d'années) ont été identifiés. Dans le futur, on pourra suivre l'évolution de la faune du Quercy, donc de l'Europe de l'Ouest, sur toute la durée de l'ère tertiaire.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSSES SÛRES

DIDIER NORDON

Des cailloux dans les choses sûres



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 70 F
Code 1897

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 104

Cécile MOURER-CHAUVIRE, Serge LEGENDRE et Bernard SIGÉ sont chercheurs au Laboratoire de paléontologie de l'Université Claude Bernard et du CNRS, à Lyon. Bernard MARANDAT est chercheur à l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier.

Nous remercions toutes les personnes qui ont participé aux fouilles ou qui les ont rendu possibles. La liste complète figure sur le site Web de *Pour la Science* (<http://www.pourlascience.com>).

International symposium on mammalian biostratigraphy and paleoecology of the European Paleogene, February 18th-21st 1987, édité par N. Schmidt-Kittler, Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen (A), vol. 10, pp. 1-311, Mainz, 1987.

S. LEGENDRE, *Les communautés de mam-*

mières du Paléogène (Éocène supérieur et Oligocène) d'Europe occidentale : structures, milieux et évolution, Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen (A), vol. 16, pp. 1-110, 1989.

B. SIMON-COINÇON et J.-G. ASTRUC, *Les pièges karstiques en Quercy : rôle et signification dans l'évolution des paysages*, Bulletin de la Société géologique de France, vol. 162, n°3, pp. 595-605, 1991.

S. LEGENDRE et al., *Les Phosphorites du Quercy : 30 ans de recherche. Bilan et perspectives*, *Geobios*, mémoire spécial 20, pp. 331-345, 1997.

Tableaux de corrélations et synthèses, in *Actes du Congrès BiochroM'97*, édité par J.-P. Aguilar, S. Legendre et J. Michaux, Mémoires et Travaux de l'EPHE, Institut de Montpellier, vol. 21 pp. 769-805, 1997.



Les briques de la vie

MAX BERNSTEIN • SCOTT SANDFORD • LOUIS ALLAMANDOLA

Les premiers organismes vivants terrestres semblent s'être formés à partir de molécules organiques qui se sont elles-mêmes assemblées dans le cœur glacé des nuages interstellaires.

Les comètes ont longtemps semblé de mauvais augure. En 400 avant notre ère, les astronomes chinois en avaient déjà recensé 29 sortes, dont beaucoup annonçaient des catastrophes. L'idée d'Aristote, selon laquelle les comètes étaient un avertissement des dieux, subsista pendant deux millénaires dans la civilisation occidentale. Cependant, cette crainte n'est pas complètement infondée : l'écrasement d'une météorite géante sur la Terre a probablement fait disparaître les dinosaures, et, en 1994, les astronomes ont assisté à la chute de la comète Shoemaker-Levy sur Jupiter.

Malgré leur funeste réputation, ces vastes débris spatiaux pourraient avoir apporté la vie sur une Terre jadis stérile : depuis le début des années 1960, des scientifiques de diverses disciplines étudient comment les comètes et d'autres vestiges de la formation du Système solaire auraient pu apporter des molécules de gaz et de l'eau sur notre planète, et comment ces composants ont constitué l'atmosphère et les océans qui rendirent la planète habitable. Des «astrochimistes» pensent aujourd'hui que des matières premières nécessaires à la vie proviennent aussi de l'espace. Certaines de ces molécules organiques (des molécules contenant des atomes de carbone) auraient spontanément formé des vésicules, où se seraient effectués les premiers mécanismes cellulaires. D'autres molécules auraient absorbé une partie du rayonnement solaire ultraviolet, protégeant les molécules moins résistantes et transformant la lumière en énergie chimique, utilisable par les premières cellules.

L'origine des origines

Il y a près de cinq milliards d'années, un nuage interstellaire, froid et sombre, s'est condensé en un disque de gaz et de poussières en rotation, qui a engendré le Système solaire. La Terre, elle, s'est constituée peu après le Soleil,

1. DES MOLECULES ORGANIQUES analogues à celles que l'on trouve dans les organismes vivants abondent dans les régions sombres des nuages interstellaires. Il y a plus de quatre milliards d'années, un tel nuage s'est effondré en un disque en rotation qui engendra le Soleil et les planètes. Quelques-unes des molécules fragiles ont échappé à la chaleur écrasante de la formation du Système solaire, à l'abri dans les comètes, au bord gelé du disque. Par la suite, les comètes et d'autres restes de nuages ont apporté ces molécules sur la Terre.

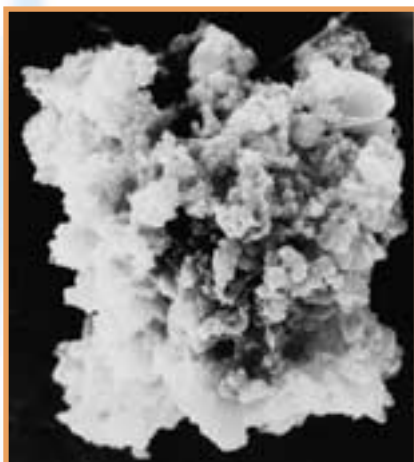


ASTEROIDES

COMETE

POUSSIÈRES

2. LES COMETES ET LES ASTEROIDES s'écrasaient fréquemment sur la Terre quand celle-ci s'est formée. Aujourd'hui encore, la Terre reçoit chaque jour des centaines de tonnes de poussières et de météorites venant de ces objets. Beaucoup de ces particules de poussière (microphotographie ci-dessous), la plupart d'une taille du millième de millimètre seulement, contiennent des molécules organiques fabriquées dans le nuage sombre qui a engendré le Système solaire. Les creux de la particule ci-dessous contenaient probablement de la glace, qui s'est évaporée quand la poussière s'est échappée de sa comète mère.



DONT: BRIDGES/AVANCE

PARTICULE DE POUSSIÈRE

MÉTÉORITE

il y a environ 4,5 milliards d'années. On a longtemps pensé qu'elle possédait très tôt l'eau et les ingrédients pour la vie, mais on soupçonne aujourd'hui qu'elle était, au contraire, chaude, sèche et stérile. Une myriade de débris spatiaux a bombardé notre jeune planète, créant des cataclysmes équivalents à l'explosion d'innombrables bombes atomiques. La Lune elle-même est peut-être un morceau de la Terre qui a été éjecté lors d'une collision avec une météorite de la taille de Mars. De tels impacts, courants jusqu'à il y a quatre milliards d'années, ont éradiqué tout balbutiement de vie qui aurait pu exister avant cette période.

Alors que l'étude des collisions météoritiques montre que la Terre est devenue habitable tardivement, on découvre que les premières traces de vie sont plus anciennes qu'on ne l'imaginait. Des microfossiles trouvés dans des roches anciennes d'Australie et d'Afrique du Sud montrent que la vie terrestre était présente il y a 3,5 milliards d'années. Mieux encore, on a découvert au Groenland des roches vieilles de 3,9 milliards d'années qui contiennent des formes de carbone (le noyau de l'atome contient six protons et un nombre variable de neutrons, qui définissent des isotopes) qui proviennent probablement d'organismes vivants. Ainsi, seulement 100 millions d'années environ après que la Terre est devenue habitable, les organismes vivants étaient suffisamment bien implantés pour que des traces de leur existence subsistent aujourd'hui. L'apparition de la vie sur la Terre fut si rapide que l'on suppose l'intervention de constituants extraterrestres.

Les premiers organismes unicellulaires de la planète résultent sans doute d'une série de réactions chimiques qui ont formé des molécules riches en carbone, tels les acides aminés. Dans

les conditions adéquates, les acides aminés se sont enchaînés, formant des

protéines, qui sont à la fois les briques et les ouvriers de la vie. Au début des années 1950, à l'Université de Chicago, Stanley Miller montra comment ces acides aminés auraient pu eux-mêmes se former, à partir de molécules plus simples. Il envoya des étincelles dans un ballon en verre rempli d'un mélange de gaz qui ressemblait à l'«atmosphère» primitive de la Terre. Puis, après quelques semaines, il analysa le contenu d'un second ballon relié au premier, initialement rempli d'eau : des molécules organiques, dont des acides aminés, étaient apparus.

Si le choix des réactifs retenus par S. Miller est aujourd'hui contesté, la théorie de la soupe primordiale, où les ingrédients de la vie sont engendrés dans un étang ou dans un océan tiède, à la surface de la Terre, conserve ses partisans. Plusieurs variantes ont été proposées. Par exemple, certains pensent que les réactions biogéniques ont plutôt eu lieu dans les fonds marins, où l'épais nuage de minéraux jaillissant de sources hydrothermales aurait engendré les précurseurs des molécules nécessaires à la vie. D'autres biologistes, de plus en plus nombreux, localisent plutôt la source de molécules dans l'espace.

L'idée était ancienne : en 1961, Juan Oro, de l'Université de Houston, émit l'hypothèse d'une contribution extraterrestre, et Sherwood Chang, du Centre Ames de la NASA, relança la théorie en 1979. Depuis 1990, à l'Institut de recherche de l'intelligence extraterrestre aux molécules organiques à l'origine de la vie (SETI, soit *Search for Extra-Terrestrial Intelligence*), Christopher Chyba, soutient que des petites comètes, des météorites et des particules de poussière interplanétaire ont apporté l'eau et les gaz atmosphériques à la Terre.

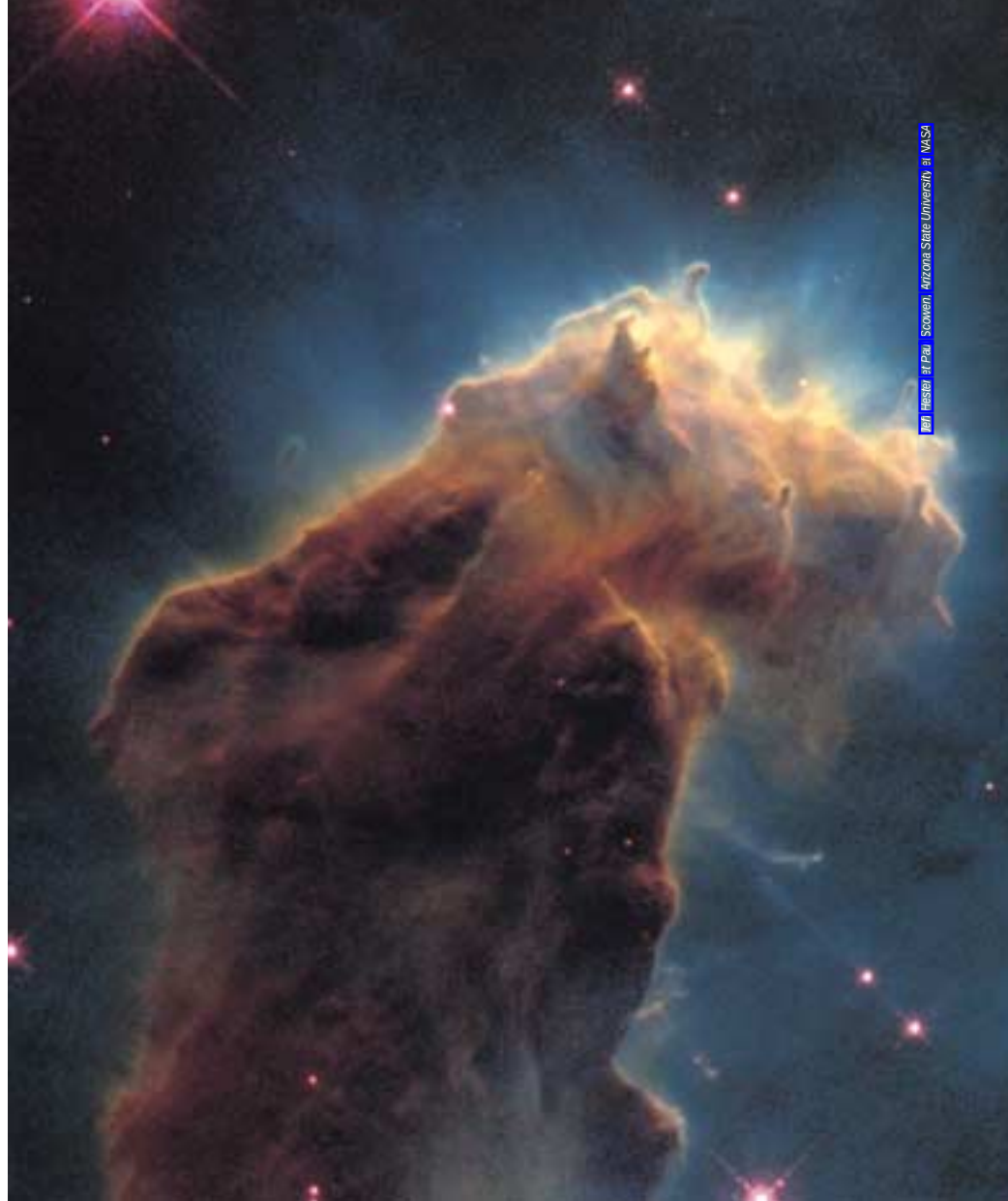
La constitution des océans reste débattue, mais les solides spatiaux y ont certainement contribué. On estime que des centaines de tonnes de poussières tombent chaque jour sur la Terre.

Ces particules minuscules – les plus grosses ont la taille d'un grain de sable – parsèment le Système solaire, formant des étoiles filantes quand elles pénètrent dans l'atmosphère. L'idée nouvelle est la suivante : non seulement ces solides auraient déposé sur la Terre l'eau et les gaz qui ont favorisé l'apparition de la vie, mais ils auraient apporté des molécules organiques analogues à celles que l'on voit aujourd'hui dans les systèmes vivants.

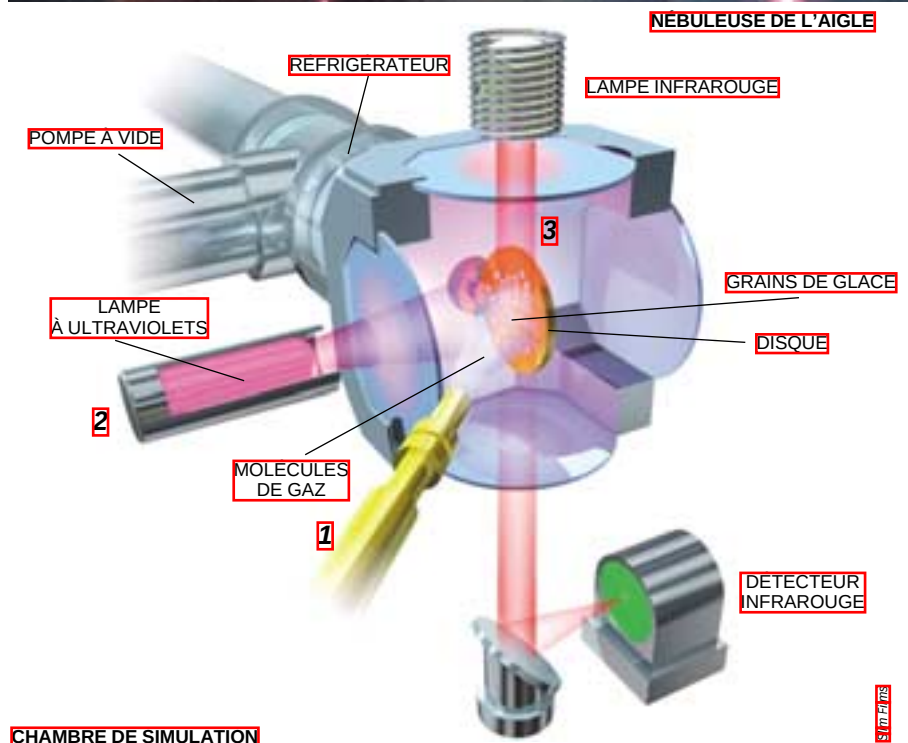
En effet, grâce à l'observation des comètes, on sait que ces visiteurs glacés abondent en composés organiques. En 1986, les caméras embarquées sur les sondes *Giotto* et *Véga* ont révélé que la surface de la comète de Halley comportait un matériau sombre qui ressemble au kérogène carboné de certaines météorites ; les spectromètres de masse ont décelé des traces de molécules riches en carbone. Plus récemment, l'observation depuis la Terre des chevelures et des queues des comètes Hyakutake et Hale-Bopp a révélé de nombreux composés organiques, tels le méthane et l'éthane. Plusieurs sondes spatiales exploreront d'autres comètes durant les 20 prochaines années (voir l'encadré de la page 75).

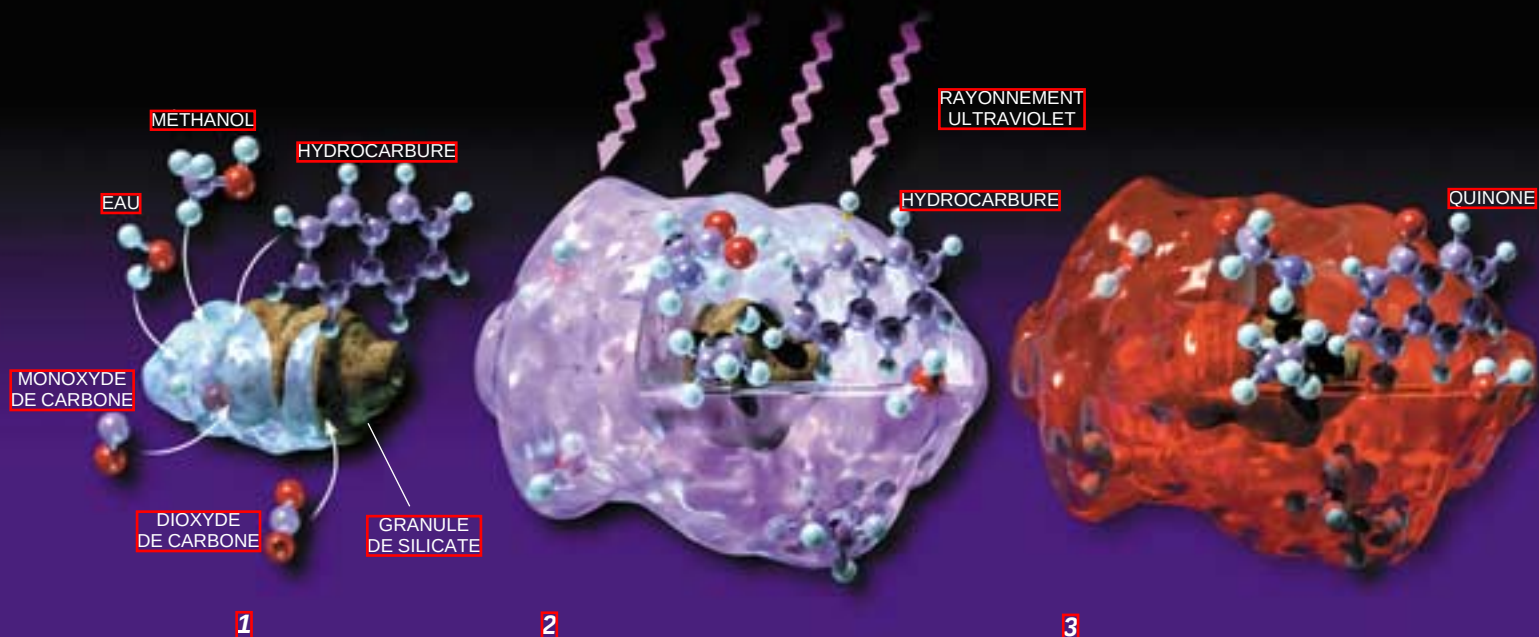
Lorsqu'une comète s'approche du Soleil, une part de sa matière est éjectée sous la forme de gaz et de poussières, dont une partie est ensuite attirée par la Terre. Des équipes de la NASA recueillent des particules cométaires dans la haute atmosphère, grâce à l'avion ER2, qui vole deux fois plus haut qu'un avion de ligne : à 20 kilomètres d'altitude, les poussières spatiales se collent à des plaques de plastique enduites d'huile, dans les collecteurs

3. ON REPRODUIT EN LABORATOIRE les conditions des régions froides des nuages interstellaires, telle la Nébuleuse de l'Aigle (en haut à droite). À l'intérieur d'une chambre métallique de la taille d'une boîte à chaussures (à droite), un réfrigérateur et une pompe engendrent un vide glacé analogue à celui de l'espace. Des molécules simples, libérées sous forme gazeuse par un injecteur en cuivre (1), gèlent sur un disque analogue au cœur de silicate d'un grain de glace spatial. Une lampe à ultraviolets éclaire la glace ainsi formée d'un rayonnement similaire à celui des étoiles (2). Une lumière infrarouge, également analogue à celle des étoiles, est ensuite projetée à travers la glace (3). La comparaison des spectres d'absorption infrarouge obtenus avec cette chambre et ceux obtenus par satellites révèle que la composition de la glace fabriquée en laboratoire est très similaire à celle de la glace des nuages interstellaires.



Bibi Hensler et Paul Scowen, Arizona State University et NASA





4. LA GLACE INTERSTELLAIRE commence à se former lorsque des molécules telles que l'eau, le méthanol et des hydrocarbures gèlent sur de microscopiques grains de silicate (des sortes de grains de sable) qui dérivent dans les nuages interstellaires denses (1). Alors que les grains de glace grossissent (jusqu'à un dix-millième de

millimètre), le rayonnement ultraviolet des étoiles proches casse quelques-unes des liaisons chimiques des composés gelés (2). Les molécules brisées se recombinent en structures, telles les quinones, qui ne se formeraient jamais si les fragments étaient libres de se disperser (3).

situées sous les ailes de l'avion. Avec ses collègues, l'un d'entre nous (S. Sandford) a analysé ces particules microscopiques et trouvé que certaines contenaient 50 pour cent de carbone : c'est plus que dans tout autre objet extraterrestre connu. Bien qu'en moyenne les poussières spatiales contiennent seulement dix pour cent de carbone, elles apportent quotidiennement 30 tonnes environ de substances organiques à la Terre.

Les gros astéroïdes qui s'écrasent sur la Terre sont mieux connus que les comètes et que les poussières interplanétaires. Constitués principalement de métal et de roche, certains contiennent également des molécules organiques, telles que des bases des acides nucléiques (les molécules constitutives de l'ADN), des cétones (molécules qui renferment le groupe C=O), des quinones (composés cycliques où deux atomes d'hydrogène sont remplacés par des atomes d'oxygène), des acides carboxyliques (contenant le groupe COOH), des amines (contenant le groupe NH₂) et des amides (contenant le groupe N(O)C). Parmi les composés organiques des météorites, 70 sortes d'acides aminés sont particulièrement importantes. Huit de ces acides aminés font partie du groupe des 20 acides aminés utilisés par les cellules vivantes pour fabriquer les protéines, mais ils ont une particularité qui se rapproche des acides aminés du règne vivant : leur chiralité.

Les acides aminés sont asymétriques et existent donc par paires, l'une étant l'image de l'autre dans un miroir. Comme nos mains, les acides aminés sont soit droits, soit gauches. Pour des raisons mal comprises et à de rares exceptions près, les acides aminés des organismes vivants sont gauches. Or, les expériences de S. Miller créent les deux formes en nombre égal. D'où l'intérêt de l'hypothèse extraterrestre : en 1993, John Cronin, de l'Université d'Arizona, a observé que la forme gauche de plusieurs acides aminés extraits de deux météorites était plus abondante que la forme droite. Pour certains, la chiralité gauche serait apparue sur Terre par hasard. Cependant, l'analyse des météorites carbonées indique que cette particularité moléculaire a pu être prédéterminée par une force physique extraterrestre.

Du point de vue biologique, les acides aminés sont peut-être les molécules organiques les plus importantes dans les météorites, mais ce ne sont pas les plus abondantes. La plupart des atomes de carbone des météorites sont dans des molécules de kérogène, un matériau composé en partie d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, tel le benzène. Les astrochimistes ont fait d'intéressantes découvertes dans la météorite martienne ALH84001. Ils y ont identifié des hydrocarbures identiques à ceux que l'on trouve dans la suie, dans la viande grillée ou dans

les gaz d'échappement automobiles (la météorite ALH84001 est celle où certains pensent avoir détecté des fossiles de micro-organismes martiens).

Glacière ou brasier?

D'où viennent les molécules organiques que les comètes, les météorites et les poussières apportent sur la Terre? Certains astronomes ont supposé que des réactions dans l'eau liquide diffusant à l'intérieur des comètes mères ou des corps parents des météorites sont en partie responsables de leur riche contenu organique (sous certaines conditions, l'eau liquide peut exister dans les comètes et dans les météorites). Toutefois, ces réactions ne pourraient engendrer la grande quantité de molécules organiques gelées des nuages interstellaires sombres.

Ces poussières gelées semblent plutôt être des vestiges de la formation du Système solaire : ce dernier est né de la condensation d'une nébuleuse, c'est-à-dire un disque de gaz et de poussières en rotation. Certains supposent que, lors de la naissance du Soleil et des planètes, ces glaces sont restées au bord du disque, à l'abri de l'effondrement. Dans ce réfrigérateur cosmique, la glace serait restée inaltérée durant des milliards d'années.

Pour d'autres, les molécules organiques extraterrestres sont nées à

l'intérieur de la nébuleuse : l'échauffement de la glace de la nébuleuse primitive aurait dissocié les molécules, qui se seraient réorganisées lors de la formation des planètes.

Dans cette hypothèse, les molécules chauffées dans la nébuleuse solaire, puis gelées à l'intérieur des comètes, devraient porter les signatures isotopiques propres aux planètes et aux autres objets du Système solaire interne (jusqu'à l'orbite d'Uranus). Or, les poussières cométaires sont, pour la plupart, enrichies en éléments tels que le deutérium (un isotope de l'hydrogène dont le noyau contient un proton et un neutron). L'enrichissement en deutérium est caractéristique des réactions chimiques dans l'espace interstellaire froid, loin de la fournaise de la nébuleuse solaire. Aux températures voisines du zéro absolu ($-273,15^{\circ}\text{C}$), peu de molécules d'isotopes lourds sont cassées, de sorte que ces molécules, tel le deutérium, s'accumulent avec le temps.

Lorsque deux hypothèses s'opposent ainsi, la vérité est souvent entre les deux. D'ailleurs les poussières spatiales contiennent à la fois des molécules qui ont été modifiées par une

chaleur intense et d'autres molécules non modifiées. Néanmoins, nombre d'observations effectuées dans les deux ans qui ont suivi l'étude des comètes Hale-Bopp et Hyakutake soutiennent l'hypothèse de l'héritage interstellaire des comètes. Ainsi, de nombreuses équipes ont constaté des similarités frappantes entre des molécules des comètes et celles des grains de glace interstellaires ; les enrichissements en deutérium étaient comparables. De surcroît, la mesure de l'état de spin des atomes d'hydrogène de la glace de la comète Hale-Bopp (qui révèle les transformations que la glace a subies) confirme que ces atomes n'ont jamais été à une température supérieure à 25 kelvins (-248°C).

Si la glace cométaire provient d'un nuage interstellaire, pourquoi n'en serait-il pas de même des molécules organiques ? Les astronomes voient la trace des composés organiques partout dans l'Univers, en particulier dans les nuages interstellaires. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont les molécules porteuses de carbone les plus abondantes de l'Univers : elles contiendraient au moins 20 pour cent du carbone galactique total.

Grâce aux observations astronomiques des nuages interstellaires, tel celui de la Nébuleuse de l'Aigle, on analyse la composition des particules microscopiques de poussière et de glace à des distances de plusieurs centaines d'années-lumière. Ces nuages sombres absorbent une partie du rayonnement infrarouge des étoiles proches. Lorsque le rayonnement non absorbé atteint la Terre, on sépare ses longueurs d'onde à l'aide d'un réseau (qui agit comme un prisme). On obtient un spectre indiquant quelles longueurs d'onde ont été absorbées par le nuage. Comme la lumière absente à ces longueurs d'onde correspond à des liaisons chimiques particulières, on déduit les caractéristiques chimiques du nuage absorbant.

Des nuages dans le laboratoire

En comparant les spectres infrarouges des nuages interstellaires avec des mesures en laboratoire effectuées sur des systèmes analogues aux glaces interstellaires, plusieurs équipes ont montré que les grains de glace dans les nuages sombres sont congelés sur

Matières premières ou vie réelle ?

L'idée de matériaux du vivant apportés sur Terre par les comètes et les météores est loin du concept de panspermie, selon lequel des organismes vivants dérivant dans l'espace auraient colonisé la planète. Au XVII^e siècle, après que le médecin italien Francesco Redi eut attaqué l'idée ancienne de génération spontanée, on a supposé que la vie ne pouvait provenir que de la vie. Suivant cette idée, le chimiste suédois Svante Arrhenius supposa en 1908 que le rayonnement des étoiles déplaçait des micro-organismes d'un monde à un autre.

Encore récemment, peu de scientifiques admettaient cette colonisation extraterrestre. En 1996, la découverte de structures minérales qui s'apparentent aux restes fossilisés de micro-organismes, sur la météorite martienne ALH84001, a ravivé la théorie de la panspermie, tandis que la même année, des scientifiques concluaient que les planètes internes avaient échangé des tonnes de débris, ces derniers milliards d'années. Peu de scientifiques pensent néanmoins que la vie soit jamais apparue sur Mars ou que des

organismes martiens aient survécu au voyage de 80 millions de kilomètres vers la Terre. Même si une bactérie résistait au choc la propulsant dans l'espace, le rayonnement ultraviolet et le vide extrêmement froid de l'espace, durant les millions d'années de périple, la détruiraient probablement (à moins que la bactérie ne reste à l'abri, au cœur de petites météorites).

Pourquoi supposer une colonisation martienne quand la vie a pu naître sur la Terre ? Si Mars bénéficiait de conditions propices par le passé, la vie y est peut-être apparue indépendamment ; après tout, les comètes et les météores qui ont ensemencé la Terre d'eau et de molécules organiques offraient le même service à tout le Système solaire.

En décembre 1999, une nouvelle sonde de la NASA ira chercher des signes de vie sur le sol martien. Toutefois, même si l'on trouve de la vie sur la planète rouge, on prouvera difficilement que ces organismes ont survécu au voyage jusqu'à la Terre et qu'ils s'y sont établis.



Paysage martien en 1997.

Dès 1972, Mayo Greenberg, du Laboratoire d'astrophysique de Leide, aux Pays-Bas, simule les réactions photochimiques à la surface des grains interstellaires dans les nuages diffus et dans les nuages moléculaires. En irradiant des glaces à basse température à l'aide d'une lampe à ultraviolet, puis en réchauffant le système, il obtient des molécules organiques complexes. Depuis, il a publié de nombreux articles sur le sujet et a proposé, notamment, un modèle de formation des grains interstellaires qui fait autorité.

Le scénario proposé dans l'article de M. Bernstein et de ses collègues fait largement appel à des molécules organiques extraterrestres apportées par des poussières cosmiques. Cette hypothèse a notre faveur depuis plusieurs années et, dans notre laboratoire d'Orléans, nous essayons de la vérifier en exposant des acides aminés aux conditions de l'espace à bord de satellites en orbite autour de la Terre. Cette hypothèse s'est trouvée confortée par les collectes de micrométéorites effectuées depuis une dizaine d'années en Antarctique par Michel Maurette, du Laboratoire de spectrométrie nucléaire et spectrométrie de masse, à Orsay. Grâce à ces collectes, on évalue à 20 000 tonnes la quantité de grains interplanétaires reçus tous les ans par la Terre. Ces micrométéorites sont apparentées aux météorites chondritiques carbonées, dont la météorite de Murchison est l'exemple type.

Une analyse détaillée des teneurs en carbone (en moyenne, deux pour cent de la masse totale) de différents groupes de micrométéorites permet d'estimer à 130 tonnes par an le flux total de carbone apporté à la Terre. Durant la phase active du bombardement terrestre (de -4,2 à -3,8 milliards d'années), quand le flux micrométéoritique était probablement 1 000 fois plus intense qu'aujourd'hui, la quantité livrée à la Terre est estimée à 5×10^{13} tonnes. À titre de comparaison, cette valeur représente 50 fois la valeur actuelle du carbone biologique recy-

clable à la surface de la Terre. Comme les météorites carbonées, les micrométéorites contiennent des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des acides aminés.

Par ailleurs, les micrométéorites se présentent comme des agrégats complexes. C'est ainsi qu'une simple micrométéorite de 0,1 millimètre est composée de millions de petits grains minéraux enchâssés dans la matière organique. Ces grains renferment une proportion importante de sulfures métalliques, d'oxydes et d'argiles qui sont autant de catalyseurs chimiques potentiels. Au contact de l'eau liquide, les grains ont donc pu fonctionner comme de minuscules réacteurs chimiques transformant la matière organique des grains à l'aide des catalyseurs présents.

L'apport de molécules extraterrestres est particulièrement important, car il généralise la possibilité de la vie à toute planète ayant de l'eau liquide à sa surface. C'est le cas de Mars. Les observations faites par les missions martiennes *Mariner 9*, *Viking 1* et *2*, *Mars Pathfinder* et *Mars Global Surveyor* indiquent clairement que, dans sa jeunesse, Mars a abrité de l'eau liquide à sa surface, de manière permanente. Or, la présence permanente d'eau suppose l'existence d'une atmosphère qui permet l'accumulation de molécules organiques micrométéoritiques, à l'instar de la Terre (sans atmosphère, les molécules rebondissent). L'une des priorités de l'exploration de Mars va donc consister à rechercher les molécules organiques, puis à en analyser la chiralité et la composition isotopique : d'une part, l'excès des molécules organiques biologiques avec une chiralité gauche constitue une bonne signature de la vie ; d'autre part, les molécules biologiques se distinguent de la matière purement minérale par un enrichissement en isotope 12 du carbone par rapport à l'isotope 13.

A. BRACK,
Centre de biophysique moléculaire,
Orléans

des cœurs de silicate ou de carbone. La glace, essentiellement composée d'eau, contient aussi jusqu'à dix pour cent de molécules simples, tels du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone, du méthane (CH_4), du méthanol (CH_3OH) et de l'ammoniac (NH_3).

Pour comprendre comment ces molécules interstellaires simples et abondantes réagissent dans la glace et engendrent les composés plus complexes que l'on observe dans les météorites, l'un de nous (L. Allamandola) décida de reproduire un nuage interstellaire en laboratoire.

Des cryostats et des pompes engendrent un vide froid à l'intérieur d'une chambre métallique d'environ 20 centimètres de côté. Au centre, un disque d'aluminium ou d'iodure de césium, gros comme une pièce de monnaie, joue le rôle d'un cœur de grain interstellaire. Des molécules, vaporisées dans la chambre, se condensent sur ce disque, qui grossit progressivement. Enfin une lampe émet à l'intérieur de la chambre un rayonnement ultraviolet analogue à celui des étoiles.

Même aux faibles températures et pressions, le rayonnement ultraviolet casse les liaisons chimiques, tout comme dans l'atmosphère terrestre, où ce rayonnement est connu pour ses effets néfastes (dans l'atmosphère terrestre, le rayonnement ultraviolet dissocie les liaisons chimiques, celles des chlorofluorocarbures notamment, et les atomes alors libérés détruisent les molécules d'ozone qui protègent notre planète).

Pris dans la glace interstellaire, les fragments moléculaires obtenus après cassure des molécules se recombinaient en structures complexes. Cette réaction serait impossible si ces fragments étaient libres de s'éloigner les uns des autres. Partout où l'on observe des grains de glace, des composés complexes se forment, notamment dans les régions intensément éclairées par des ultraviolets, comme autour des étoiles jeunes. Durant l'expérience de L. Allamandola, le grain de glace reçoit un rayonnement équivalent à ce qu'un grain interstellaire recevrait en plusieurs milliers d'années.

Dans une autre expérience, nous sommes partis d'une glace composée uniquement d'eau, de méthanol et d'ammoniac, dans les mêmes proportions que celles observées dans la glace extraterrestre et nous avons observé la formation de composés

complexes (cétones, nitriles, éthers et alcools), analogues à ceux qui ont été trouvés dans des météorites riches en carbone. Nous avons également fabriqué de l'hexaméthylentétramine ($C_6H_{12}N_4$), une molécule connue pour produire des acides aminés dans l'eau chaude et acide. Des molécules avec 15 liaisons entre atomes de carbone se sont même formées dans le mélange.

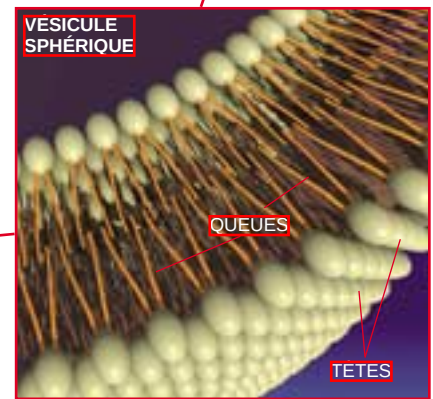
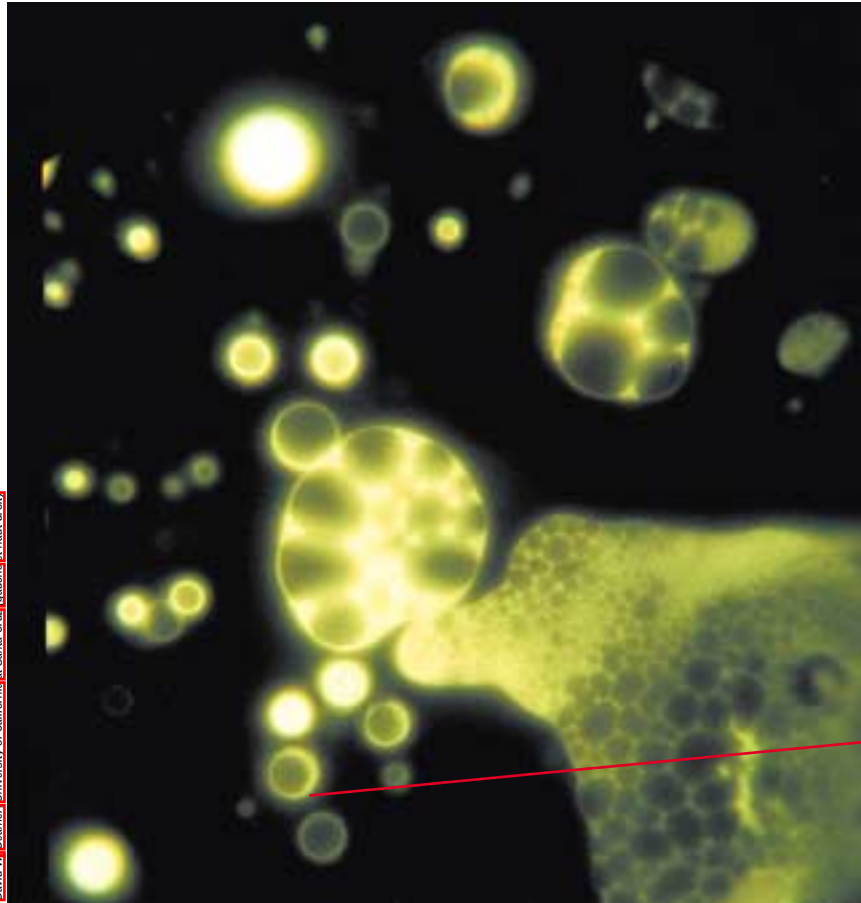
Certains de ces composés ont une propriété qui a peut-être joué un rôle dans l'apparition de la vie : lorsqu'ils

sont placés dans l'eau, ils s'assemblent spontanément en vésicules sphériques. Ces vésicules, analogues à des membranes de cellules, ressemblent étrangement à celles obtenues il y a dix ans à partir d'extraits de la météorite australienne de Murchison.

Quelles sont les conditions d'une telle auto-organisation? Les molécules, qui incluent en général une dizaine d'atomes de carbone, doivent être amphiphiles, c'est-à-dire qu'elles doivent posséder des têtes solubles dans

l'eau et des queues non solubles. Les têtes solubles sont exposées face à l'eau, tandis que les queues s'organisent à l'intérieur de la membrane. Dans certaines de ces vésicules, qu'elles proviennent de la météorite de Murchison ou de l'expérience en laboratoire, on a également observé de la fluorescence, signe que de la matière organique est piégée à l'intérieur.

Parmi les nombreuses molécules organiques créées, les plus intéressantes du point de vue biologique ont



5. LES MOLECULES AMPHIPHILES de l'espace ont peut-être abrité les précurseurs de la vie. Quand elles sont mélangées à l'eau, les chaînes hydrocarbonées avec des têtes polaires contenues dans les météorites (*en vert*) et des molécules similaires fabriquées en laboratoire dans les conditions du milieu interstellaire (*en bleu*)

s'organisent en vésicules sphériques. Les têtes hydrophiles des molécules se placent au contact de l'eau, à l'extérieur de la vésicule, tandis que leurs queues hydrophobes s'organisent à l'intérieur pour échapper à l'eau (*en bas à droite*). La fluorescence de ces sphères indique que des composés organiques sont piégés à l'intérieur.

Rendez-vous avec les comètes

Stardust

Le premier échantillon de comète de l'espace lointain

Une sonde traversera la chevelure gazeuse de la comète Wild 2 en 2004 et utilisera des gels poreux pour collecter des échantillons de poussières qui reviendront sur Terre en 2006.

Lancée le 7 février 1999 (NASA)

Space Technology 4/Chimpollion

Le premier atterrissage sur une comète

Un satellite sera placé en orbite autour de la comète Tempel 1 ; il enverra un petit véhicule qui atterrira sur le noyau rocheux de la comète en 2005. Le module d'atterrissage prendra des photographies et analysera des échantillons pris sous la surface.

Lancement prévu : 2003 (NASA)

Rosetta

L'étude approfondie d'une comète

Un satellite rejoindra la comète Wirtanen en 2013 et prendra des mesures pendant 11 mois, à partir de son orbite, tandis qu'un modèle d'atterrissage sondera la surface de la comète.

Lancement prévu: 2003
(Agence spatiale européenne)

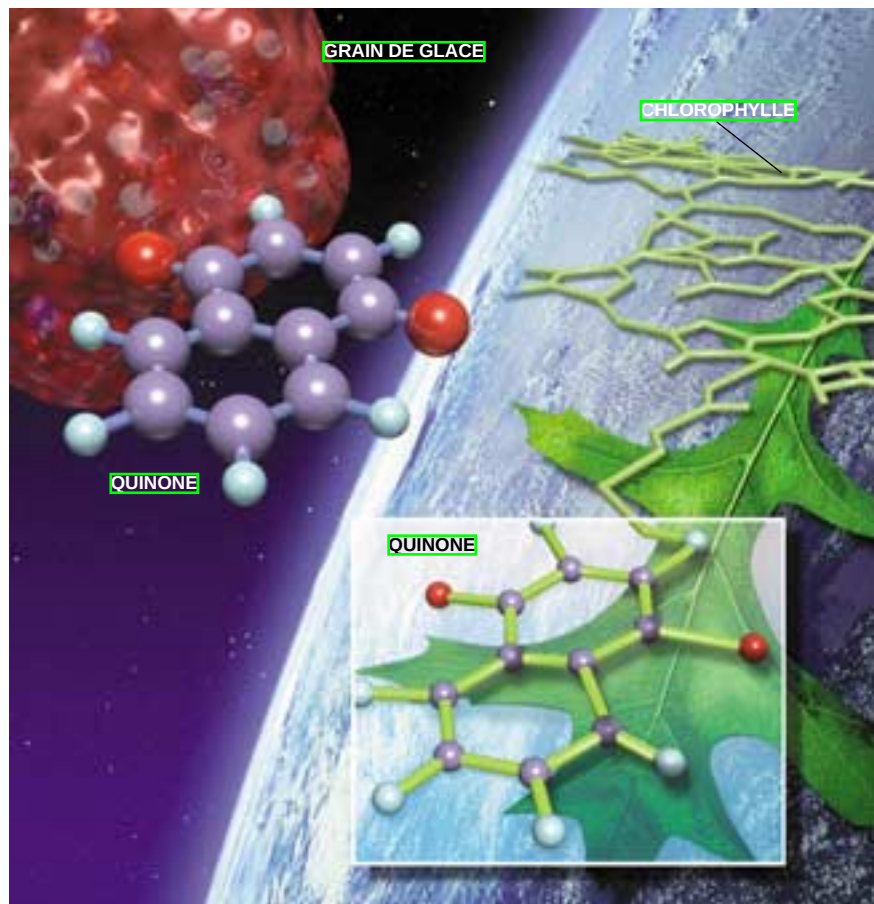
été obtenues à partir de glaces composées d'eau et des hydrocarbures aromatiques polycycliques qui sont abondants dans les nuages. Dans les conditions interstellaires, ces hydrocarbures des météorites riches en carbone se transforment en de nombreux composants, notamment en alcools, en éthers ou en quinones. Omniprésents dans les systèmes vivants contemporains, les quinones stabilisent les électrons libres, propriété nécessaire aux cellules vivantes pour diverses activités de transfert d'énergie.

Cette aptitude joue un rôle essentiel dans la conversion de la lumière en énergie chimique, dans la photosynthèse. En outre, les quinones absorbent le rayonnement ultraviolet, qui menace les molécules fragiles comme les acides aminés. Les quinones extraterrestres auraient-elles protégé la Terre des ultraviolets avant que la couche d'ozone protectrice ne se forme? Les premières formes de vie terrestre ont-elles utilisé ces molécules pour capter la lumière et la transformer en énergie à l'aide d'un mécanisme primitif de photosynthèse?

Des molécules à la vie

Les expériences en laboratoire et les observations astronomiques nous ont appris que les conditions apparemment stériles de l'espace engendrent des composés organiques complexes, qui sont acheminés ensuite jusqu'à la Terre par les météorites et par les poussières. Les acides aminés, les quinones, les molécules amphiphiles et d'autres composés organiques extraterrestres semblent avoir favorisé l'apparition de la vie. Les acides aminés extraterrestres ont peut-être composé les premières protéines, et les molécules amphiphiles ont peut-être abrité des quinones qui auraient contribué à la récupération de l'énergie lumineuse ; toutefois, le rôle exact de ces différents composés organiques reste à élucider.

On peut aussi supposer que les molécules organiques extraterrestres n'aient été que des réactifs, à partir desquels la vie s'est formée. On peut imaginer qu'une molécule « tombée du ciel » a amorcé ou accéléré une réaction chimique importante pour le fonctionnement d'une vie primitive. Si les molécules initiatrices de la vie ont bien été réunies dans une soupe primordiale, les acides aminés de l'espace ont pu fournir les quantités critiques pour



6. LES QUINONES DE L'ESPACE ont une structure presque identique à celle des molécules qui aident la chlorophylle à transporter l'énergie lumineuse dans les cellules de plante.

permettre ces réactions. De même, si les événements prébiotiques ont eu lieu dans les fonds marins, ils ont pu bénéficier de composés extraterrestres qui tombaient en pluie dans les océans. En augmentant le rendement des réactions chimiques, l'apport de composés organiques a pu conférer un avantage évolutif certain. À la longue, cet ensemble de réactions chimiques simples serait devenu profondément ancré dans ce qui est aujourd'hui un ensemble de réactions biochimiques régulées par une protéine.

L'écart est colossal entre les composés organiques les plus complexes de l'espace et les molécules de l'héré-

dité et du métabolisme actuels. Cependant, l'omniprésence de ces molécules organiques spatiales indique que, si elles ont contribué à la vie sur Terre, elles ont également contribué, et contribuent toujours, au développement de la vie ailleurs que sur la Terre.

Des traces de conditions propices à la vie sur Mars suggèrent que d'autres lieux du Système solaire ont pu bénéficier d'une contribution extraterrestre. L'ubiquité des molécules organiques complexes dans l'espace et l'existence de planètes autour d'autres étoiles incitent à penser que la vie est présente sur d'autres systèmes planétaires que le nôtre.

Max BERNSTEIN, Scott SANDFORD et Louis ALLAMANDOLA travaillent au Laboratoire d'astrochimie du Centre de recherche Ames de la NASA, en Californie.

F. RAULIN, F. RAULIN-CERCEAU et J. SCHNEIDER, *La bioastronomie*, collection «Que-sais-je?», PUF, 1997.

J. CRONIN, *Pasteur, Light and Life*, in

Physics World, vol. 11, n° 10, pp. 23-24, octobre 1998.

A. BRACK et F. RAULIN, *La vie dans le Système solaire*, in *Dossier Pour la Science*, «Les terres célestes», pp. 40-42, 1999.

M. P. BERNSTEIN et al., *UV Irradiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Ices : Production of Alcohols, Quinone And Ethers*, in *Science*, vol. 283, pp. 1135-1138, 19 février 1999.

Le spin des nucléons

KLAUS RITH • ANDREAS SCHAFER

Grâce à des accélérateurs de particules plus performants, les expériences sur la structure interne des protons et des neutrons ont fait progresser la description théorique de ces particules.

Quoi de plus commun que les protons et les neutrons? Ces composants des noyaux d'atomes, ou nucléons, constituent 99,9 pour cent de la matière qui nous entoure, nous y compris (le 0,1 pour cent restant est formé d'électrons). Ils sont parmi les premières particules subatomiques découvertes au XX^e siècle, mais 80 années d'études expérimentales et théoriques ne nous ont pas tout révélé sur leur nature et sur leurs propriétés. En particulier, dans les années 1980, est apparue la «crise du spin» : la théorie n'expliquait pas les résultats des expériences qui étudiaient l'origine du spin, ou moment cinétique intrinsèque, des nucléons.

Le modèle qui domine aujourd'hui la théorie des particules subatomiques est celui des quarks. Il a été proposé en 1963 par les physiciens américains Murray Gell-Mann et George Zweig, qui souhaitaient uniformiser la description de la myriade de particules qui avaient été découvertes dans les années 1950 et 1960, ainsi que celle des particules déjà connues, tels le proton et le neutron. Toutes sont constituées de trois particules fondamentales : les quarks *haut*, *bas* et *étrange*. Ainsi, un proton est constitué de deux quarks *haut* et d'un quark *bas* ; un neutron, d'un quark *haut* et de deux quarks *bas*. Beaucoup de propriétés des nucléons sont la simple combinaison des propriétés des quarks qui les constituent. Par exemple, comme la charge électrique d'un quark *haut* est égale à $2/3$ (celle de l'électron étant prise égale à 1) et que celle d'un quark *bas* est égale à $-1/3$, la charge électrique du proton est égale à 1, et celle du neutron est nulle.

De la même façon, le spin du proton semble être la somme des spins des trois quarks qui le composent et qui valent chacun $1/2$ (ou $-1/2$) : deux

des quarks auraient des spins opposés, dont la somme serait nulle, et le spin du dernier quark serait celui du nucléon. Toutefois, au milieu des années 1980, des expériences ont révélé que le spin des nucléons ne résultait pas de celui des trois quarks constitutifs! Des quarks «virtuels», qui se matérialisent et disparaissent très vite en permanence dans les nucléons, en particulier des quarks *étrange*, que l'on croyait cantonnés au domaine des particules exotiques à courte durée de vie et aux interactions à haute énergie, semblent déterminer le spin des nucléons ordinaires.

Les théoriciens ont aujourd'hui révisé les modèles pour expliquer ces caractéristiques. Pour l'instant, les expériences en cours avec des accélérateurs de particules européens et américains s'accordent entre elles et avec ces nouveaux modèles. Les informations qu'elles apporteront confirmeront-elles notre compréhension ou nécessiteront-elles des avancées théoriques plus profondes?

Des particules vraiment élémentaires

Lorsque le modèle des quarks fut présenté, de nombreux physiciens le considérèrent comme une astuce mathématique, un système de comptabilité pour décrire les interactions ; les quarks ne semblaient pas être des objets «réels» que l'on pourrait étudier. L'échec des premières tentatives d'observation de quarks isolés leur donnaient raison. Notamment, on avait sondé la structure du proton en bombardant de l'hydrogène liquide avec des électrons : comme le noyau de l'atome d'hydrogène ne contient qu'un proton, les électrons sont surtout déviés par des protons isolés. Ces expériences n'avaient pas

révélé de structure interne du proton, qui apparaissait comme une grosse goutte sphérique et «molle», chargée électriquement.

Toutefois, à la fin des années 1960, des physiciens de l'Institut de technologie du Massachusetts et du Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford (dont l'acronyme américain est SLAC) réalisèrent une expérience analogue avec un nouvel accélérateur, qui produisait des collisions à plus haute énergie. Ils observèrent que des électrons étaient déviés comme s'ils frappaient de minuscules points durs, électriquement chargés, au sein des protons. Ces expériences, bientôt confirmées, prouvèrent que les quarks étaient des objets réels.

Ils montrèrent aussi que les nucléons n'étaient pas constitués que de trois quarks, mais qu'ils abritaient un incessant ballet de particules évanescences et éphémères. Les trois principaux quarks constituant les nucléons, les quarks de valence, échangent incessamment des gluons, qui les lient en transportant l'interaction forte. En outre, des paires de quarks et d'antiquarks «virtuels», de très courte durée de vie, se matérialisent et disparaissent en permanence, apportant leur contribution aux propriétés du nucléon (voir la figure 1), y compris au spin : la somme des spins de tous les gluons et de toutes les paires de quarks et d'antiquarks virtuels n'est pas nulle.

Qu'est-ce exactement que le spin? On caractérise les rotations, soit intrinsèques (pour les corps qui tournent comme une toupie), soit orbitales (comme pour les planètes) par leur moment cinétique. La Terre, par exemple, a un moment cinétique orbital, qui caractérise sa course annuelle autour du Soleil, et un moment cinétique intrinsèque, qui caractérise sa

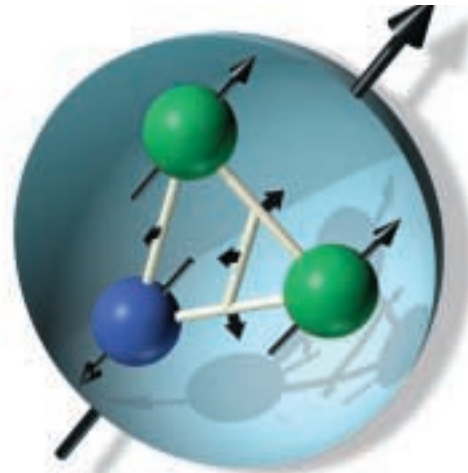
Quatre descriptions du proton



a. Vu de loin, le proton est une grosse goutte molle (*en gris*), d'environ deux milliardième de milliardième de mètre de diamètre, de charge électrique égale à un, et de moment cinétique, ou spin, égal à $1/2$ (représenté par la flèche). Le moment cinétique d'un objet en rotation est représenté par une flèche dirigée selon l'axe de rotation et qui pointe vers nous, si nous nous plaçons de façon à voir la rotation s'effectuer dans le sens des aiguilles d'une montre. Les particules quantiques ont un spin intrinsèque de valeur fixe, qui ne peut s'interpréter avec la notion classique de rotation.

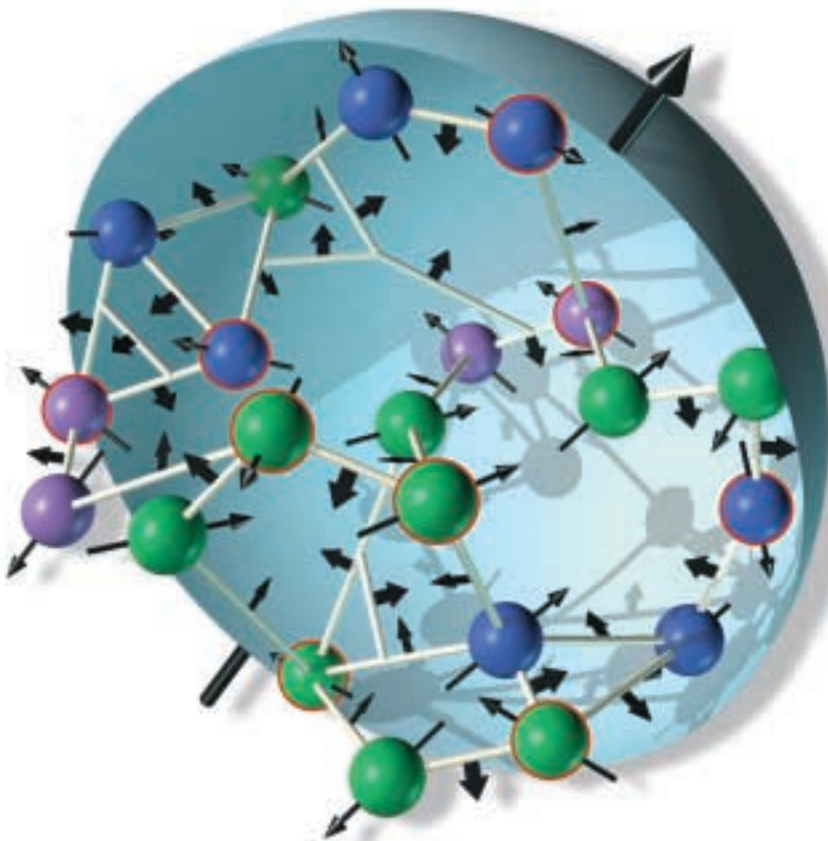


b. La théorie des quarks décrit le proton comme la somme de deux quarks *haut* (*en vert*) et d'un quark *bas* (*en bleu*), dont les charges et les spins respectifs s'additionnent pour donner les valeurs caractéristiques du proton. Chaque quark a un spin égal à $1/2$, mais le spin total est encore $1/2$ si deux des quarks ont des spins d'orientation contraire dont la somme s'annule.

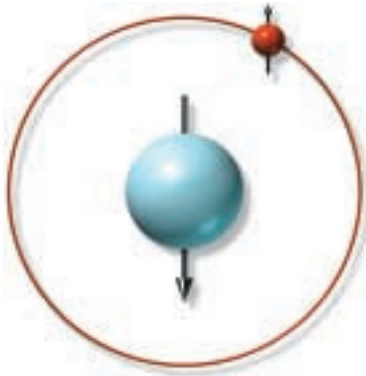


c. Les expériences de la fin des années 1960 ont donné des quarks l'image de particules ponctuelles à l'intérieur du proton, et la chromodynamique quantique décrit la force qui les lie comme une sorte d'élastique (*en blanc*). L'élastique est constitué de particules, les gluons, qui possèdent chacune un spin égal à un. Le mouvement des quarks et des gluons, au sein du proton, peut aussi engendrer du moment cinétique contribuant au spin du proton.

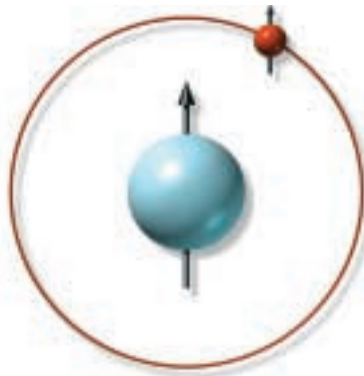
d. La description quantique complète, celle de la chromodynamique quantique, ajoute à la description précédente un ballet compliqué et instable de quarks et d'antiquarks (*contours rouges*) virtuels, y compris des quarks *étrange* (*en violet*) qui ne sont pas considérés comme des constituants de la matière ordinaire. Ce dessin n'est qu'une évocation des incertitudes quantiques et des fluctuations dynamiques. Les détails de la production du spin du proton à partir de ce ballet sont trop compliqués pour être calculés ; on les détecte lentement, par les expériences dans de grands accélérateurs de particules.



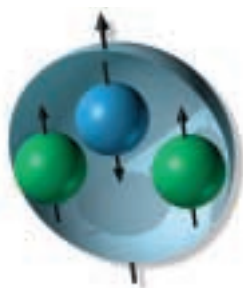
a ATOME D'HYDROGENE DE SPIN NUL
MASSE = 0,9 GEV



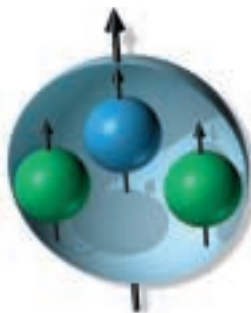
ATOME D'HYDROGENE DE SPIN UN
MASSE = 0,9 GEV + 6×10^{-15} GEV



b PROTON (SPIN 1/2)
MASSE = 0,9 GEV



PARTICULES Δ^+ (SPIN 3/2)
MASSE = 12 GEV



1. LA STRUCTURE DU SPIN a plus de conséquences sur les particules élémentaires que sur les atomes. Dans un atome d'hydrogène (a), l'alignement des spins du proton (en gris) et de l'électron (en rouge) fait passer le spin total de l'atome de zéro à un, mais il n'augmente la masse de l'atome que de quelques milliardièmes d'électronvolts. La particule Δ^+ et le proton (b) sont tous deux constitués de deux quarks *haut* et d'un quark *bas* ; ils ne diffèrent que par leur spin, mais le Δ^+ est 30 pour cent plus lourd que le proton.

rotation quotidienne autour de son axe. Le spin d'une particule élémentaire est le moment cinétique de rotation intrinsèque, mais il présente des propriétés quantiques particulières : c'est nécessairement un multiple entier ou demi-entier d'une quantité fondamentale, le moment de Planck $\hbar$. Les particules qui constituent la matière (électrons, protons, neutrons et quarks) ont un spin minimal égal à $\hbar/2$. On écrit que ces particules ont un spin de 1/2.

Le spin d'une particule composée n'est pas simplement la somme des valeurs des spins de ses constituants, car le moment cinétique est vectoriel : il a une intensité et une direction. Ainsi, le moment cinétique de la Terre est-il représenté par une flèche qui suit l'axe de la Terre en pointant vers le Nord. On sait calculer le spin de particules composées, tels des atomes entourés de dizaines d'électrons : les cours de mécanique quantique, en maîtrise de physique, sont farcis de tels calculs. Malheureusement,

personne ne sait le faire pour les quarks et les gluons qui constituent les protons et les neutrons.

Une interaction forte et complexe

La difficulté provient de la théorie qui décrit l'interaction forte : la chromodynamique quantique. On en connaît les équations depuis les années 1970, mais certaines de leurs caractéristiques compliquent leur utilisation. Aujourd'hui encore, même les techniques mathématiques les plus perfectionnées et les ordinateurs les plus puissants, travaillant en parallèle, ne permettent pas de résoudre exactement ces équations pour un nucléon.

L'interaction forte est assurée par un échange de gluons entre les quarks, tout comme la force électromagnétique provient d'un échange de photons entre des particules chargées. Toutefois, les gluons interagissent, contrairement aux photons qui sont électriquement neutres et qui ne sont pas eux-mêmes

soumis à la force électromagnétique. En outre, l'interaction forte est 100 fois plus intense que la force électromagnétique (d'où son nom) : en chromodynamique quantique, on ne peut pas négliger des phénomènes complexes que l'on néglige dans la théorie électromagnétique, et les équations qui en résultent n'ont pas de solutions simples.

Comme les gluons interagissent fortement, la chromodynamique quantique est une théorie «non linéaire» : une légère modification des conditions initiales peut être amplifiée et avoir des conséquences importantes. La dynamique non linéaire est au cœur de la théorie du chaos, que les physiciens et mathématiciens explorent depuis quelques années... non sans mal. De surcroît, la chromodynamique quantique est une théorie quantique des champs : des quarks et des gluons virtuels sont créés et annihilés en permanence ; chaque interaction avec les quarks réels est brève, mais leurs effets cumulés doivent être pris en compte. Enfin, le principe d'incertitude d'Heisenberg impose que les quarks, confinés à l'intérieur d'un proton ou d'un neutron minuscule, soient en mouvement à une vitesse proche de celle de la lumière.

Le spin a de grandes conséquences sur le comportement des particules. Ainsi, si le spin des électrons était différent de 1/2, leur disposition autour du noyau atomique serait radicalement transformée : la classification périodique des éléments et toute la chimie seraient méconnaissables. Toutefois, le spin est encore plus important en chromodynamique quantique qu'en physique atomique. Ainsi, un atome d'hydrogène peut avoir un spin total égal à zéro ou à un, selon que les spins de son proton et de l'électron gravitant autour de lui sont parallèles ou opposés (voir la figure 2) : la différence d'énergie entre ces deux situations est faible. En revanche, la particule Δ^+ , formée des trois mêmes quarks qu'un proton, mais de spin 3/2 plutôt que 1/2, est 30 pour cent plus massive qu'un proton : l'alignement des spins nécessite de l'énergie.

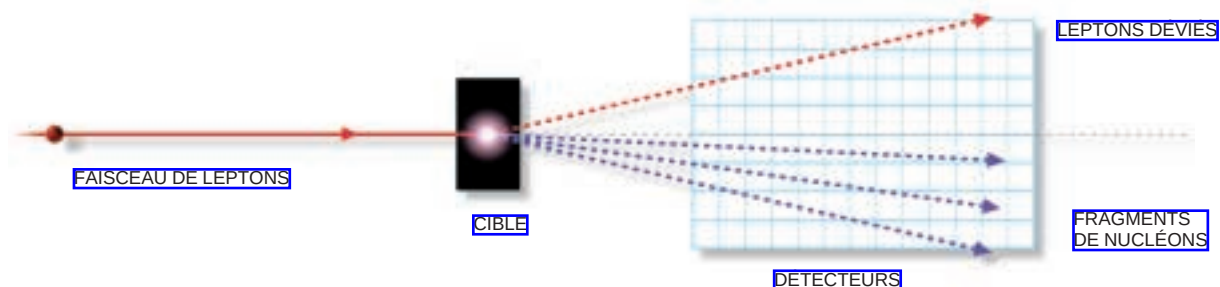
Un coup d'accélérateur

Afin d'étudier la structure des nucléons, les expérimentateurs bombardent une cible de nucléons avec des faisceaux de particules énergétiques,

Mise en évidence de la structure du spin d'un électron

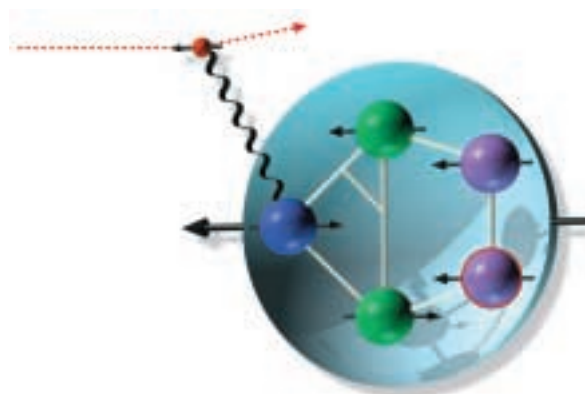
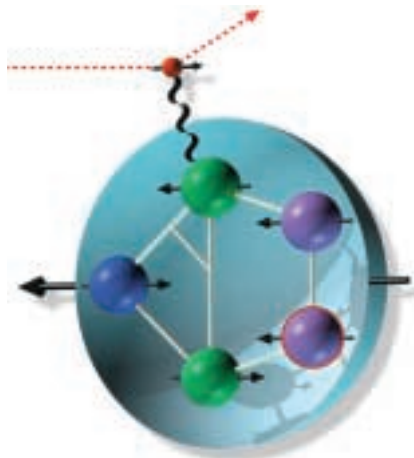
Un accélérateur projette un faisceau d'électrons ou de muons (des leptons, c'est-à-dire des particules ponctuelles qui ne sont pas soumises à l'interaction forte) polarisés sur une cible de nucléons polarisés. Des détecteurs mesurent les déviations et les pertes

d'énergie des leptons, ce qui renseigne sur la polarisation du spin des quarks dans les nucléons. Des expériences récentes analysent aussi les débris des nucléons, afin de déterminer, pour chaque déviation, le type de quark à l'origine de celle-ci.



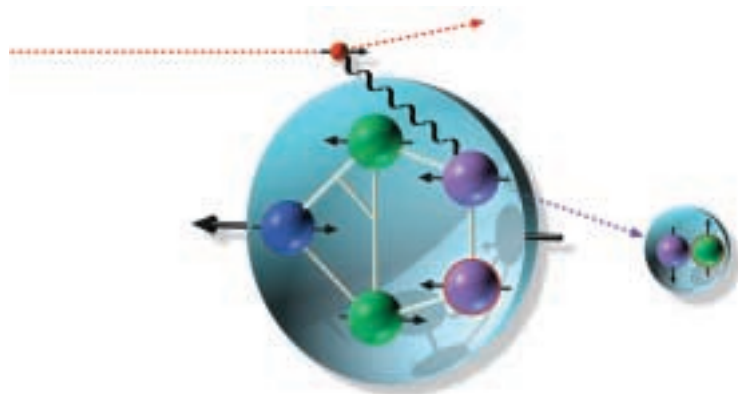
Un lepton est dévié quand il échange un photon avec l'un des quarks du nucléon. Les leptons qui ont un spin parallèle à l'axe du faisceau interagissent surtout avec des quarks dont le spin est de sens opposé (à gauche). Quand la polarisation du faisceau

(ou la polarisation des nucléons) est inversée (en bas, à droite), les leptons interagissent avec des quarks différents, ce qui change la déviation. La différence révèle l'asymétrie des spins des quarks dans le nucléon.



Parfois un kaon négatif (un quark étrange et un antiquark haut) est éjecté du nucléon, parce que le photon, échangé entre le lepton et le nucléon, a interagi avec un constituant de ce dernier. En comptant les déviations de leptons correspondant à de telles éjections, les physiciens déter-

minent la polarisation des quarks dans les nucléons. Dans l'expérience HERMES (photographie), le faisceau d'électrons circule dans le tuyau gris vers l'aimant du spectromètre (en bleu). La cible et de petits détecteurs sont installés devant l'aimant ; les principaux détecteurs sont derrière.



La contribution des gluons

Comment mesurer la contribution des gluons au spin du nucléon ? Pas avec les leptons (électrons ou muons), car ceux-ci n'interagissent qu'avec les particules chargées ; or les gluons, vecteurs de l'interaction forte, sont électriquement neutres. Deux démarches complémentaires sont suivies par les physiciens.

Les physiciens de l'expérience COMPASS, au CERN, contournent la difficulté en examinant les collisions de muons avec des quarks charmés. Ces derniers ne font pas partie de la matière ordinaire ; plus lourds que les quarks étranges, ils apparaissent et disparaissent presque instantanément dans le proton, sous la forme de paires de quark et d'antiquark charmés. La probabilité qu'un muon interagisse avec un quark charmé est faible, mais elle n'est pas nulle. Comme on sait aussi calculer la probabilité qu'un gluon se matérialise en une paire de quark et d'antiquark charmés, on peut remonter du nombre de muons ayant diffusé sur des quarks charmés au nombre de gluons dans le nucléon. Si, en outre, les muons et les nucléons sont polarisés, la variation du nombre de muons diffusés sur des quarks charmés en fonction de l'orientation des spins donnera accès à la polarisation des gluons. Les premiers résultats sont attendus vers 2002...

Une autre méthode, indirecte, mais plus rapide pour le calcul de la contribution des gluons au spin du nucléon, utilise les résultats des expériences de diffusion des leptons déjà réalisées. Ces expériences mesurent les déviations et les pertes d'énergie des leptons pour différentes orientations de leur spin et de celui des nucléons cibles, proton ou neutron. À l'intérieur du proton, les gluons se matérialisent en permanence en paires de quark et d'antiquark, qui se recombinent ensuite et reforment des gluons. La densité de quarks et d'antiquarks dépend donc de la densité de gluons dans le proton. La polarisation du gluon est transférée au quark et à l'antiquark créés par la matérialisation de ce gluon. Cette corrélation entre la polarisation des gluons et celle des quarks est décrite mathématiquement dans les «équations d'évolution» de la chromodynamique quantique dans le nucléon, établies indépendamment par deux physiciens italiens, G. Altarelli et G. Parisi, et trois physiciens russes, Y. L. Dokshitzer, V. N. Gribov et L. N. Lipatov.

Comme les collisions des leptons et des quarks sont élastiques (l'énergie est conservée), les trois quantités, angle et énergie du lepton diffusé, et énergie du faisceau incident, permettent aussi de calculer l'impulsion du quark sur lequel le lepton a tapé dans le nucléon. On détermine la polarisation des quarks en fonction de leur impulsion à l'intérieur du nucléon, appelée fonction de structure polarisée, en faisant la différence des nombres de leptons entre les deux configurations où les spins du lepton et du nucléon sont parallèles ou antiparallèles.

L'ensemble formé de l'accélérateur de leptons et du détecteur est comparable à un énorme microscope.

Pour un angle de diffusion et une énergie de faisceau donnés, la mesure de l'énergie de chaque lepton diffusé permet le calcul du grossissement avec lequel le lepton «voit» le proton. Comme, dans un microscope, l'aspect des objets observés varie avec le grossissement, les caractéristiques observées pour le proton, en particulier la fonction de structure polarisée, varient avec le «grossissement» de l'ensemble formé par l'accélérateur et le détecteur. Les équations d'évolution de la chromodynamique quantique décrivent aussi comment les densités de quarks, d'antiquarks et de gluons dans le proton varient avec l'échelle à laquelle on sonde le proton : la mesure précise de cette variation permet donc de connaître la polarisation des gluons, c'est-à-dire leur contribution au spin total du nucléon.

Pour accéder à la polarisation des gluons par cette méthode, les expérimentateurs comparent les différences de comptage, entre les situations parallèle et antiparallèle, pour plusieurs expériences faites avec des énergies de faisceau différentes. Ces comparaisons requièrent des expériences d'une grande précision. Celles qui se sont déroulées au SLAC, à Stanford, de 1995 à 1997, collaboration d'instituts américains et japonais, et, pour la France, du CNRS et du CEA, apportent aujourd'hui les mesures les plus précises au monde des fonctions de structure polarisées du neutron et du proton.

Proton et neutron sont deux particules jumelles : elles ont exactement la même structure, à l'échange près des quarks *hauts* et *bas*. Ainsi, le proton a deux quarks de valence *haut* et un *bas*, d'où sa charge électrique de un, tandis que le neutron a deux quarks de valence *bas* et un *haut*, d'où sa charge électrique nulle. Mais proton et neutron ont la même densité de gluons.

Sur le plan expérimental, il est plus facile de polariser des protons que des neutrons : il suffit d'orienter les spins des noyaux d'hydrogène de molécules de butanol ou d'ammoniac réfrigérées à environ un kelvin dans un champ magnétique intense. Les électrons ou les muons sont ensuite envoyés sur cette cible pour ricocher sur les quarks des protons polarisés. Pour polariser les neutrons, la technique est de polariser des noyaux légers comme le deutérium, formé d'un proton et d'un neutron, l'hélium 3, formé de deux protons et d'un neutron ou le lithium 6, formé de trois protons et trois neutrons.

C'est l'étude comparée de l'ensemble des mesures mondiales, au SLAC, au CERN et à HERMES, des fonctions de structure polarisées sur le proton et le neutron qui a montré que la contribution des gluons au spin du nucléon est égale à un, plus ou moins un. Ce résultat indirect doit être vérifié et amélioré par l'expérience COMPASS du CERN, mais il est déjà une importante indication qu'il n'y a pas de «crise du spin» pour les gluons comme il y en a eu, il y a dix ans, pour les quarks.

Vincent BRETON
Laboratoire de physique corpusculaire
de Clermont-Ferrand

des électrons ou des muons (le muon est un cousin de l'électron, environ 200 fois plus massif et instable). Ces particules de la famille des leptons, ne sont pas soumises à l'interaction forte : les collisions obtenues ne sont régies que par les lois de l'interaction électromagnétique. En outre, les leptons semblent se comporter comme des particules parfaitement ponctuelles. Les équations de leurs interactions avec les nucléons en sont considérablement simplifiées et bien comprises : toutes les complications des calculs proviennent des caractéristique des nucléons, que l'on détermine ainsi.

Quand un électron ou un muon passe à proximité d'un nucléon de la cible, il est attiré ou repoussé par les charges électriques des constituants du nucléon. En termes de théorie quantique des champs, on dit que le lepton et le nucléon échangent un photon, ce qui transfère de l'énergie et dévie le lepton (voir l'encadré de la page 85). En mesurant soigneusement la déviation des leptons et les pertes d'énergie lors des collisions, on obtient une image de la répartition des particules chargées, les quarks, au sein du nucléon.

L'accélérateur de leptons et le détecteur qui les piège, derrière la cible, constituent une sorte de microscope géant. On «grossit l'image» en augmentant la quantité de mouvement du photon échangé. On doit donner à un lepton une énergie d'environ 100 gigaélectronvolts pour déceler des détails de l'ordre de quelques pour cent de la taille du nucléon (le gigaélectronvolt est l'unité d'énergie habituellement utilisée en chromodynamique quantique ; elle est environ égale à la masse d'un proton ou d'un neutron au repos).

Pour étudier la structure du spin des nucléons, on doit polariser (aligner dans une même direction) les spins des projectiles et de la cible. Quand un spin des leptons est aligné avec leur direction de propagation, les leptons échangent des photons surtout avec les quarks de spin opposé. Ainsi les déviations des leptons nous apprennent-elles comment les quarks ayant une orientation de spin donnée sont répartis à l'intérieur du nucléon. En particulier, des mesures faites pour deux polarisations opposées du faisceau révèlent l'asymétrie des spins des quarks de

valence, le déséquilibre entre les spins parallèles et antiparallèles.

Les premières expériences avec un faisceau polarisé ont été réalisées au SLAC à la fin des années 1970 : un faisceau d'électrons était projeté contre une cible de butanol solide. Les résultats, publiés au début des années 1980, confirmaient les prévisions : environ deux tiers du spin du proton devaient provenir de ses quarks de valence, le tiers restant venant du mouvement orbital de ces quarks à l'intérieur du proton. De plus, la contribution des quarks *étrange* était très faible. Cette valeur provenait toutefois d'une extrapolation aux hautes énergies des mesures réalisées avec un faisceau limité à 10 ou 20 gigaélectronvolts.

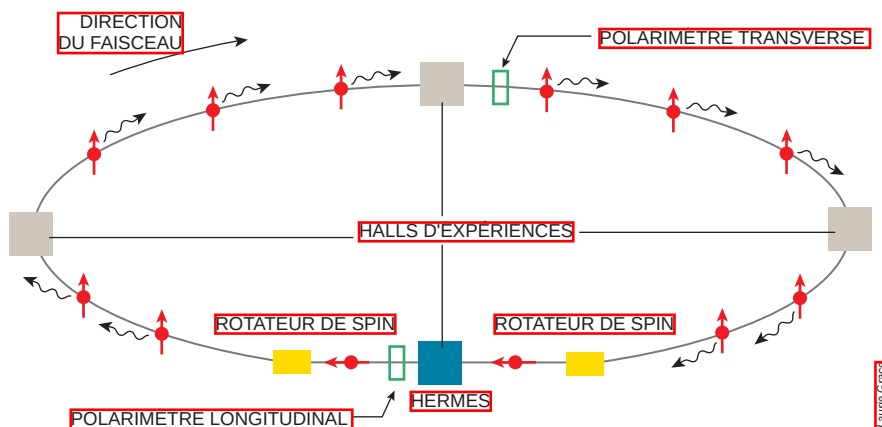
Au milieu des années 1980, des expériences à plus haute énergie furent menées au CERN, le Laboratoire européen de physique des particules, à Genève. Cette fois, un faisceau de muons de 200 gigaélectronvolts était envoyé sur une cible d'ammoniac solide. Les muons ont la particularité d'être naturellement polarisés lorsqu'ils sont créés dans les désintégrations des pions, ceux-ci étant les particules les plus légères formées de quarks. L'accélérateur créait d'abord un faisceau de pions très énergétiques, qui se désintégraient spontanément, en vol, en muons polarisés à 80 ou 90 pour cent. Comme l'intensité du faisceau de

muons ainsi obtenu était un million de fois inférieure à celle du faisceau d'électrons polarisés du SLAC, on a augmenté le nombre de muons interagissant avec des protons polarisés de la cible en employant des cibles plus grandes, de 72 centimètres de long.

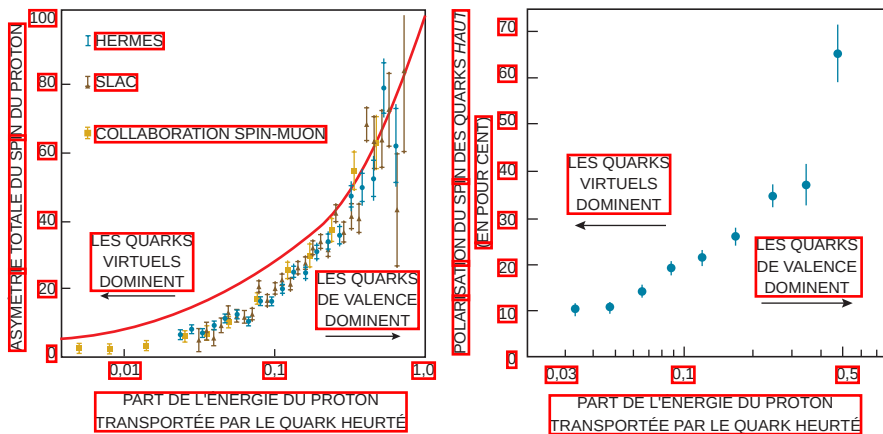
L'origine de la crise

Le groupe du CERN a ainsi découvert que le spin des quarks de valence n'apporte qu'un tiers du spin du proton. De plus, les quarks *étrange* virtuels, au sein des protons, semblaient fortement polarisés et, de façon inattendue, contribuaient fortement (et négativement) au spin total.

Quelques années plus tard, les mesures sont devenues plus précises grâce à une meilleure polarisation des faisceaux et des cibles. La Collaboration spin muon, au CERN, a utilisé une nouvelle cible, de 1,2 mètre de long (la plus longue jamais construite) contenant du deutérium (une forme d'hydrogène dont le noyau contient un proton et un neutron). De nouvelles expériences ont commencé aussi au SLAC, avec des cibles d'hydrogène, de deutérium et d'hélium 3. Le noyau de l'hélium 3 contient un neutron et deux protons de spins opposés, dont la somme s'annule : les expériences utilisant du deutérium et de l'hélium 3 fournissent des données importantes sur la structure du spin du



2. LE COLLISIONNEUR HERA accélère les électrons dans un anneau de stockage d'une circonférence de 6,3 kilomètres. Les électrons (en rouge) y font 47 000 tours par seconde, émettant en continu des rayons X de haute énergie nommés rayonnement synchrotron (en noir). Progressivement, en 30 minutes environ, le rayonnement synchrotron polarise le spin des électrons (flèches rouges) dans une direction perpendiculaire à celle du faisceau (en pratique, 60 pour cent des électrons sont convenablement polarisés) : une petite partie du rayonnement synchrotron provoque un changement de l'état de spin des électrons. La cible HERMES et les détecteurs (en bleu) occupent le hall expérimental Est ; trois autres expériences (en beige) partagent le faisceau de HERA. Des aimants spéciaux (en jaune) font pivoter la polarisation afin de la placer dans la direction du faisceau avant son arrivée au point de collision d'HERMES, puis la ramènent à son orientation transverse initiale à la sortie d'HERMES. Des polarimètres contrôlent la polarisation.



3. LA POLARISATION DU SPIN du proton est mesurée par de nombreuses expériences. L'asymétrie du spin total mesurée par le groupe HERMES au SLAC et par la Collaboration spin-muon (à gauche) montre que le spin des quarks n'apporte qu'une faible contribution au spin du proton. Des données ajustées à la courbe auraient indiqué une contribution plus importante, ce que l'on attendait au début des années 1980. La contribution des seuls quarks et antiquarks haut (à droite) a récemment été mesurée par le groupe HERMES.

neutron, qui devrait ressembler à celle du proton.

En 1988, un groupe international de physiciens, HERMES, proposa d'adapter le collisionneur d'électrons et de protons HERA, à Hambourg, afin de mesurer le spin du nucléon. Les électrons font le tour de l'anneau de HERA environ 47 000 fois par seconde, produisant un faisceau moyen 1 000 fois plus intense que celui du SLAC. Ce faisceau intense est utilisable avec des cibles gazeuses de faible densité, constituées d'hydrogène atomique, de deutérium ou d'hélium 3 purs. De telles cibles ne posent plus le problème de «dilution» du spin qui se produit avec des cibles de butanol et d'ammoniac, où de nombreuses paires de protons et de neutrons ne sont pas polarisées dans les atomes de carbone, d'azote et d'oxygène (par exemple, un seul des 15 nucléons d'un atome d'azote est polarisé).

L'obtention systématique d'un faisceau polarisé sur l'accélérateur HERA nécessita quatre ans de mise au point. Puis on a installé les détecteurs. L'équipe HERMES a commencé l'enregistrement de données à l'été 1995.

Les expériences de Hambourg et du CERN donnent des résultats très analogues (voir la figure 4), confirmant qu'un tiers seulement du spin du proton provient du spin de ses quarks de valence. De plus, on commence à identifier la contribution de chaque type de quark, en étudiant les débris de nucléons produits par les collisions. Ainsi, le groupe HERMES a récemment mesuré la relation entre le mouvement des quarks haut à l'intérieur du proton et leur polarisation, et il

devrait effectuer bientôt la première mesure directe des polarisations des quarks *étrange*, en analysant les collisions qui produisent un kaon négatif (particule constituée d'un quark *étrange* et d'un antiquark *haut*).

Parallèlement, les théoriciens ont amélioré les modèles : les 70 pour cent manquants dans le spin ne provoquent plus de crise. Ils semblent provenir des gluons (chaque gluon a un spin égal à un) et du mouvement orbital de tous les quarks et gluons à l'intérieur du nucléon. Mieux encore, la théorie décrit bien les mesures si l'on admet que la contribution totale des gluons est de une ou deux unités de spin et si le moment cinétique orbital est égal à moins un.

La présence de tels spins élémentaires, dans un nucléon dont le spin total est égal à seulement 1/2, était imprévue. Peut-on vérifier indépendamment ces contributions inattendues des gluons et du mouvement orbital? Personne n'a encore proposé de méthode de mesure de la contribution orbitale. Les données du groupe HERMES indiquent que les gluons contribuent effectivement au spin du nucléon, mais l'importance de cette contribution ne peut pas encore être évaluée. Des études utilisant des collisions entre protons à haute énergie devraient aussi permettre la détermination du spin des gluons. De telles expériences commenceront l'année prochaine au Collisionneur d'ions lourds relativistes, en construction à Brookhaven, aux États-Unis. Au CERN, l'expérience COMPASS mesurera aussi la contribution des gluons.

La compréhension de la structure interne des nucléons aura des retombées dans d'autres domaines de la physique des particules. La distribution du spin entre les différents éléments est intimement liée à des structures mathématiques qui apparaissent non seulement en chromodynamique quantique, mais aussi dans l'étude des interactions faibles (qui sont responsables de la désintégration de certains noyaux et participent à la fusion nucléaire dans le Soleil). En particulier, la règle de sommation établie en 1966 par James Bjorken, de l'Université Stanford, relie la dispersion des électrons autour des nucléons polarisés (un phénomène électromagnétique) et la désintégration d'un neutron (un phénomène d'interaction faible). Cette règle relie aussi la structure en quarks et en gluons des nucléons, régie par l'interaction forte, et la durée de vie du neutron. Elle est au cœur de notre description du monde de l'infiniment petit, au point que Richard Feynman déclara en 1972 que : «Sa vérification ou la démonstration de sa violation auraient un impact déterminant sur la physique des hautes énergies.»

Les expériences sur le spin vérifient la règle de sommation de Bjorken avec une précision croissante, et corroborent donc la structure mathématique de base de la chromodynamique quantique et du modèle standard de la physique des particules. Ainsi les scientifiques en apprennent-ils davantage sur les propriétés fondamentales de notre Univers, en cherchant une réponse complète à cette question, simple en apparence : qu'est-ce qui produit le spin d'un nucléon?

Klaus RITH dirige le groupe HERMES à l'Université d'Erlangen-Nuremberg. Andreas SCHÄFER dirige le groupe de théorie des hautes énergies et de chromodynamique quantique de l'Université de Regensburg.

Alan D. KRISCH, *Collisions between Spinning Protons*, in *Scientific American*, vol. 257, n° 2, pp. 42-50, août 1987.

F.E. CLOSE, M. MARTEN et C. SUTTON, *The Particle Explosion*, Oxford University Press, 1987.

Robert L. JAFFE, *Where Does the Proton Really Get Its Spin?*, in *Physics Today*, vol. 48, n° 9, pp. 24-30, septembre 1995.

L'Odyssée abrégée

MARTIN GRÖTSCHEL • MANFRED PADBERG

La recherche du circuit le plus court entre plusieurs villes est le prototype d'une classe importante de problèmes d'optimisation. Parfois cette recherche est si difficile qu'on se contente d'une solution approchée. De nouveaux algorithmes donnent souvent la meilleure solution.

Ulysse, le légendaire roi d'Ithaque, erra pendant 20 ans avant de serrer dans ses bras sa chère Pénélope. Les historiens ont identifié les 16 étapes de l'Odyssée (voir la figure 1), et les mathématiciens ont calculé que le périple aurait été plus court si les dieux ne s'en étaient pas mêlés... et si Ulysse avait bénéficié des résultats récents en théorie de l'optimisation.

Le monde moderne a ses Ulysses : les voyageurs de commerce et les hommes d'affaires, qui vont de ville en ville. Imaginons que l'un d'entre eux doive visiter les 16 villes où Ulysse est passé. L'ordre de parcours des villes lui importe peu, mais il se préoccupe de la longueur totale du circuit : le temps, c'est de l'argent. Ce problème est nommé problème du voyageur de commerce. De formulation anodine, il devient si difficile, quand le nombre de villes est notable, que les mathématiciens en cherchent encore une solution. Mieux encore, le problème du voyageur de commerce est un exemple d'une classe de problèmes qui se posent chaque fois qu'on doit identifier une combinaison optimale parmi de nombreuses possibilités. Par exemple, on le rencontre à propos de chargements de camions, de bateaux ou d'avions, de gestion du personnel, d'utilisation de machines, de détermination d'horaires de sociétés, de réalisation de circuits intégrés, d'investissements, de configuration de réseaux de communication...

Entre les 16 villes de l'Odyssée, le circuit le plus court mesure 6 859 kilomètres (voir l'encadré de la page 92), et Ulysse n'aurait parcouru que 9 913 kilomètres si, ayant emprunté les ailes de Dédale, il avait volé en ligne droite entre les étapes imposées par les dieux. Comment avons-nous déterminé le

circuit le plus court, parmi les 653 837 184 000 possibilités ? Nous avons successivement calculé la longueur de tous les circuits, à l'aide d'un ordinateur de bureau qui a fonctionné pendant 92 heures.

Un tel examen constitue la méthode la plus simple de résolution de problèmes combinatoires, quand le nombre de possibilités est fini. Toutefois, cette utilisation de la puissance de calcul brute n'est possible que dans de rares cas, et elle devient rédhibitoire pour des problèmes à peine plus compliqués que celui d'Ulysse. Nous avons choisi cet exemple, parce qu'il est à la limite des possibilités des ordinateurs actuels, quand ceux-ci font l'examen systématique des combinaisons. Pour 25 villes, en revanche, même les ordinateurs les plus puissants du monde seraient incapables d'examiner toutes les possibilités en un temps raisonnable.

En pratique, les problèmes d'optimisation sont souvent bien plus difficiles que celui d'Ulysse. Des avancées théoriques récentes permettent aujourd'hui de les résoudre. Ainsi, au cours de l'été 1998, David Applegate, Robert Bixby et William Cook, de l'Université de Houston, et Vasek Chvatal, à New Brunswick, ont utilisé les techniques que nous examinerons plus loin pour déterminer le circuit le plus court entre plus de 13 000 villes des États-Unis (voir la figure 2), battant de loin leur propre record, de 7 397 villes seulement.

La modélisation et les graphes

L'analyse d'un problème d'optimisation commence avec sa formalisation mathématique : on remplace chaque ville par un point, ou «sommets», et l'on relie chaque sommet du réseau par

un segment (une «arête»). Quand toutes les paires de sommets sont reliées par une arête, le graphe formé par les sommets et par les arêtes est dit complet. Un graphe complet à 16 sommets comporte exactement 120 arêtes.

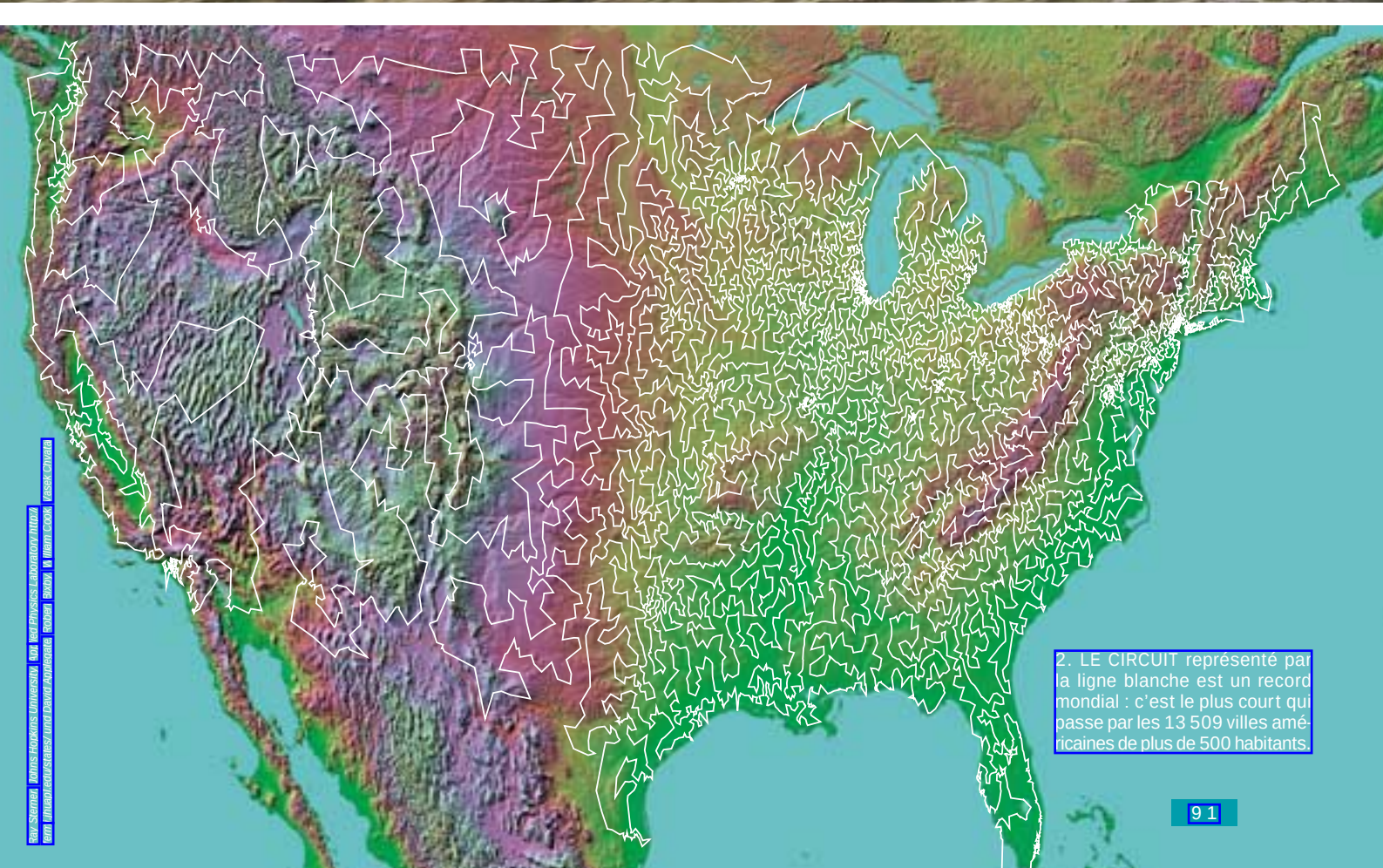
Chacune des arêtes est, dans le problème d'Ulysse, affectée d'une valeur : la distance entre les deux villes associées aux sommets. Toutefois d'autres types de valeurs sont possibles : montant de transactions, durée de fabrication, quantité de matière, etc. Un circuit n'est composé que de certaines arêtes, et un circuit complet qui passe par toutes les arêtes une seule fois est un circuit hamiltonien, ainsi nommé d'après le mathématicien irlandais William Hamilton (1805-1865). La longueur du circuit est la somme des longueurs des arêtes empruntées.

Pourquoi la recherche du plus court circuit hamiltonien est-elle si difficile ? Parce que le nombre de circuits possibles devient considérable quand le nombre de villes augmente ? Non : le nombre de solutions possibles n'est pas une bonne mesure du degré de la complexité des problèmes combinatoires. En effet, imaginons que l'on veuille créer un réseau de télécommunications entre des villes, en faisant éventuellement passer les lignes par des villes intermédiaires, et supposons que le coût de liaison soit proportionnel à la longueur des lignes empruntées par les communications. La solution la plus onéreuse est celle qui correspond au graphe complet, où chaque ville est directement reliée à toutes les autres, mais il existe des solutions moins coûteuses : on élimine progressivement du graphe l'arête la plus longue que l'on puisse ôter sans dissocier le réseau en deux moitiés disjointes, puis on répète l'opération avec le graphe

1. L'*ODYSSÉE* narre le retour d'Ulysse à Ithaque. Les dieux compliquèrent ce voyage, de sorte qu'Ulysse dut faire escale en 16 points de la Méditerranée. Le problème qui consiste à trouver le circuit le plus court qui passe par ces 16 points impose l'exploration d'un espace à 120 dimensions.

Zeichnung: Peter Conrath / E.S. 4
 4te X. Teilmaier / 180
 Mediterranean and Oceanic Data Base Marine Science
 and Techn. Proj. Programme der E.O. Mann-Gesellschaft
 Manfred Patzberg

**Zeichnung: Peter Comic IV, E.S.A.
Alle M. (teilweise) i. der
Mediterranean and Oceanic Data Base/Manne Science
and Techn. day Programme Der EU, Martin Grötschel,
Manfred Padberg**



2. LE CIRCUIT représenté par la ligne blanche est un record mondial : c'est le plus court qui passe par les 13 509 villes américaines de plus de 500 habitants.

obtenu. On obtient ainsi un réseau de longueur égale à 4 540 kilomètres, pour les 16 villes d'Ulysse (voir la figure 3).

Cet algorithme est «myope» parce qu'il choisit, à tout moment, la plus avantageuse des diverses possibilités, sans chercher si le choix effectué à une étape donnée ne compromet pas l'accès à une solution qui serait finalement meilleure. Souvent on fait mieux fait d'accepter un inconvénient temporaire quand on escompte un gain supérieur, mais, dans ce cas, la myopie n'est pas gênante : on peut démontrer que l'algorithme conduit toujours à une solution optimale.

Combien de possibilités se présentent-elles, dans ce problème? Pour n villes, ces solutions sont des graphes qui ont exactement $n - 1$ arêtes sans

circuit fermé passant par une partie des arêtes. De tels graphes sont des arbres. Il y a exactement un siècle, Arthur Cayley (1821-1895) a démontré que, pour n villes, il existe exactement n^{n-2} arbres. Ainsi, pour 16 villes, le nombre d'arbres est égal à 72 057 594 037 927 936, ce qui est bien supérieur au nombre de circuits possibles entre les différentes villes visitées par Ulysse. Pourtant, un ordinateur de bureau trouve en quelques millisecondes la solution optimale au problème des arbres.

Si le nombre de solutions possibles ne fait pas la difficulté du problème du voyageur de commerce, pourquoi ce problème est-il si compliqué? Nous ne le savons pas. La théorie de la complexité aide à comprendre

la différence entre les problèmes faciles, tels ceux des arbres, et les problèmes difficiles, tel celui du voyageur de commerce, mais cette théorie montre aussi que nombre de problèmes combinatoires d'importance pratique sont complexes.

Parfois, une modification minime de l'énoncé d'un problème change complètement son type. Supposons, par exemple, que l'on se préoccupe de la fiabilité d'un réseau de télécommunications : on veut que le réseau continue de fonctionner malgré les incendies, les séismes ou les coups de pelleuse malencontreux, qui détruiraient certaines lignes. Le réseau ne peut alors avoir la structure arborescente précédente, car la suppression d'une arête dissocierait l'arbre en deux arbres qui ne communiqueraient plus (ce type de considérations a parfois été négligé : le remplacement des câbles métalliques par des fibres optiques, aux États-Unis, coûtait si cher que les opérateurs ont cherché des solutions minimales... qui ont conduit à l'effondrement catastrophique du réseau téléphonique de Chicago, en 1998).

Plus les circuits sont nombreux, entre les paires de sommets d'un réseau, plus le réseau est fiable ; le réseau le plus fiable serait celui qui correspond au graphe complet, mais il serait trop onéreux. Pour décider du type de redondance à assurer, les ingénieurs doivent étudier la fiabilité en fonction des coûts de réalisation et de maintenance. En pratique, certaines liaisons sont plus importantes que d'autres, et des priorités doivent être prises en compte. On formalise facilement ces nouvelles données, mais la complexité des problèmes augmente alors parfois.

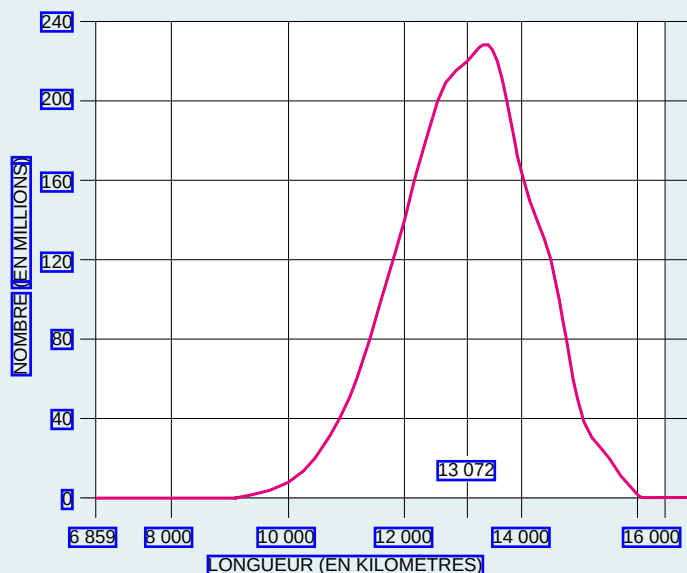
Attribuons, par exemple, des niveaux de priorité aux différentes villes à relier : 0 pour les villes peu importantes, 1 pour des villes plus importantes, 2 pour les grandes villes, etc. On impose que toute ville d'un rang i soit reliée aux autres villes de même rang, même quand i liaisons directes tombent en panne. On cherche alors le moins cher de tous les réseaux qui satisfont cette condition (voir l'encadré de la page 94). Les problèmes réels comportent en outre une foule de conditions secondaires : un câble ou un relais ne peuvent traiter simultanément qu'un nombre limité de conversations, ce qui diminue le nombre de

Tous les chemins mènent à Ithaque

Combien de circuits passent-ils par n villes? Calculons ce nombre par récurrence. Supposons que nous disposions de la liste des circuits passant par $n - 1$ villes. Nous obtiendrions la liste pour n villes en ajoutant à chaque circuit à $n - 1$ villes un crochet par la n -ième ville ; dans chaque cas, $n - 1$ crochets sont possibles. De ce fait, le nombre de circuits possibles passant par n villes est égal au produit de $(n - 1)$ par le nombre de circuits passant par $n - 1$ villes (par ce procédé de construction, les circuits ne sont comptés qu'une seule fois). Pour trois villes, il n'existe qu'un seul circuit (quand on ne distingue pas un circuit du circuit inverse). Pour quatre villes, trois circuits sont possibles ; pour cinq villes, il en existe 3×4 ; et, plus généralement, il

existe $3 \times 4 \times 5 \times \dots \times (n - 1)$, soit $(n - 1)!/2$ circuits qui passent par n villes (dans cette formule, le point d'interrogation désigne la fonction factorielle). De ce fait, entre les 16 villes de l'Odyssée, le nombre de circuits possibles est égal à 653 837 184 000.

Nous avons calculé la longueur de tous ces circuits et obtenu, pour les plus courts, les longueurs suivantes : 6 859, 6 865, 6 870, 6 875, 6 889, 6 890, 6 895, 6 898, 6 900 kilomètres. Le circuit le plus long mesurait 16 434 kilomètres. Le graphique ci-dessous indique le nombre de circuits en fonction de leur longueur. La médiane est à 13 072 kilomètres : la moitié des circuits sont plus longs que cette valeur. La longueur de circuit la plus fréquente, 13 359 kilomètres, est obtenue 229 millions de fois.



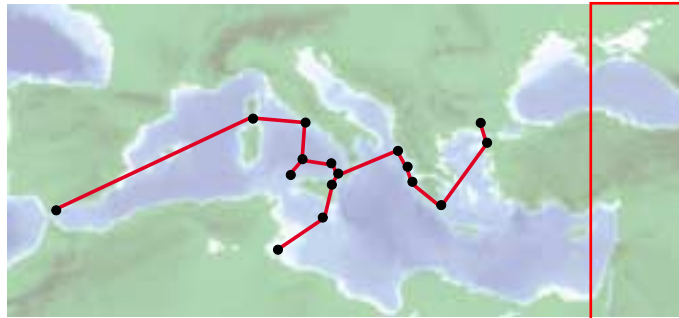
solutions possibles sans simplifier le problème, bien au contraire.

Comment trouve-t-on les solutions les meilleures? Comment savoir si une solution calculée est vraiment bonne?

Bornes supérieure et inférieure

Quand on a déterminé une fonction coût (longueur de chemin, coût, etc.) que l'on veut minimiser, l'existence d'une solution optimale est claire, car il n'existe qu'un nombre fini de solutions, de sorte qu'on doit pouvoir en trouver une pour laquelle la fonction coût prend la valeur minimale. Nous ignorons initialement cette valeur minimale, mais peut-on l'encadrer par une borne inférieure et par une borne supérieure?

On trouve facilement des bornes supérieures (chaque solution du



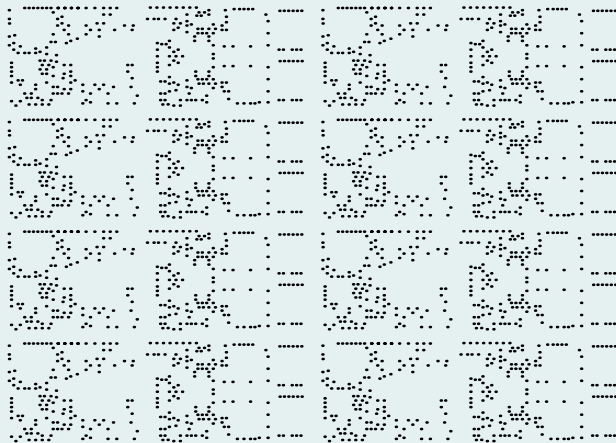
3. LE RESEAU de communications le plus économique, entre les 16 villes de l'Odyssée.

problème en constitue une), mais celles qui sont les plus intéressantes sont naturellement celles qui sont proches de la solution optimale. Des méthodes fondées sur des principes intuitifs (par exemple, joindre un sommet à son voisin le plus proche) fournissent des solutions raisonnablement proches de la solution optimale ; elles sont nommées méthodes heuristiques. On n'est pas certain qu'elles sont efficaces, mais elles le sont souvent.

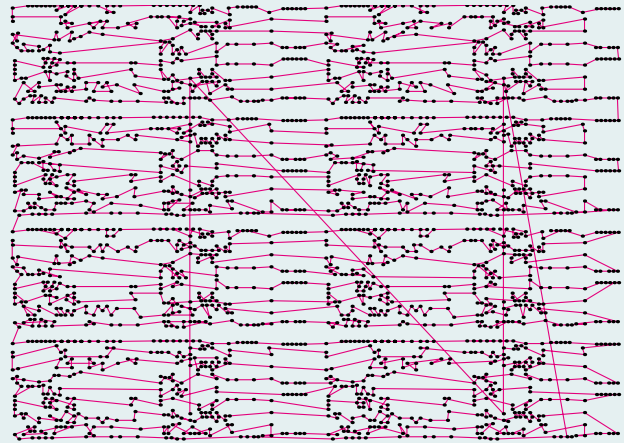
L'information selon laquelle toute solution a une fonction coût supérieure à la borne inférieure est également précieuse, car, quand une solution n'est pas très éloignée de la borne inférieure, on peut l'admettre à la place de la solution optimale : une longue recherche ultérieure ne conduirait qu'à un faible gain. Comment identifier une borne inférieure? Une bonne stratégie de recherche consiste à utiliser à chaque étape les informations utilisées à l'étape précédente : c'est ainsi que sont nés les progrès des dernières années. Utilisons le voyage d'Ulysse pour examiner cette stratégie.

La recherche myope, qui ne tient compte que du gain directement obtenu à chaque étape, est utile pour la recherche d'une borne supérieure : à partir de chacune des villes, on se

Le long voyage d'une perceuse

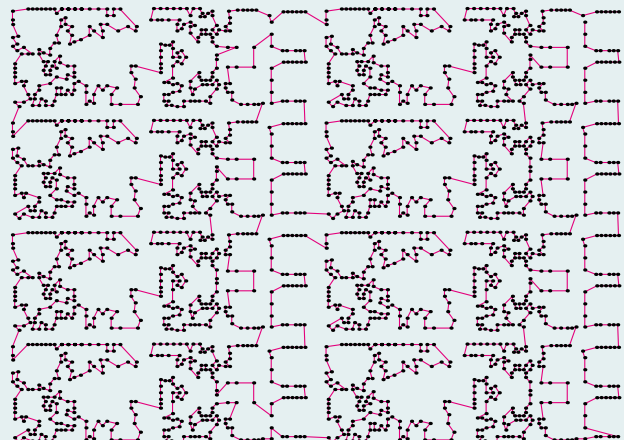


Le problème.



Une solution médiocre.

Supposons que nous utilisions une perceuse ou un faisceau laser pour percer 2 392 trous dans un circuit imprimé. Tout comme Ulysse, la perceuse devra atteindre chaque trou (l'équivalent d'une ville) une fois seulement. Si le temps de perçage est constant, la seule façon d'accélérer la réalisation du circuit consiste à réduire le parcours de la perceuse. La solution représentée en haut à droite, par exemple, est médiocre : sa longueur est égale à 718 876 unités, contre 378 032 unités pour la solution optimale (en bas à droite). Une station de travail met à peine une heure pour trouver cette dernière solution si elle exécute un algorithme efficace. Pour ce problème, on a admis que le temps de parcours de la perceuse était proportionnel à la distance entre deux trous.



La solution optimale.

Marin Gosselin / Vantred Pabst

rend dans la plus proche des villes voisines encore non visitées ; puis, quand toutes les villes ont été visitées, on revient au point de départ.

Quand on applique cette stratégie à des villes quelconques, à l'aide de papier et de crayon, on fait rapidement deux observations : le résultat dépend beaucoup du point de départ, et la solution obtenue est facile à améliorer. Ainsi, lorsque deux arêtes se croisent, on gagnera à remplacer la partie de circuit composée des quatre sommets liés par ces deux arêtes par un circuit où les arêtes sont des bords opposés du quadrilatère. Parfois on gagne même à remplacer les deux côtés du quadrilatère par les autres côtés, et d'autres améliorations de ce type sont possibles.

Pour perfectionner l'algorithme de recherche du circuit le plus court, on doit ainsi corriger les effets néfastes de la myopie. Si l'on s'obstinaît à améliorer les solutions en ne considérant que les solutions voisines, on risquerait de rester piégé dans un minimum local, c'est-à-dire une solution qui n'est pas particulièrement

bonne, mais que les règles d'évolution ne permettent pas d'améliorer (de même, si on laisse rouler une bille sur une tôle déformée, elle ira se loger dans un creux, mais, si elle n'a pas assez d'énergie pour en ressortir, elle risque d'y rester même si le creux n'est pas le point le plus bas de la tôle). On devra donc utiliser des perturbations qui conduiront assez loin de la solution identifiée à chaque étape. De telles méthodes ont souvent des noms amusants, tels que méthode de Monte-Carlo, recuit simulé, évolution, algorithme du déluge...

La programmation de ces méthodes est simple quand les problèmes sont de complexité moyenne. Aussi les problèmes d'optimisation ont-ils été souvent examinés par des amateurs, qui n'ont pas toujours obtenu de bons résultats. Pour étudier des problèmes du voyageur de commerce avec des dizaines de milliers de sommets (un ordre de grandeur courant, en pratique), on doit structurer les données et mettre en œuvre des techniques informatiques raffinées, afin d'obtenir des solutions en un temps acceptable.

Simultanément les heuristiques sont restées très utiles pour la résolution de problèmes pratiques.

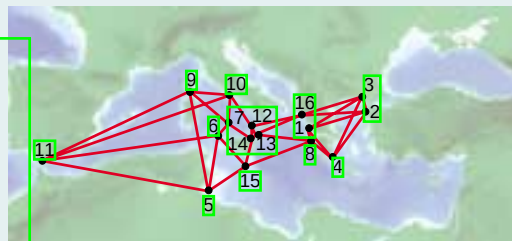
Comment détermine-t-on la borne inférieure de la fonction coût, pour un problème d'optimisation combinatoire ? L'idée fondamentale, apparemment paradoxale, consiste à simplifier le problème en le généralisant : on ajoute au problème initial un autre problème, qui possède davantage de solutions, de sorte que chaque solution du problème initial soit également une solution du problème élargi. On peut, par exemple, rendre moins strictes les conditions secondaires du problème initial, voire les supprimer.

Une solution minimale du problème élargi se caractérise par un coût inférieur à celui de toute autre solution et, par conséquent, inférieur à celui des solutions du problème initial. C'est exactement ce que l'on cherche : une borne inférieure pour le problème initial.

Évidemment le problème élargi doit être plus simple que le problème initial, et sa solution optimale doit

La fiabilité des réseaux

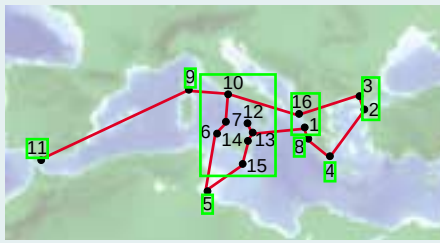
Supposons que nous devons relier les 16 villes étapes d'Ulysse par un réseau de télécommunications qui résiste aux défaillances de ses lignes. Pour des raisons historiques, nous décidons d'attribuer une priorité 1 à Ithaque (1), Troie (2), Djerba (5), Circée (10) et Messine (13) ; les autres villes auraient un niveau de priorité inférieur (0). Autrement dit, les liaisons entre les villes prioritaires devraient être préservées même en cas de panne des connexions directes entre ces villes. Si les coûts de construction sont proportionnels à la longueur des lignes, le réseau le moins coûteux a une longueur de 5 842 kilomètres (ci-dessous). Aujourd'hui les concepteurs de réseau cherchent empiriquement un équilibre raisonnable entre les coûts de réalisation et la fiabilité en modifiant les para-



Toutes les villes sont de rang 3.

mètres. Si l'on peut dépenser plus pour assurer la fiabilité du réseau, par exemple en assignant la valeur 3 à chacune des villes, le réseau le moins cher que l'on puisse concevoir est de longueur égale à 16 112 kilomètres : avec un tel réseau, les connexions subsisteraient si trois connexions de chaque ville tombaient simultanément en panne. Si le central d'une ville était en panne (par suite d'un incendie du central, par exemple), les autres villes resteraient interconnectées. Le réseau ne serait interrompu que si les villes 8 (Zakinthos) et 16 (Corfou) tombaient simultanément en panne. Dans les problèmes réels, tel celui du réseau téléphonique de l'Est des États-Unis, la solution

la plus économique serait celle de la figure en bas à droite, où les villes d'importance 0 sont représentés par un cercle, et les villes prioritaires par un carré. Un tel réseau comporte 116 villes, mais le coût de la liaison entre deux villes n'est pas toujours proportionnel à la distance qui les sépare : le franchissement des fleuves, des gorges ou des montagnes coûte très cher.



Les villes 1, 2, 5, 10 et 13 ont une priorité 1.



Réseau téléphonique de l'Est des États-Unis.

Martin Grosche, Joyce Morris et Martin Stod

être aussi proche que possible de celle du problème initial. Dans le cas de l'*Odyssée*, une généralisation qui consiste à supposer toutes les distances entre les villes égales à la plus petite des distances entre villes conduit à une borne inférieure.

La programmation linéaire

Les mathématiciens connaissent de nombreuses techniques de généralisation (ou d'inclusion), mais nous ne considérerons ici que celle qui donne les meilleurs résultats : elle est fondée sur la programmation linéaire, l'une des techniques les plus importantes des mathématiques appliquées découvertes depuis la Seconde Guerre mondiale (voir *Gestion et programmation linéaire*, par Robert Bland, *Pour la Science*, août 1981). Son nom est trompeur, car elle n'a pas de rapport direct avec l'informatique ; c'est plutôt une optimisation de problèmes linéaires. On l'emploie quand on veut répartir de façon optimale des ressources limitées ; elle résout des problèmes de planification dans les compagnies de transport aérien, dans les raffineries de pétrole, dans les usines automobiles...

Pour inclure le problème d'Ulysse dans un problème que l'on puisse étudier par les techniques de programmation linéaire, on commence par dresser la liste des 120 liaisons directes entre les 16 villes, dans un ordre quelconque, et l'on affecte chaque liaison de la valeur 1 si Ulysse les utilise au cours de son circuit, de la valeur 0 dans le cas contraire. Ainsi chaque circuit est décrit par un ensemble de 120 chiffres binaires, ce que l'on nomme un vecteur dans un espace à 120 dimensions. Autrement dit, un circuit est associé à un point dans un espace à 120 dimensions.

Inversement, tout point de l'espace à 120 dimensions ne correspond pas à un circuit : il faut que 16 des coordonnées du point soient égales à 1, et que les 104 autres soient égales à 0.

Parmi les 653 837 184 000 circuits, comment choisir ceux dont la longueur totale est minimale ? Calculons d'abord leur longueur en multipliant chaque coordonnée (0 ou 1) par la longueur



4. QUAND ON SE CONTENTE de choisir la solution la plus directement séduisante, on ne parvient pas toujours à l'objectif fixé. Le «prévoyant Ulysse», lui, voyait loin : afin d'échapper au chant des sirènes, il demanda à ses compagnons de l'attacher au mât de son navire, tandis que ses compagnons avaient les oreilles bouchées à la cire (le vase qui représente cette scène date de 450 avant notre ère).



5. TEL LE CYCLOPE Polyphème aveuglé par Ulysse, les algorithmes de recherche de circuits n'ont pas de vue d'ensemble du problème, et ils ne progressent qu'à tâtons. Pour des raisons de gain de temps, ils ne vérifient pas, chaque fois, que chaque contrainte est respectée, et ils doivent accepter de faire parfois fausse route. C'est ainsi qu'Ulysse échappa à Polyphème en se cachant sous le ventre d'un bélier (le peintre surnommé le Maître de Sapho a réalisé cette œuvre vers 510 avant notre ère).

du chemin correspondant, puis additionnons tous les produits.

L'étape décisive vient ensuite : nous considérons les composantes du vecteur comme des variables qui peuvent prendre n'importe quelle valeur comprise entre 0 et

1. On obtient ainsi des points de l'espace à 120 dimensions qui ne correspondent généralement pas à des circuits : Ulysse ne peut manifestement pas effectuer un circuit passant par les 16 villes s'il se rend une demi-fois d'Ithaque à Troie, ou 0,17 fois de Messine à Gibraltar. En revanche, cette généralisation est de celle que nous cherchions. La fonction coût cherchée, la longueur totale du circuit, est une fonction des 120 variables : toute perturbation de l'une des variables modifie la fonction coût d'une valeur proportionnelle à la perturbation, le facteur de proportionnalité étant égal à la longueur de l'étape correspondante.

On connaît un procédé efficace pour chercher le minimum d'un problème linéaire quand on impose des contraintes qui sont également linéaires : c'est l'algorithme du simplexe. Considérons tous les points (ou vecteurs) de l'espace habituel dont les coordonnées sont comprises entre 0 et 1 : ils constituent un cube dont le côté a une longueur égale à 1 et dont un sommet se trouve à l'origine de l'espace. De même, dans un espace à 120 dimensions, les vecteurs dont toutes les composantes sont comprises entre 0 et 1 forment un hypercube, à 2^{120} sommets. Une contrainte exprimée par une inéquation linéaire est comme un couteau qui élimine une partie d'un fromage : on obtient un solide limité par des faces planes.

Dans l'espace à 120 dimensions, les points qui vérifient ainsi les contraintes forment un polytope (un volume limité par des hyperplans, tout comme un polyèdre est limité par des plans) convexe. Le minimum d'une fonction coût linéaire sera toujours dans un coin (ou dans plusieurs coins) du polytope. L'algorithme du simplexe examine systématiquement, mais en restant myope, les coins du polytope jusqu'à ce qu'il soit bloqué : le coin atteint est le minimum cherché (ou l'un des divers minima possibles).

Malheureusement ce minimum n'est que celui du problème généralisé, et non celui du problème initial. En général, le vecteur trouvé par la méthode du simplexe n'a pas de coordonnées entières, et l'on doit remettre en action le couteau à fromage pour transformer le polytope du problème linéaire en polytope du problème initial. Pour ce travail supplémentaire, un coup de couteau est insuffisant. Pis encore, on ne sait pas comment retailler le polytope du problème linéaire. Les programmes linéaires explicites, pour la résolution d'un circuit, sont aujourd'hui limités à 9 villes. Plus précisément, le polytope associé au problème du voyageur de commerce à 9 villes est défini par 9 équations et par 42 104 442 inéquations, avec 36 variables qui correspondent aux 36 possibilités de liaison directe entre 9 sommets. Pour des polytopes avec 8, 7 et 6 villes, on obtient respectivement 194 187, 3 437 et 100 inéquations à 28, 21 et 15 variables. Pour 10 villes, le nombre d'inéquations atteindrait au moins 51 043 900 866 (cela reste à démontrer).

Pour des problèmes encore plus complexes, on ne connaît pas, même théoriquement, le jeu d'équations qui définit le polytope, et, même si on le connaissait, il serait peu utile, car il est beaucoup trop gros. Enfin, pour des villes encore plus nombreuses, on ne pourrait même pas trouver ce jeu d'équations. Le nombre des inéquations pour le problème des 16 villes de l'Odyssée serait, en tout cas, vertigineux.

On peut trouver une inéquation linéaire qui distingue le minimum trouvé de celui du problème étudié. Quand on ajoute cette inéquation au système d'inéquations déjà trouvé, on obtient un nouveau minimum, et, si l'on a de la chance, ce point peut même appartenir au polytope réel : on dispose alors d'une solution minimale du problème initial. Cependant, en général, ce point n'a pas de coordonnées entières, ce qui impose de répéter le processus.

Une autre difficulté s'ajoute : généralement on ne peut pas se fonder sur le polytope des points admissibles du

problème d'optimisation, car on devrait tenir compte de toutes les contraintes, qui seraient également en nombre considérable dès que le nombre de villes est élevé. Paradoxalement on peut toutefois résoudre beaucoup de problèmes plus complexes par la méthode de la programmation linéaire. Comment cela est-il possible ?

Remplaçons à nouveau un problème par un autre, plus vaste, mais plus simple : parmi le nombre considérable de contraintes, ne retenons que certaines d'entre elles (nous découpons le morceau de fromage de manière grossière). Nous identifions d'abord un vecteur solution, c'est-à-dire le coin optimal du trop grand polytope, puis nous l'améliorons en introduisant une contrainte qui permet de couper un morceau aussi grand que possible ; on répète l'opération plusieurs fois.

Dans le cas du problème d'Ulysse, nous pourrions d'abord commencer par utiliser, comme contrainte, que chaque ville ne figure que dans deux

Les circuits et l'optimisation linéaire

On résout parfois des problèmes en les compliquant d'abord. Considérons quatre villes 1, 2, 3, 4. Le graphe complet, pour ces quatre villes, a six arêtes, repérées par les numéros des villes qu'elles relient (le plus petit numéro figure toujours en premier). On peut caractériser chaque circuit en attribuant aux arêtes qui appartiennent au circuit la valeur 1, et la valeur 0 aux autres arêtes :

COTE	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,3)	(2,4)	(3,4)
	1	0	0	0	0	0
	0	1	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	0	0	1

Avec ce codage, chaque circuit peut être considéré comme un vecteur d'un espace à six dimensions où deux valeurs sont possibles pour chaque dimension. De même, nous pourrions représenter l'Odyssée par un vecteur de 120 composantes, dont 16 seraient un chiffre 1, et les autres un chiffre 0. Inversement, tous les vecteurs ayant 16 composantes égales à 1 et 104 composantes égales à 0 ne sont pas des circuits. Parmi les 16 arêtes qui relient chaque ville, seulement deux peuvent être affectées de la valeur 1 : le chemin par lequel Ulysse arrive à cette ville, et le chemin par lequel il en sort. Cette condition s'exprime sous la forme d'une équation linéaire : la somme de toutes les composantes du vecteur qui appartiennent aux arêtes correspondant à une ville doit être égale à deux. Un vecteur qui remplit cette condition ne correspond pas

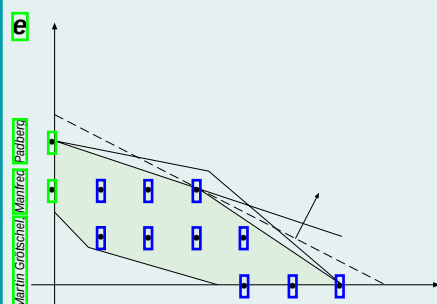
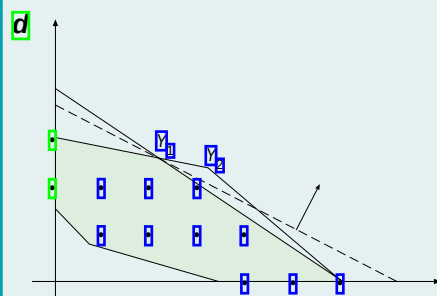
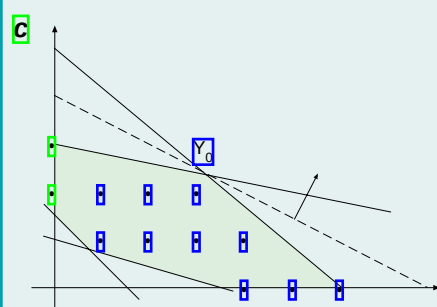
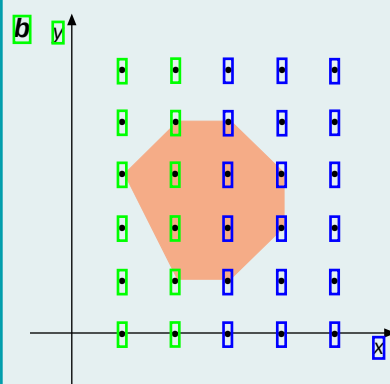
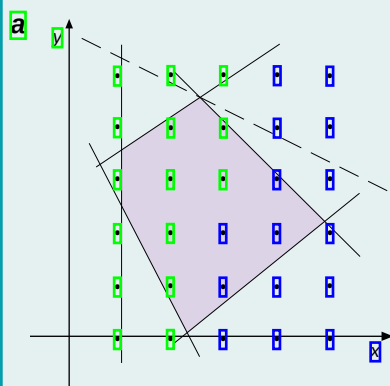


toujours à un circuit : les arêtes choisies pourraient constituer plusieurs circuits partiels (voir la figure en haut à droite) plutôt qu'un grand circuit. D'autres contraintes sont nécessaires.

Si l'on considère les sept villes du circuit partiel le plus à l'Ouest, on observe que toutes les arêtes qui relient ces villes sont affectées de la valeur 1 dans le vecteur. Au moins un des ces chiffres 1 est de trop, car sept arêtes reliant sept villes, chaque ville n'étant associée qu'à deux arêtes, constituent nécessairement un circuit fermé, ce qui exclut un circuit passant par les 16 villes. Plus généralement, on peut formuler cette condition de la façon suivante : pour chaque groupe de k villes, $k - 1$ arêtes au plus entre ces villes pourront être affectées de la valeur 1. Cette condition se formalise par une inéquation linéaire : la somme de toutes les composantes associées à un groupe de k villes est nécessairement inférieure ou égale à $k - 1$.

Chaque groupe d'au moins trois villes conduit à une telle condition, ce qui, pour n villes, donne $2^n - 1$ conditions (et non 2^n , car la condition d'exclusion pour un groupe est identique à celle du groupe complémentaire). Pour de grands nombres de villes, un tel nombre de conditions est bien au-delà de ce qui est praticable.

L'optimisation linéaire



La découpe des polytopes est un art difficile, car on ne sait pas où la commencer. Pour illustrer cette difficulté, examinons des exemples en deux dimensions (au lieu de trois, voire de 120). À deux dimensions, l'espace est décrit à l'aide de deux variables x et y . Une condition linéaire (exprimée par une inéquation) correspond à une droite dans le plan : tous les points situés d'un côté de la droite sont éliminés. Plusieurs conditions délimitent un polygone (dans le cas général, un polytope) qui contient les solutions acceptables du problème (a). La fonction coût est également linéaire. C'est pourquoi il existe des droites (dans le cas général, des hyperplans) sur lesquelles la fonction coût est constante. La droite en pointillés de la figure a est une telle droite : les points situés au-dessous à gauche sont tous plus chers, et les points situés à droite et au-dessus sont moins chers que ceux qui sont situés sur la droite elle-même. La solution optimale du problème (le point le moins cher du polygone) doit être un des coins de ce polygone : c'est le seul point du polygone qui rencontre la droite. Parfois l'un des côtés du polygone est parallèle à cette droite des coûts constants. En pareil cas, les deux points qui délimitent la droite, ainsi que les points intermédiaires, constituent des solutions optimales de même valeur.

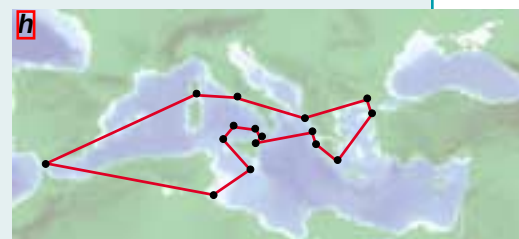
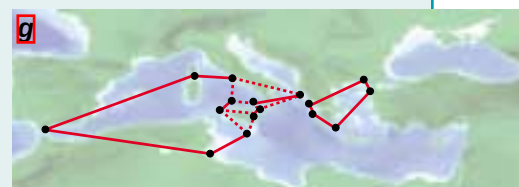
Le problème linéaire qui généralise le problème initial est ici celui qui considère tous les points de l'espace, et non seulement les points de coordonnées entières (points noirs). Dans la recherche du circuit le plus court entre les 16 étapes d'Ulysse, les valeurs entières acceptables se réduisent même à 0 et à 1. Nous ne cherchons pas ici la solution optimale au problème linéaire, car elle n'est généralement pas située sur un tel ensemble de points, mais plutôt la solution optimale parmi les points situés dans la grille de points à l'intérieur du polygone. Il nous faudrait donc rectifier ce polygone de sorte qu'il ne contienne plus que les points acceptables, ainsi que tous les points situés entre eux, délimitant une enveloppe convexe qui englobe les points acceptables (b). Une telle rectification impose l'ajout de conditions supplémentaires. Malheureusement les trouver toutes est difficile, car il peut en exister un nombre gigantesque. On adopte alors une démarche itérative.

Pour identifier un faux optimum (un optimum y_0 du problème linéaire, avec des coordonnées non entières) (c), on cherche une droite (une condition exprimée par une

inéquation) qui exclut le faux optimum tout en laissant acceptables les points qui le sont. Parmi les nombreuses droites qui possèdent cette propriété, il en existe de meilleures, c'est-à-dire des droites qui découpent un gros morceau du polygone. On résout le problème linéaire à l'aide de cette condition supplémentaire (d), on trouve un nouvel optimum y_1 qui se révèle être à nouveau un faux optimum, et l'on répète le processus jusqu'à ce que l'optimum soit situé sur un point de la grille (e).

Cet algorithme de coupe est simple dans un plan, à seulement deux dimensions (déterminer la droite de coupe la plus favorable), mais il devient très difficile à mettre en œuvre dans un espace à 120 dimensions. En 1958, à l'Université Princeton, Ralph Gomory a trouvé un algorithme qui résout le problème après un nombre fini d'étapes, mais qui se révèle trop lent pour les gros problèmes. Aujourd'hui on ne cherche plus systématiquement les hyperplans de coupe, mais on se limite à ceux qui s'adaptent le mieux aux facettes du polytope.

En considérant les conditions secondaires, la solution non admissible au problème du circuit de l'*Odyssée* décrite dans l'encadré de la page 96 reste une solution non admissible, mais qui se rapproche de la solution admissible la plus courte (la solution optimale, f) et s'améliore encore à l'étape suivante, où quelques arêtes (en pointillés) sont affectées de la valeur 1/2 (g). L'étape suivante conduit à la solution optimale (h).



chemins : un chemin qui y conduit, et un chemin qui en sort. La solution du problème linéaire correspondant conduit à une longueur minimale de circuit égale à 6 113 kilomètres, ce qui représente une borne inférieure utilisable. Une telle longueur correspond à un groupe de plusieurs circuits partiels (voir l'encadré de la page 97). Cependant, comme ce groupe n'est pas lui-même un circuit, on doit ajouter une contrainte pour éliminer le point correspondant du polytope obtenu.

Il existe de nombreuses découpes possibles ; la «meilleure» est celle qui se rapproche le plus des faces du polytope réel (ces faces sont des généralisations à plusieurs dimensions des surfaces qui limitent un polyèdre à trois dimensions). Depuis 20 ans environ, de nombreuses équipes ont étudié les découpes. Ici, nous allons ajouter une contrainte qui exclut les quatre circuits partiels de la solution provisoire trouvée. On cherche alors à résoudre le problème linéaire en tenant compte de ces inéquations, une opération où excellent les programmes modernes, qui exploitent de façon astucieuse les informations contenues dans la solution provisoire.

On obtient ainsi un vecteur solution associé à une longueur de 6 228 kilomètres, qui ne permet toujours pas à Ulysse de boucler un circuit complet (voir la figure f de l'encadré de la page 97). Poursuivons en ajoutant des contraintes qui n'avaient pas été prises en compte : on obtient la solution d'un troisième problème linéaire, qui donne une fonction finale de 6 813,5 kilomètres et un vecteur solution qui ne permet toujours pas de boucler un circuit (voir la figure g). En effet, celui-ci contient, pour certaines des 120 variables, la valeur $1/2$. Une itération supplémentaire donne une valeur de 6 859 kilomètres, et le vecteur solution qui correspond au circuit optimal (voir la figure h).

Le procédé itératif précédent est nommé algorithme de coupe. Quand on connaît les inéquations qui décrivent le polytope réel, cet algorithme se termine après un nombre fini d'étapes. En revanche, l'intuition ne nous laissait pas espérer que nous atteindrions la solution en seulement quatre étapes. Aujourd'hui on ignore les inéquations qui conduiraient à coup sûr à la résolution du problème du voyageur de



6. L'OPTIMISATION à l'aide d'arcs et de flèches : quand Ulysse revient chez lui, après 20 ans d'errance, son but n'est pas atteint. En éliminant successivement les diverses conditions restantes (c'est-à-dire en tuant les prétendants), il élimine tous les points non acceptables et atteint l'optimum.

commerce ou à celle d'autres problèmes d'optimisation combinatoire importants en pratique, mais les mathématiciens appliquent leurs résultats à des problèmes combinatoires toujours plus nombreux.

L'existence des inéquations nécessaires à la résolution du problème du voyageur de commerce ou à celle d'autres problèmes d'optimisation combinatoire n'est pas assurée : la complexité de ces problèmes va peut-être de pair avec cette inexistence. Comment faire, alors ? Nous pouvons nous contenter d'une borne inférieure, ou nous pouvons aussi appliquer un algorithme d'énumération : si l'algorithme de coupe se termine sans résoudre le problème, nous savons toutefois que certains côtés du polytope ont des coordonnées qui ne sont

ni 0 ni 1. Nous pouvons alors sélectionner l'un de ces côtés, lui assigner arbitrairement une valeur 1 (indiquant que le circuit doit passer par ce point) et tenter de résoudre alors le problème ainsi limité, et simplifié. Nous pouvons également assigner la valeur 0 (le circuit ne passe pas par ce point) et choisir parmi ces deux solutions celle qui donne le meilleur résultat.

Si l'on ne résout pas non plus ce nouveau problème, on devra effectuer une autre division, et répéter le processus, formant un arbre de solutions possibles, qu'il faudra ensuite explorer astucieusement.

L'analyse d'un tel arbre s'effectue par la méthode de branchement et coupure, une méthode perfectionnée depuis les années 1960. Ainsi les exemples que nous avons considérés ici ont été calculés à l'aide d'un programme mis au point par Manfred Padberg et Giovanni Rinaldi, de l'Institut d'analyse des systèmes informatiques de Rome (IASI). Le temps de résolution pour le problème à 16 villes n'est que de quelques millisecondes sur un ordinateur de bureau moderne, alors que l'énumération prendrait 92 heures.

Pourquoi le problème du voyageur de commerce est-il si compliqué ? Parce que sa résolution impose un très grand nombre d'inéquations. Ce nombre est-il vraiment à l'origine de sa difficulté ? En partie, certainement, car bien des problèmes d'optimisation combinatoire sont faciles à résoudre, alors que leurs polytopes exigent bien plus d'inéquations que le problème du voyageur de commerce.

Martin GRÖTSCHEL est professeur de mathématiques à Berlin et Manfred PADBERG est professeur à l'Université de New York.

E. BRADFORD, *Ulysses Found*, Harcourt, Brace & World, New York, 1963.

E. L. LAWLER et al. (Hrsg.), *The Traveling Salesman Problem. A Guided Tour of Combinatorial Optimization*, Wiley, Chichester, 1985.

Mechthild STOER, *Design of Survivable Networks*, in *Mathematics*, vol. 1531, Springer, Berlin, 1992.

Manfred PADBERG, *Linear Optimization and Extensions*, Springer, Berlin, 1995.

Michael JÜNGER, Gerhard REINELT et Giovanni RINALDI, *The Traveling Salesman Problem*, in *Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization*, Mauro Dell'Amico et al. (Hrsg), Wiley, Chichester, pp. 199-221, 1997.

David APPLIGATE et al., *On the Solution of Traveling Salesman Problems*, in *Documenta Mathematica*, Numéro spécial, *Proceedings of the ICM 98*, pp. 645-656, 1998 ; <http://www.mathematik.uni-bielefeld.de/documenta/vol-icm/ICM.html>.

Rainer BURKARD et al., *Well-Solvable Special Cases of the Traveling Salesman Problem : A Survey*, in *SIAM Review*, vol. 40, pp. 496-546, 1998.



L'art du pavage

IAN STEWART

Comment couvrir le plan avec un pavé pentagonal.

Les mathématiques et les arts se rencontrent souvent, grâce à la symétrie. La symétrie absolue manque de variété, mais elle peut constituer la base d'œuvres artistiques remarquables : les papiers peints, les tissus, les carrelages, les jardins ou les mosaïques ont souvent une beauté captivante. Pensons aux toiles de Victor Vasarely, aux superbes kimonos du Musée de Tokyo ou à l'Alhambra, à Grenade.

Bien que les bases mathématiques de la symétrie des pavages soient connues depuis longtemps, les artistes continuent d'innover. L'artiste britannique Rosemary Grazebrook, par exemple, a récemment exploré un système de pavage très simple et pratique, différent des pavés rectangulaires usuels.

La définition mathématique de la symétrie est simple, mais subtile : une symétrie d'une figure est une transformation qui laisse la figure globalement inchangée. Par exemple, une rotation de 90 degrés dans le sens des aiguilles d'une montre transforme un carré en un carré identique : cette rotation est une symétrie du carré. Une figure peut avoir plusieurs symétries, dont l'ensemble, muni de la loi de composition des transformations, est une structure mathématique de groupe (la composition est associative, admet un élément neutre, et tout élément possède un inverse).

Les pavages, maintenant, sont de plusieurs types. Celui qui a été le plus étudié est celui où les pavés forment un réseau régulier à deux dimensions. Curieusement les mathématiques des pavages furent d'abord explorées dans le cas difficile de l'espace à trois dimensions, celui des cristaux de sel, de sucre ou de tartre, et c'est seulement plus tard que les mathématiciens ont étudié l'espace à deux dimensions. En 1891, le cristallographe

russe E. Fedorov démontra que, pour les pavages du plan, il existe 17 groupes de symétries (voir la figure 2).

Ce résultat s'applique bien sûr aux papiers peints ou aux tissus, mais pourquoi, alors, les magasins d'ameublement proposent-ils tant d'échantillons différents ? Pourquoi existe-t-il tant de types de carreaux de salle de bain que les choix conjugaux deviennent souvent des scènes de ménage ? Dix-sept ne suffisent-ils pas ? Dans la plupart des cas, les différences tiennent à des caractéristiques telles que la couleur, la texture ou la nature des éléments de motifs ; la symétrie, elle, reste limitée. Par exemple, un carrelage de salle de bain composé de carreaux carrés ornés de l'image d'un canard a les mêmes symétries qu'un carrelage composé de carreaux carrés qui porteraient l'image d'une algue (à moins que le motif dessiné n'ait lui-même des symétries, qui s'ajoutent alors à celles des carreaux).

Nous n'examinerons pas ici certains pavages qui ont peu de symétries, tels les remarquables inventions du mathématicien Roger Penrose : ces pavages recouvrent entièrement le plan, mais ils ne sont pas périodiques. Les pavages que nous considérerons ici sont fondés sur une unité de base, une figure qui est répétée indéfiniment dans deux directions distinctes. Imaginons par exemple un carrelage composé de carreaux carrés tels qu'on en trouve dans tant de salles de bain. Sur un mur de salle de bain infini, le carreau carré se répète indéfiniment. Choisissons un carreau du carrelage : si l'on se déplace d'un nombre entier de côtés, verticalement ou horizontalement, on retombe sur un autre carreau identique au premier ; de même, on retrouve un carreau si l'on se déplace dans des directions intermédiaires, à condition que les déplacements verticaux

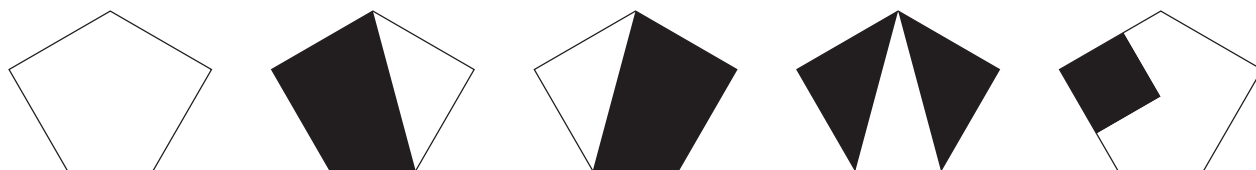
ou horizontaux soient égaux à un nombre entier de côtés.

Les droites verticales et horizontales qui joignent les centres des carreaux forment ce que l'on nomme un réseau. Les papiers peints ou les tissus ont une symétrie de réseau, car ils sont généralement réalisés à partir de grands rouleaux de papier ou de tissu, le long desquels une machine à tambour imprime un dessin. Lorsque le papier est collé sur un mur, ou quand des morceaux de tissus sont cousus ensemble, on raccorde généralement les bandes à leurs bords. On peut aussi décaler légèrement les bandes latéralement ou verticalement ; le réseau n'est alors plus carré.

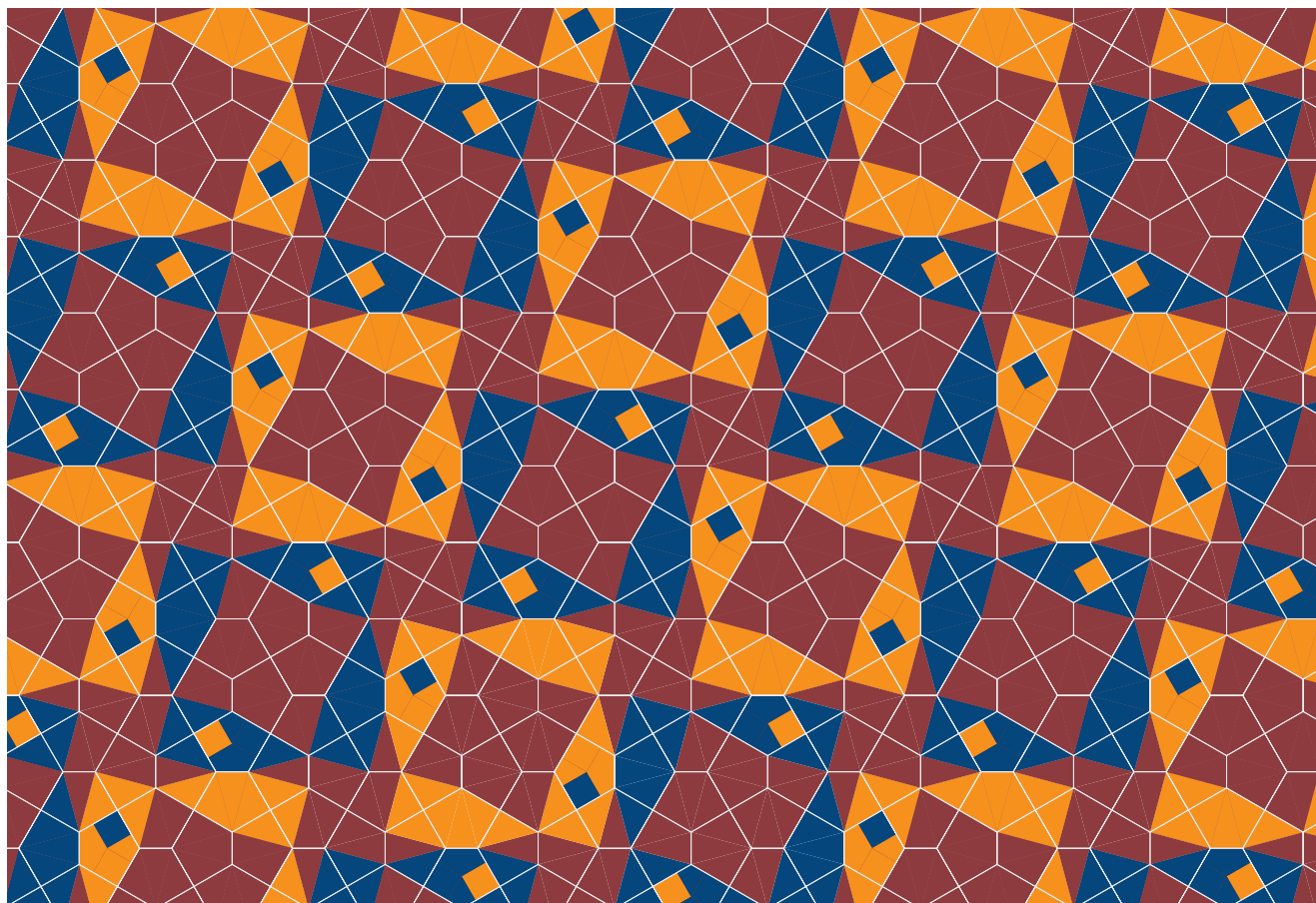
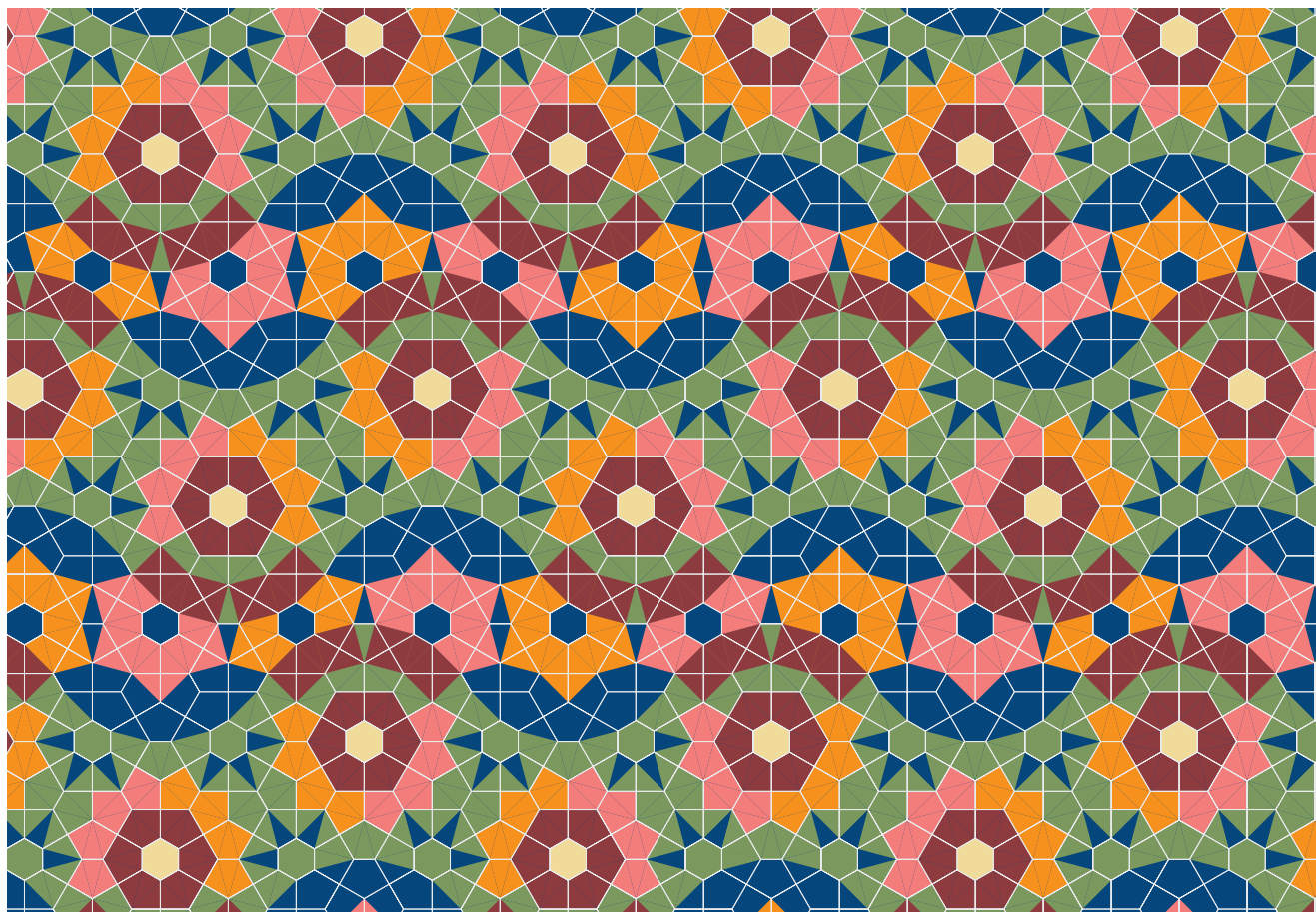
Cette structure de réseau ne s'impose pas pour les pavages, dont les pavés sont des unités indépendantes, mais elle reste pratique. Le réseau carré, par exemple, possède des symétries de réflexion autour de droites verticales, horizontales ou de direction diagonale et passant par le centre d'une maille ou par un sommet du réseau, ainsi que de rotations d'angle égal à 90 degrés. Un nid d'abeilles, dont les cellules sont des hexagones réguliers, est aussi un réseau, mais avec des symétries différentes, telles des rotations de 60 degrés.

R. Grazebrook a découvert que certains pavés pentagonaux peuvent engendrer une foule de réseaux différents. Les pavés qu'elle utilise ont deux angles égaux à 90 degrés et trois angles égaux à 120 degrés, de sorte qu'on peut les associer par quatre ou par trois (voir la figure 1).

On peut juxtaposer quatre des pavés pentagonaux de R. Grazebrook pour former un hexagone plus large que haut, avec lequel on peut paver le plan, et quand on utilise à la fois les pentagones



Des pavés pentagonaux colorés comme ci-dessus peuvent former un réseau quand on les associe à des hexagones réguliers (ci-contre en haut) ou quand on les juxtapose (ci-contre en bas).



PHOTOGRAPHIE DE ROBERTO GAZDAR



Algorithmes et Optimisation

Que vous soyez...

... affairiste notoire, politicien corrompu, sportif dopé, escroc rutilant... ou tout simplement prudent,

Cryptez vos données sensibles!

Belzebuth et la Société de Calcul Mathématique, SA, présentent

Sieve II le diabolique

La référence ultime en matière de cryptographie logicielle

• **simple d'installation** : Windows 95, 98, NT,

• **simple d'emploi** : mot de passe de 4 caractères,

• **inviolable** : Sieve II le diabolique utilise un procédé nouveau, le cryptage dynamique récursif, conçu par la SCM. Un prix de 10 000F est offert depuis deux ans à la première personne qui parviendra à décrypter le texte (écrit en français banal) qui accompagne le logiciel.

• **inconditionnellement garanti à vie**. Sieve II le diabolique crypte absolument tout : données (tout format), sons, images, exécutables, etc.

Livraison en recommandé, sous pli discret.

Prix de vente unitaire HT : 1 500F,
TTC : 1 809F.

(Pour quantités importantes, nous consulter)

BON DE COMMANDE

Je commande exemplaires du logiciel de cryptage Sieve II le diabolique, au prix de 1 809 F l'unité (1 500F HT).

NOM :

PRÉNOM :

ADRESSE DE LIVRAISON :

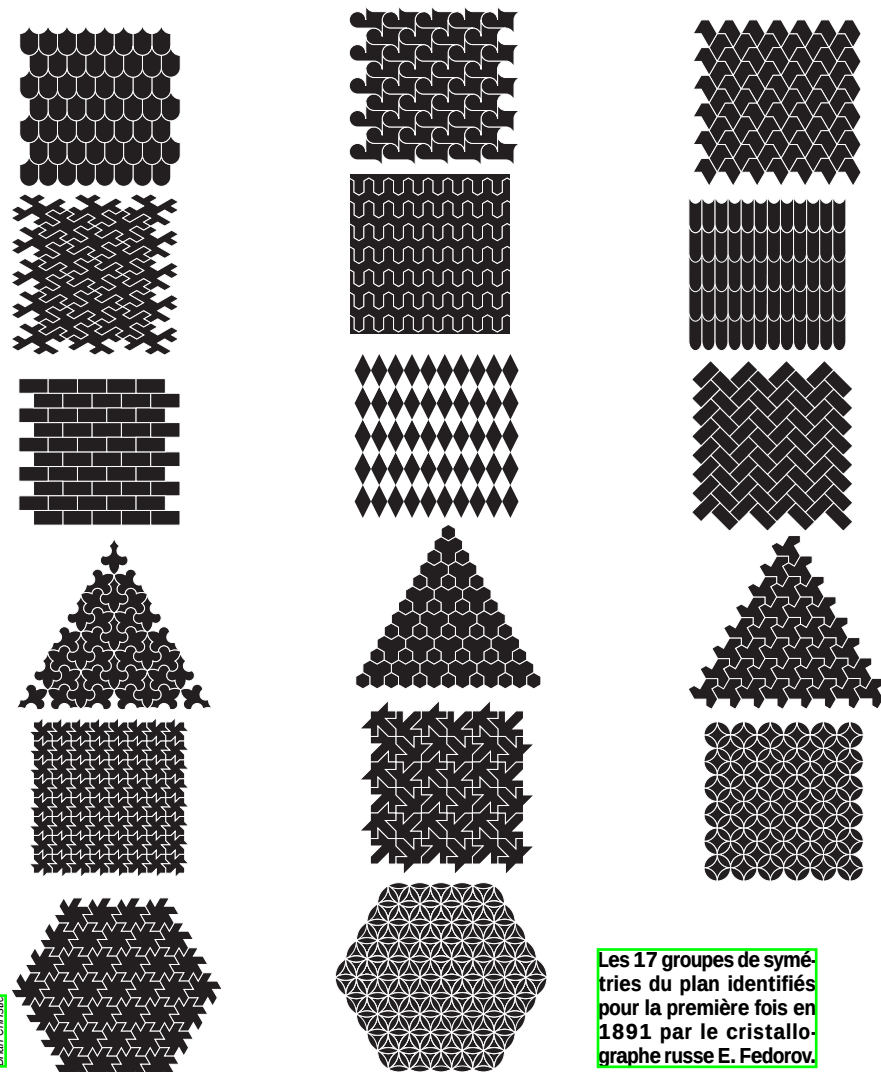
Bon à retourner, accompagné du règlement (chèque à l'ordre de SCM) à : Société de Calcul Mathématique, SA, 111, Faubourg Saint Honoré, 75 008 Paris.

de R. Grazebrook et des hexagones réguliers, on peut obtenir les 17 classes de symétries sauf une (Laquelle? Et comment obtient-on les autres? Je vous laisse le chercher).

R. Grazebrook doit l'idée initiale de ses pavages à Martin Gardner, qui fit les articles de la rubrique «Jeux mathématiques» de *Pour la Science* pendant des années. Elle étudiait l'art de l'Alhambra quand un article de Martin Gardner lui révéla les relations entre les motifs islamiques et les pavages du graveur Maurits Escher. Elle introduisit alors deux procédés distincts pour colorier ses pavés pentagonaux : soit en divisant les pavés en trois triangles (la série dite «Pentland»); soit en les divisant en quatre, (deux carrés, un quadrilatère en forme de cerf-volant et un pentagone plus petit, de la série «Penthouse»). On peut naturellement colorier les pavés pentagonaux de R. Grazebrook d'autres manières, mais ces deux séries seulement engendrent une surprenante variété de motifs.

Réactions

L'article sur les lancers de pièces et les dés (*Abrogeons la loi des moyennes*, juin 1998, p. 122) a intéressé Tom Guldbrandsen, de Lyngby, au Danemark. Supposons que nous lancions un grand nombre de fois un dé, et que nous notions le nombre de 1, de 2, ..., de 6 obtenus. Quelle est la probabilité que les six lancers soient en nombreux égaux, quand vient le n -ième lancer? T. Guldbrandsen a d'abord observé que l'égalité ne peut se produire qu'après 6, 12, 18... lancers : le nombre de lancers doit être un multiple de 6. Il a trouvé une formule qui donne, en fonction de n , la probabilité que les six totaux soient égaux. Comme cette égalité peut être vérifiée plusieurs fois, il a obtenu comme probabilité : 0,021903735824.



Les 17 groupes de symétries du plan identifiés pour la première fois en 1891 par le cristallographe russe E. Fedorov.



La fin de la lignée humaine?

JACQUES NINIO

Les mutations délétères semblent si nombreuses que la lignée humaine devrait être éteinte depuis longtemps. Où est l'erreur?

La science-fiction prête aux mutants des capacités extraordinaires. Pourtant, nous sommes tous des mutants, mais dans quelle proportion? Lorsqu'un enfant naît, il hérite d'un mélange de gènes de son père et de sa mère. En raison des erreurs de reproduction, quelques gènes de l'enfant diffèrent légèrement de ceux de ses parents. Ces erreurs, les mutations, sont des modifications localisées des séquences d'ADN, la molécule en double hélice qui constitue les gènes. Certaines mutations, nocives, finissent par être éliminées. D'autres sont bénéfiques et permettent une meilleure adaptation de l'espèce (voir la figure 1). Le plus souvent, elles sont sans effet.

Comment évaluer la fréquence des mutations? Une première méthode consiste à recenser les individus porteurs d'une anomalie génétique absente chez les parents. Les statistiques portent sur les anomalies les plus fréquentes : l'achondroplasie, l'hémophilie A ou la dystrophie musculaire de Duchenne. Pour ces anomalies, le taux de mutations est compris entre un et 5×10^{-5} par gène et par génération. Toutefois, on ne peut pas généraliser ces fréquences à l'ensemble des mutations du génome, car les anomalies génétiques demeurent anecdotiques : elles concernent peu d'individus et des portions très courtes de certains gènes (une dizaine de nucléotides sur le million que comporte le gène), de sorte que l'incertitude statistique est élevée.

Une évaluation plus sûre du taux de mutation est fondée sur le séquençage systématique d'un même gène chez un grand nombre d'individus et chez leurs parents. On recense chez les enfants les mutations dans un gène, puis on extrapole à l'ensemble du génome (voir la figure 2). Selon ces études, les biologistes estiment le taux M de mutations produites d'une génération sur l'autre à 10^{-8} par nucléotide et par génération, soit soixante mutations au total par

individu puisque le matériel génétique d'une cellule humaine comporte 23 paires de chromosomes, soit six milliards de nucléotides.

MUTATIONS TRANSITOIRES ET MUTATIONS FIXÉES

Les biologistes des populations évaluent différemment le taux de mutation. D'une part, la datation du plus jeune fossile connu commun à deux lignées indique quand ces lignées, deux espèces de singes par exemple, se sont séparées. D'autre part, on compare les séquences d'ADN actuelles de ces deux espèces. On déduit de ces mesures le taux moyen de mutations effectivement fixées au cours de l'évolution, qui se sont répandues dans une espèce. Ainsi, chez l'homme, en moyenne, deux mutations sont fixées par milliard de nucléotides et par an, ce qui, si l'on suppose

qu'une génération dure 20 ans, correspond à un taux extrapolé E_x de 4×10^{-8} mutations fixées par nucléotide et par génération.

De ce taux de mutations fixées dans l'espèce, comment déduit-on M , le taux qui nous intéresse, c'est-à-dire le taux de mutations produites «à la source» chez les individus? Le raisonnement nécessite l'examen du taux F de mutations fixées par un mécanisme purement aléatoire, en négligeant les effets de la sélection naturelle.

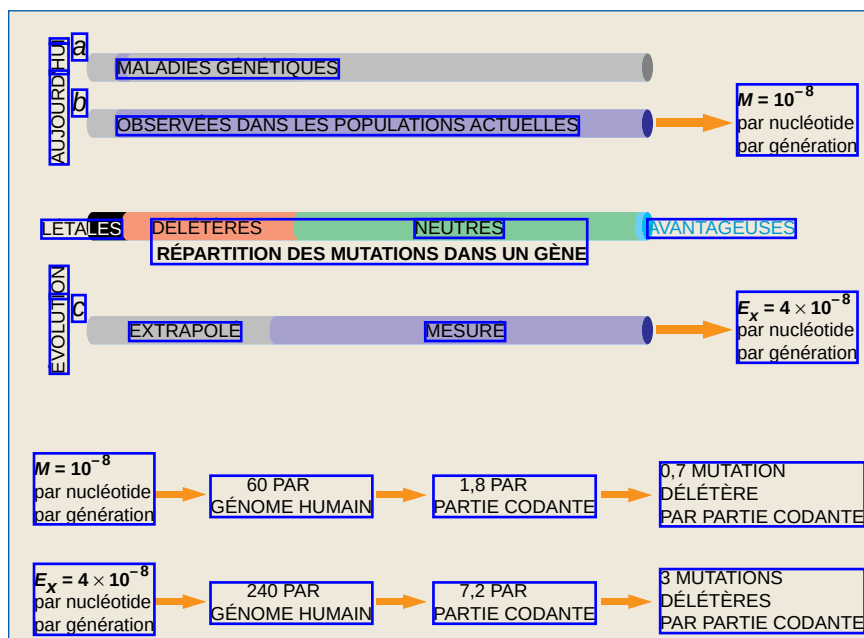
D'abord, on admet que, sur le long terme, le taux E de mutations effectivement fixées ne peut être supérieur au taux F de mutations fixées sans sélection naturelle : l'évolution trie et élimine, mais n'accroît pas la variabilité.

Chez les bactéries, la variabilité est faible, et la durée entre générations est courte. La sélection agit de manière féroce en éliminant toutes les mutations qui produiraient un désavantage, fût-il minime (E est bien inférieur à F). Chez l'homme, la variabilité est relativement grande, la durée entre les générations est longue, et quand au bout de quelques siècles ou quelques millénaires, la sélection a retenu une mutation avantageuse dans un gène, dix autres se sont fixées dans le même gène, mutations qui sont neutres ou légèrement délétères : la sélection naturelle n'a pas beaucoup joué et le taux de mutations effectivement fixées au cours de l'évolution est proche du taux sans sélection naturelle (E est proche de F).

Par ailleurs, les biologistes des populations supposent que le taux F des mutations qui se seraient fixées sans sélection est égal au taux M de mutations produites. C'est un résultat intouchable de la théorie de l'évolution, au cœur de la génétique des populations actuelle. Cette égalité théorique relie les données mesurées sur les espèces (comparaison des séquences) aux données sur la production des



1. Les mutations, dues à des modifications de l'ADN, sont la source de diversité entre les espèces, par exemple entre le premier mouton domestique d'il y a 8 000 ans, dont le mouflon de Corse (en haut) est le descendant direct, et le mouton à laine mérinos (en bas), race apparue au Moyen Âge.



2. Pour estimer le taux de mutation, on analyse les maladies génétiques, mais ces maladies concernent une toute petite partie du génome (a) et il est difficile de généraliser à l'ensemble du génome. On répertorie aussi les mutations entre parents et enfants (b). On en déduit M , le taux de mutation observé dans la population actuelle. Par ailleurs, les biologistes des populations estiment E_x le taux des mutations qui se sont fixées au cours de l'évolution (a). Étrangement, on trouve E_x est supérieur à M , ce qui signifierait que les mutations s'installent plus vite qu'elles ne se créent.

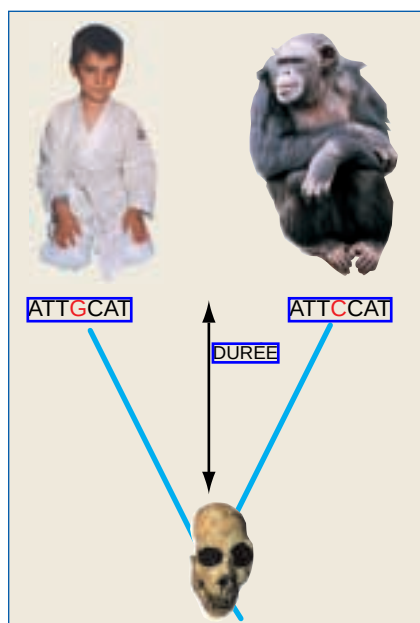
mutations à la source. Intuitivement, lorsque vous comparez l'un de vos gènes à celui d'un ancêtre d'il y a un million d'années, les différences sont d'une part dues aux mutations bénéfiques sélectionnées et conservées au cours du temps (une faible fraction du total), d'autre part, et pour l'essen-

tiel, aux mutations produites dans la descendance et qui n'ont pas eu d'effet sélectif. Cette égalité suppose, entre autres, que les mutations se produisent indépendamment.

Finalement, ce raisonnement aboutit à un taux de mutations fixées au cours de l'évolution égal au taux de mutations produites (E est égal à M). Or, le taux des mutations fixées fourni par l'évolution moléculaire ($E_x = 4 \times 10^{-8}$ mutation par nucléotide et par génération) est de deux à quatre fois supérieur au taux des mutations produites fourni par la génétique (M). Certes, ces deux valeurs sont incertaines, mais, même en tenant compte des incertitudes, un écart d'un facteur au moins deux demeure : les mutations s'installent (critères d'évolution moléculaire) plus vite qu'elles ne sont produites (critère génétique). Où est l'erreur?

HYPOTHÈSES ERRONÉES?

Le taux de mutations produites mesuré par la génétique (M) me semble correct, mais le raisonnement qui permet de relier E à M est suspect. Les hypothèses de travail de la biologie des populations pourraient être remis en cause, notamment celle selon laquelle les mutations surviennent indépendamment. Souvent, dans un intervalle de deux ou trois générations, deux mutations différentes



3. Les biologistes des populations comparent l'ADN de deux espèces dont on peut dater un ancêtre commun grâce à l'étude de fossiles. De la sorte, on estime le taux des mutations qui se sont installées au cours de l'évolution.

apparaissent sur un même gène, chez deux individus d'une petite population humaine. Or, si les mutations survenaient de manière indépendante, de telles occurrences seraient rarissimes.

Les généticiens des populations ne tiennent pas compte des mécanismes génétiques qui violent l'indépendance des mutations et les concentrent en certaines régions du génome. Comme ils estiment que leur évaluation du taux de mutations fixées (E_x) est fiable, ils concluent que l'estimation du taux de mutations engendrées (M) est erroné (ce qui n'est nullement exclu). En suivant ce raisonnement, on aboutit à un taux de mutation chez l'homme qui serait supérieur ou égal à 4×10^{-8} par nucléotide et par génération. D'où 240 mutations par génération, dont sept à huit, à chaque naissance, dans les régions codantes.

Selon une récente étude tirée des comparaisons de séquences dans un gène, 40 pour cent des mutations seraient délétères. C'est la mesure «en négatif» des mutations manquantes que l'on aurait dû trouver, et qui ont donc été éliminées. Ainsi, à chaque naissance, trois à quatre mutations sont désavantageuses. Le généticien des populations James Crow, de l'Université du Wisconsin, estime que chaque mutation délétère doit être éliminée par une mort prématurée ou par des chances de reproduction diminuées. Ce qui implique trois morts «génétiques» par personne! Pourquoi l'espèce humaine n'est-elle pas éteinte?

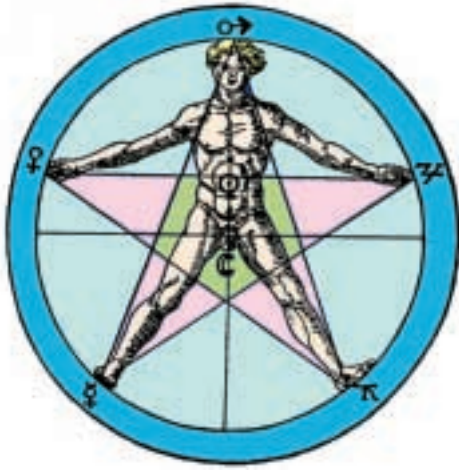
J. Crow invoque la reproduction sexuée, qui dilue les mauvais gènes, et inversement, des interactions entre mauvais gènes qui les élimineraient par paquets. Si ces effets jouent dans le sens voulu, ils ne me semblent pas suffisamment efficaces pour éliminer la difficulté. Pour l'avenir de l'espèce humaine, espérons que les généticiens des populations se trompent, lorsqu'ils passent des taux de mutations fixées aux taux de mutations produites.

Jacques NINIO est physicien au Laboratoire de physique statistique de l'École normale supérieure de Paris.

J.F. CROW, *The odds of losing at genetic roulette*, in *Nature*, vol. 397, pp. 293-294, 1999.

J. FEINGOLD, *Mutations multiples d'un même gène dans les petites populations*, in *Compte rendus de l'Académie des sciences, Sciences de la vie*, vol. 321, pp. 553-555, 1998.

J. NINIO, *The evolutionary design of error-rates and the fast fixation enigma*, in *Origins of Life*, vol. 27, pp. 609-621, 1997.



La numérologie du nombre d'or

JEAN-PAUL DELAHAYE

La géométrie ne donne pas le secret du beau : le chemin des mathématiques à la numérologie est dangereux, parce que riche en surinterprétations.

Le nombre d'or est la constante $\Phi = (1 + \sqrt{5})/2 = 1,61803...$, affublée d'autres dénominations aux relents mystiques telles que section dorée ou divine proportion. La notation Φ , introduite par Théodore Cook en 1914, est commode ; nous l'utiliserons pour traiter des périodes antérieures. Contrairement au nombre π , le symbolisme n'en est pas fixé : à la place de Φ , vous trouverez parfois la notation τ ou ϕ .

Pourquoi existe-t-il plus de livres sur le nombre d'or que sur n'importe quel autre nombre ? Aurait-il des propriétés mathématiques exceptionnelles qui le rendraient plus important que ses concurrents directs : $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, $\sqrt{5}$, π ou e ? A-t-il été utilisé par les Égyptiens pour dessiner le plan de la grande pyramide ? Les Grecs ont-ils conçu la façade du Parthénon en utilisant ses propriétés ? Était-il un canevas secret pour Léonard de Vinci ou d'autres peintres ? La taille d'un être humain bien proportionné est-elle Φ fois la hauteur de son nombril ? Plus généralement, les canons du beau doivent-ils s'appuyer sur Φ ? La réponse à ces questions ne peut être impulsive. Le plus difficile sera de comprendre que répondre oui à certaines n'oblige pas à répondre oui aux autres.

EUCLIDE ET LES GÉOMÈTRES ANTIQUES

L'histoire de Φ commence trois siècles avant notre ère, à une époque où on ne le considérait pas comme un nombre : pour Euclide, comme pour tous les Grecs de son époque, seuls les entiers sont des nombres, et les rapports entre grandeurs, surtout les rapports irrationnels comme $\sqrt{2}$ ou Φ , sont traités avec prudence.

Euclide, dans ses célèbres *Éléments*, aborde le problème du partage d'un segment AB par un point C qui le coupe « en extrême et moyenne raison », ce qui signifie par le point C tel que $AB/AC = AC/CB$. La solution avec nos notations modernes s'obtient en posant $AB/AC = x$. Puisque $AC + CB = AB$, $(AC + CB)/AC = AC/CB$,

et donc x doit vérifier $1 + 1/x = x$, ou encore $x^2 - x - 1 = 0$. Cette équation du second degré a une racine positive, $\Phi = (1 + \sqrt{5})/2$, soit 1,61803... et une racine négative, $\Phi' = (1 - \sqrt{5})/2$, soit -0,61803...

De cette définition de Φ , il résulte immédiatement que : $1/\Phi = \Phi - 1$, $\Phi^2 = \Phi + 1$. Pour connaître l'inverse de Φ , il suffit de lui soustraire 1 ; pour connaître son carré, il suffit de lui ajouter 1. Certes, le fait est amusant et remarquable, mais c'est une conséquence immédiate de la définition, comme il résulte de la définition de $\sqrt{2}$ que $1/\sqrt{2} = \sqrt{2}/2$ (l'inverse de $\sqrt{2}$ est la moitié

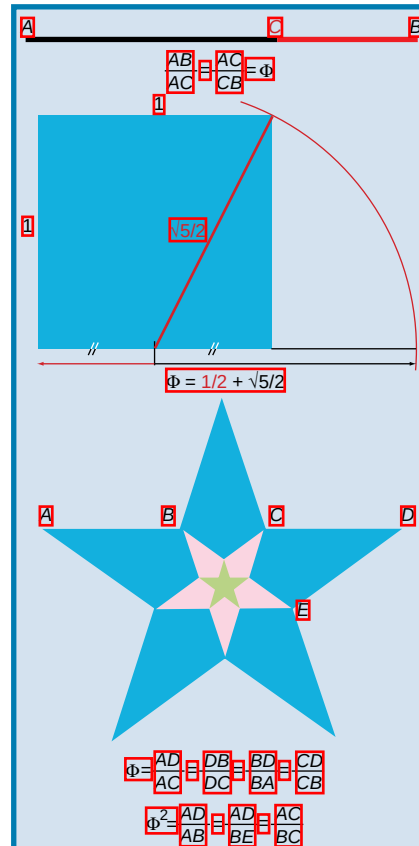
de $\sqrt{2}$), ce qui est aussi amusant et remarquable, mais pas magique !

Euclide utilise ce rapport pour construire des pentagones et formuler des propriétés du dodécaèdre et de l'icosaèdre. Ces liens ne sont rien d'autre que l'analogue de ceux qui existent entre $\sqrt{2}$ et le carré (la diagonale d'un carré de côté unité vaut $\sqrt{2}$), et le cube (dont les faces sont des carrés), ou l'analogue des liens qui existent entre $\sqrt{3}$ et le triangle équilatéral (la hauteur d'un triangle équilatéral de côté unité est $\sqrt{3}/2$), l'hexagone (décomposable en triangles équilatéraux), le tétraèdre (dont les faces sont des triangles équilatéraux), l'icosaèdre (pour la même raison), et le cube (la diagonale d'un cube de côté unité est $\sqrt{3}$).

La structure de notre espace et la géométrie élémentaire tissent ces liens qui n'ont rien de secret, ni de mystique. Vraisemblablement ce partage en extrême et moyenne raison était connu des pythagoriciens, et certains font remonter l'apparition de Φ à la Haute-Égypte, mais sans le moindre indice sérieux.

Euclide étudie par jeu et pour le plaisir les découpages en extrême et moyenne raison qui sont le sujet d'exercices de géométrie. La proposition III du livre XIII énonce par exemple que : une ligne est coupée en extrême et moyenne raison, le carré du plus petit segment, augmenté de la moitié du plus grand segment, est égal au quintuple du carré de la moitié du plus grand segment, ce qui traduit, avec nos notations, donne : $(1 + \Phi/2)^2 = 5 (\Phi/2)^2$ qui, en développant, devient $1 + \Phi + \Phi^2/4 = 5\Phi^2/4$, relation équivalente à $\Phi^2 = \Phi + 1$. Aucun commentaire admiratif ou esthétique n'accompagne l'utilisation de ce rapport de grandeur qui n'est, pour Euclide, qu'un outil commode.

Le livre de Roger Herz-Fisher (1987, 1998, Dover Publication, New York) retrace dans le détail et avec une étonnante érudition cette aventure du « rapport en extrême et moyenne raison » chez les géomètres jusqu'au XIX^e siècle. Loin d'être une pièce centrale de la science mathé-



1. Φ et la symétrie d'ordre cinq. Euclide utilise le découpage en extrême et moyenne raison. On indique ici la construction géométrique de Φ et les propriétés du pentagone étoilé.

matique qui s'élabore, Φ n'apparaît souvent qu'au détour d'une figure ou d'une équation que, rétrospectivement, nous interprétons comme liée à lui. Aucun mysticisme ne lui est attaché. Le nombre Φ est la solution d'une équation du second degré, alors qu'en revanche les nombres π et e , ne le sont pas puisqu'ils sont transcendants (un nombre transcendant n'est racine d'aucune équation polynomiale quel qu'en soit le degré).

UN MOINE GÉOMÈTRE

La naissance de Φ comme objet d'attention particulière et de culte est due au moine franciscain Luca Pacioli (vers 1445-1514), qui écrit à Milan, en 1498, un ouvrage qui lui est consacré, intitulé *De divina proportionne*. Il fait un usage géométrique systématique du partage en extrême et moyenne raison dont, en bon professeur de théologie, il remercie Dieu en qualifiant ce partage de divin (d'où le titre de son ouvrage), en particulier à cause de ses relations avec le dodécaèdre qui, chez Platon, représente l'Univers. Léonard de Vinci dessinera pour cet ouvrage soixante polyèdres. Deux annexes seront ajoutées plus tard, l'une traitant d'architecture et l'autre des proportions du corps humain. Ces annexes ne mentionnent pas la divine proportion, à laquelle Pacioli n'attribue aucune propriété esthétique particulière.

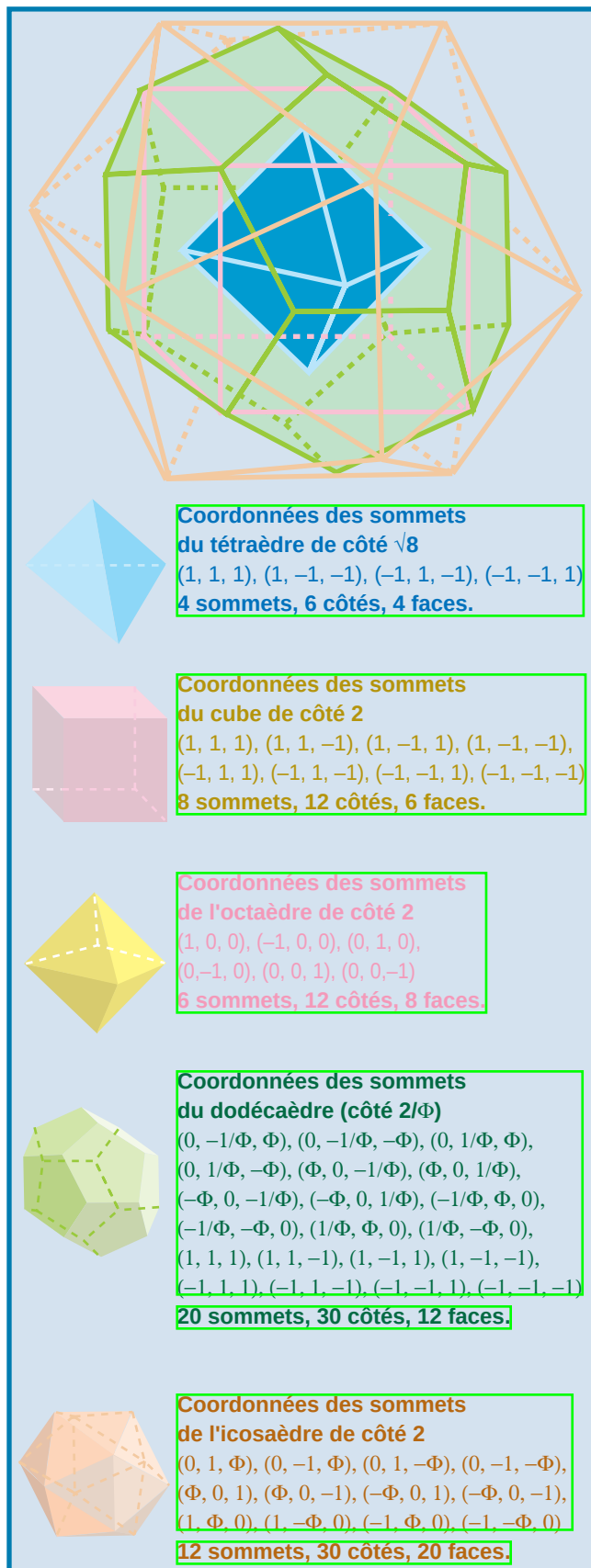
Léonard de Vinci, dans son traité de la peinture, ne mentionne pas la divine proportion lorsqu'il traite de composition ou du corps humain. Le fameux homme vitruvien de Léonard de Vinci, qui sert d'emblème à une société de travail par intérim, ne se fonde pas sur la divine proportion, comme on l'a parfois prétendu, mais sur un cercle, un carré et des divisions en quarts et huitièmes.

En cherchant bien, on peut prétendre que certaines œuvres de cette époque, ou même plus anciennes, ont été conçues en s'appuyant sur un découpage géométrique du tableau ou de ses éléments (personnages, objets, etc.) utilisant la divine proportion, mais aucun traité de peinture ou d'architecture de cette époque ne mentionne ce mode de découpage, alors qu'on en cite bien d'autres utilisant des rapports entre nombres entiers $5/8$, $2/3$, etc.

À cette époque aussi, les théoriciens formulent de nombreux canons pour dessiner le corps humain, mais toujours fondés sur des rapports de nombres entiers. Dans son traité des proportions, Lomazzo (1649) indique, par exemple, que le corps doit être 7,5 fois plus grand que la tête. Alberti, dans son ouvrage *Della re aedificatori*, publié en 1485, fonde sa théorie des proportions sur les rapports musicaux : $1/2$, $3/4$, $2/3$, $4/6/9$, $9/6/16$, etc. Les artistes et maçons du Moyen Âge utilisent de nombreux procédés pour structurer les tableaux et les vitraux. Des triangles équilatéraux, des carrés posés sur la pointe, des octogones, des hexagones sont fréquemment utilisés. Plus rarement, on se sert de pentagones, et alors naturellement, apparaissent des rapports utilisant $\sqrt{5}$, et donc la divine proportion, dont la présence n'est que la conséquence naturelle de l'utilisation d'une symétrie d'ordre cinq.

Alberti et Dürer montrent qu'il n'existe pas de règle unique : personne à cette époque ne soutient que la divine proportion doit organiser les compositions géométriques. C'est une affirmation gratuite et infondée que de prétendre qu'au sein de sociétés occultes s'est transmise une «tradition égyptienne» pour composer des œuvres architecturales ou picturales à partir de la divine proportion.

Le mythe d'un secret de la beauté cachée dans Φ apparaît au XIX^e siècle en Allemagne, où Adolf Zeising (1810-1876), professeur de philosophie à Leipzig et à Munich, défend une théorie qui met en avant la section dorée et l'érige en norme esthétique. Il applique sa théorie à la morphologie, aux temples grecs, aux cathédrales, aux tableaux de Raphaël. Sûr de son



2. Quatre des cinq solides platoniciens emboîtés les uns dans les autres. Les coordonnées des cinq polyèdres réguliers peuvent toutes être exprimées uniquement à partir de 1 et Φ (à condition toutefois de choisir une arête de longueur $2\sqrt{2}$ pour le tétraèdre, 2 pour le cube, $\sqrt{2}$ pour l'octaèdre, $2/\Phi$ pour le dodécaèdre, 2 pour l'icosaèdre).

fait, il prévient qu'il ne faut pas se laisser décourager si le sujet ne semble présenter aucun point commun avec cette loi : bien au contraire, recommande-t-il, il faut poursuivre l'investigation. Ce conseil a été largement suivi... d'effets désastreux.

Sa théorie sera reprise et poussée à son paroxysme au xx^e siècle, conduisant aux plus ridicules affirmations et à une révision rétrospective de l'histoire de l'art, que certains voudront repenser uniquement en fonction de Φ . Cette théorie esthétique et bientôt mystique du nombre d'or a un grand prêtre, le diplomate roumain Matyla Ghyka, qui publia plusieurs traités sur la question, ouvrages dont le sérieux historique est aujourd'hui fortement mis en doute.

Cet engouement quasi religieux a donné naissance à une multitude d'ouvrages qui, s'appuyant sur quelques propriétés mathématiques (bien réelles) et une reconstruction historique (elle, imaginaire), en déduisent une vision philosophique et superstitieuse que l'historien de la géométrie Roger Hertz-Fishler qualifie de «numérologie d'or».

Ces ouvrages répètent les mêmes erreurs historiques et les mêmes excès d'interprétation. On y attribue par exemple à Léonard de Vinci une conception esthétique basée sur la divine proportion que rien n'atteste. On propose, à l'aide de découpages arbitraires (rarement simples) et parfois truqués (on arrondit les mesures), de voir dans le plan des monuments antiques ou dans les tableaux des grands maîtres, ou même dans les œuvres de Mozart, des divisions selon la section dorée qui n'y sont vraisemblablement pas.

A propos du Parthénon d'Athènes, j'ai remarqué que certains utilisent trois marches pour en inscrire la façade dans un rectangle d'or (aux proportions $\Phi : 1$). D'autres en prennent quatre, et auraient donc dû échouer, mais miracle, ils réussissent aussi, car ils s'autorisent un peu plus de largeur!

LA GUÉRITE AUSSI

Jean-Pierre Adam, dans son ouvrage *Le passé recomposé : chroniques d'archéologie fantastique* (Éditions du Seuil, 1988), a démontré le manque de fondement et l'absurdité de ces reconstructions *a posteriori* qui contredisent le plus souvent ce qu'on sait par ailleurs. Les *Dix livres d'architecture* de Vitruve écrits sous le règne d'Auguste, au I^e siècle, nous instruisent sur les méthodes et les techniques de l'architecture antique, fondées sur les rapports entiers. Pour tester la technique des décrypteurs de secrets, J.-P. Adam a recher-

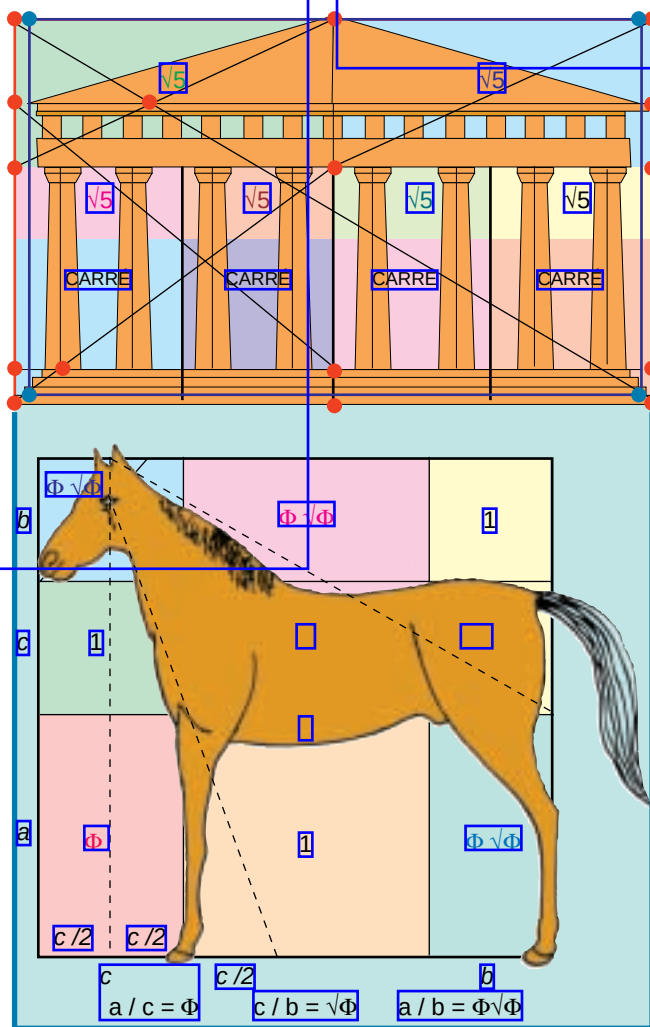
ché dans les dimensions de la guérite de la marchande de billets de la Loterie nationale de l'avenue de Wagram, à Paris, s'il n'y avait pas d'intéressantes relations géométriques. Il a ainsi découvert que le rapport entre la hauteur sur la largeur de la fenêtre arrière est miraculeusement 3,142, soit à peu de chose près le nombre π . Il y a aussi trouvé dans l'épaisseur de la tablette 149 le même nombre (aux unités près) que celui qui donne la distance de la Terre au Soleil. Ailleurs encore, il a repéré la date de la bataille de Poitiers et la formule chimique de la naphthaline. Je ne doute pas qu'un peu d'attention lui aurait fait découvrir la section d'or.

Φ est d'ailleurs dans cette guérite car, d'après Franc Lonc, π vaut exactement $6\Phi^2/5 = 3,141640$ (pour cet illuminé, c'est la vraie valeur de π) : dès qu'on découvre π , on découvre donc Φ et réciproquement, et donc Φ est inscrit dans la guérite. Remarquons que les spécialistes, là encore, ne s'accordent pas sur le rapport entre Φ et π , car certains prétendent qu'en fait $\pi = 4/\sqrt{\Phi} = 3,14460...$

Aucune de ces relations bien sûr n'est vraie. D'une part, les développements numériques de tous ces nombres montrent qu'aucune telle égalité n'existe ; d'autre part, si de telles relations étaient vraies, π ne serait pas transcendant (or cela est démontré depuis 1882). Rien de ce que l'on sait ne permet d'affirmer que les dimensions des pyramides et des temples égyptiens sont fondées sur le nombre d'or ou sur π . Tout juste pour certaines constructions peut-on raisonnablement faire l'hypothèse que leur forme géométrique se déduit du triangle rectangle de côtés 3, 4, 5.

Pour les défenseurs des théories du nombre d'or, tout dans l'art s'y ramène, et mieux, tout dans la nature y est secrètement rattaché. Le plus ridicule y côtoie parfois le plus sordide et c'est ainsi que, dans l'un de ces ouvrages médiocres écrit dans les années 1940 (de Neroman, Devry-Livre, 1945, 1981), on trouve une comparaison raciale basée sur la mesure de la hauteur du nombril.

Plus le nombril est situé à une hauteur proche de celle correspondant à la division en extrême et moyenne raison, plus, d'après Neroman, la «race» doit être considérée comme évoluée. L'auteur explique : «Il convient de remarquer que l'écart en dessous signifie que les jambes sont trop courtes par rapport au buste ; or ceci est propre aux adolescents qui n'ont pas atteint leur taille définitive :



3. Le Parthénon et le cheval. H. Huntley propose de faire entrer la face avant du Parthénon dans un rectangle d'or. Pour cela, il ajuste un rectangle qui frôle le toit, mais n'inclut que trois des quatre marches du socle de l'édifice (en bleu). M. Ghyka propose un autre encadrement qui s'ajuste moins bien au toit, mais inclut cette fois les quatre marches (en rouge). Ces deux preuves que le rectangle d'or a été utilisé pour concevoir le plan du Parthénon se contredisent : on ne peut ajuster un rectangle d'or simultanément avec le toit et la base. Pourtant cet exemple est cité dans tous les livres défendant l'idée que le nombre d'or, secret du beau, était utilisé par les Grecs. Les défenseurs de la théorie esthétique du nombre d'or tentent, à toute force, de prouver que la nature utilise Φ pour fixer les proportions des êtres vivants. Les schémas proposés sont souvent compliqués et peu convaincants. La prétendue «analyse harmonique» du cheval utilise non seulement Φ , mais aussi $\sqrt{\Phi}$ et $\Phi\sqrt{\Phi}$, ce qui laisse dubitatif.

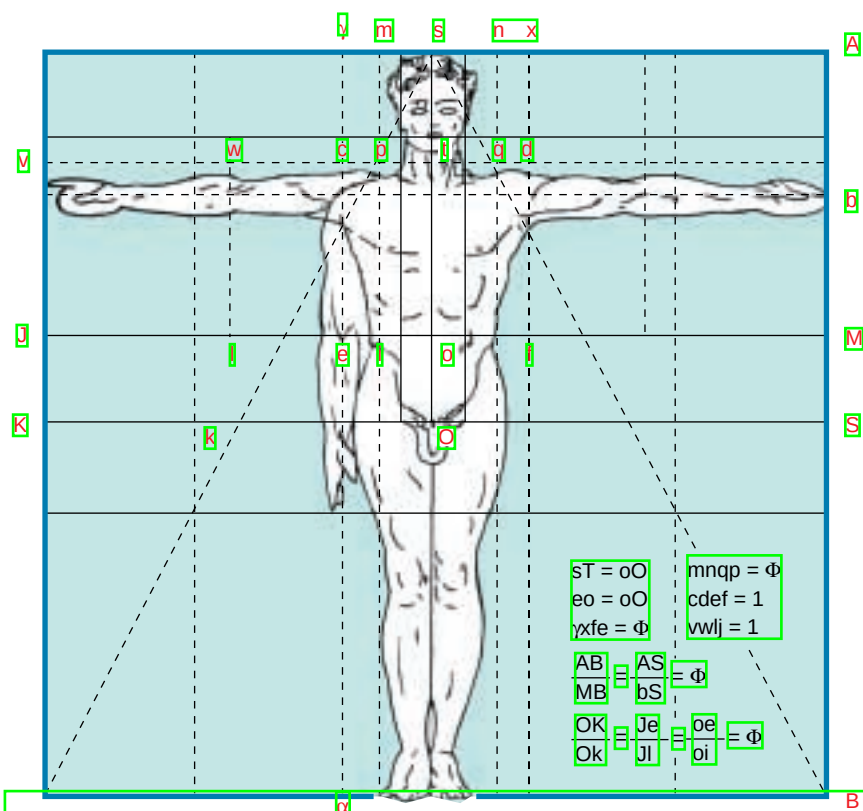
les jambes très courtes croissent plus vite que le buste, jusqu'à ce que la proportion normale soit atteinte, et par conséquent le rapport entre la hauteur du nombril et la taille croît constamment de la naissance à la puberté ; il atteint sa «valeur d'or», celle de la divine proportion, en même temps que sa taille définitive, en sorte que cette valeur apparaît comme une limite vers laquelle la nature tend, pouvant l'atteindre, mais non pas la dépasser. [...] Le symbolisme impose cette conclusion : s'il existe une race dont le nombril est trop bas pour la grande majorité des individus, cette race n'a pas encore atteint l'âge de sa maturité.» Dans le classement par hauteur du nombril, l'auteur en relève trois : «la Hottentote métissée de la tribu Korama, la Tamoule de Ceylan, la Wende de race slave ; toutes les autres ont le nombril trop bas, et cet écart sur la divine proportion est surtout accusé chez la juive, et chez la jeune Négrille de l'Afrique équatoriale». Ainsi, le nombre d'or, manipulé sans précaution dans ce délire que nul mathématicien et nul historien des sciences ne cautionneront jamais, est mis au service des causes les plus sinistres.

LE NOMBRE D'OR DANS LA NATURE ?

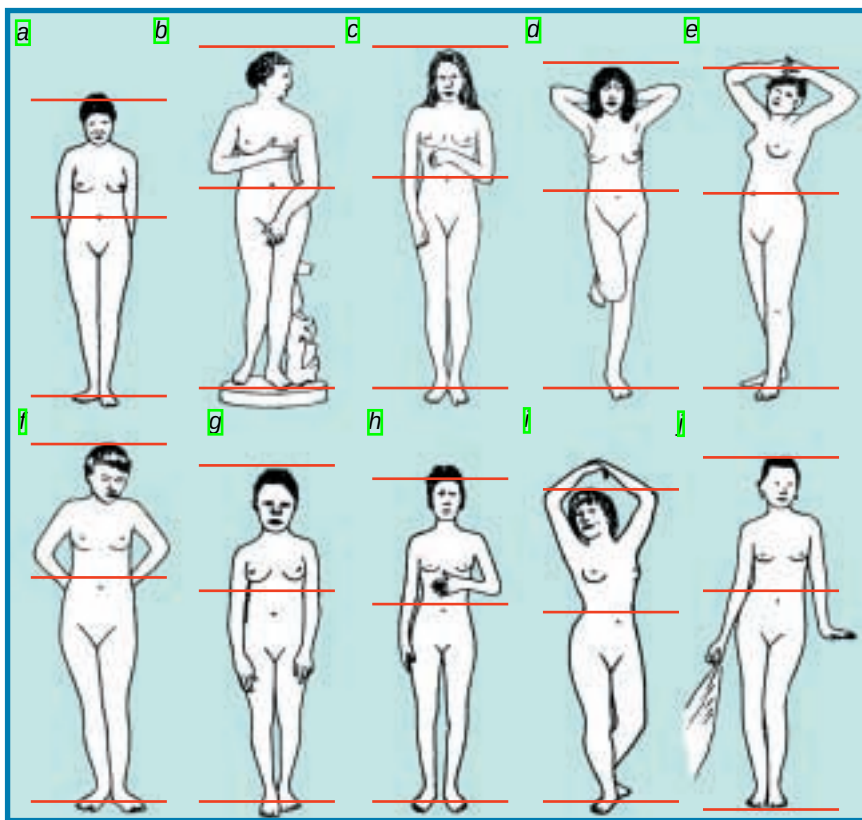
Malgré tout, faut-il se poser la question de savoir si le nombre d'or possède une valeur esthétique particulière ? Pourrait-on mener des expériences objectives ? Est-il vrai par exemple qu'un rectangle ou une croix ayant des proportions $1 : \Phi$ sera considéré comme plus beau ?

Des expériences faites sur cette question montrent que la réponse est non. La croix préférée d'après des études de Gustav Fechner est la croix où la barre verticale recoupe la barre horizontale à la moitié, les rapports venant ensuite étant $4/7$, $5/9$, $5/8$. Pour les rectangles, l'étude des tableaux présents dans les musées européens montre que le châssis le plus employé est le châssis $4/3$ pour les tableaux en largeur, et le châssis $4/5$ pour les tableaux en hauteur. Récemment, George Markowsky a mené une expérience systématique dans laquelle il présentait 48 rectangles différents à des sujets qui devaient indiquer celui qu'ils trouvaient le plus beau. Le rectangle le plus souvent retenu est celui de proportion $1,83 : 1$, loin devant ceux correspondant à Φ et $1/\Phi$ qui étaient aussi proposés.

Les objets quotidiens confirment que le rectangle d'or n'est pas préféré. Les formats normalisés des papiers européens A1, A2, A3, A4 (le fameux $21/29,7$ que nous utilisons tous) correspondent à un rectangle de proportion $\sqrt{2} : 1$. Ces formats se déduisent les uns des autres par décou-



4. «Analyse harmonique» du corps humain : on trouve Φ partout en traçant des traits ad hoc.



5. Des mathématiques au racisme : où peut mener Φ ! La théorie esthétique de la divine proportion permet à ceux qui y croient non seulement de lire le secret de la nature, mais aussi d'évaluer le degré de perfection de ses créatures. D. Neroman pensait que le nombril devait diviser la hauteur d'un être humain exactement selon la divine proportion. Sa théorie devient inquiétante lorsqu'il l'utilise pour évaluer le degré de maturité des «races». (a) Femme hottentote métissée, (b) La Vénus de Médicis, (c) Femme tamoule (Ceylan), (d) Jeune femme arabe de Tunis, (e) Femme wende (slave), (f) Cinghalaise de Ceylan, (g) Jeune Négrille (Afrique équatoriale), (h) Femme amahara (Abyssinie), (i) Femme juive, (j) Jeune siamoise.

de tout : des ribambelles de rectangles et de lignes du même genre construits avec n'importe quel nombre feraient aussi bien l'affaire !



d'utilisation du nombre d'or est le tableau de Salvador Dali *Sacrement de la dernière cène* (National Gallery Washington Collection Chester Dale). Dans le cas de Dali, cette utilisation est un jeu.

page en deux (le rectangle $\sqrt{2} : 1$ est le seul qui, lorsqu'il est coupé en deux par le milieu, donne deux rectangles semblables au rectangle initial). Pas plus que le format de papier américain, ou celui de cette revue, les rectangles utilisés pour les écrans de cinéma et de télévision etc., ne sont des rectangles d'or. Le format des cartes de crédit s'en approche, mais reste une exception.

Même si, objectivement, le rectangle d'or ne possède pas de propriétés esthétiques exceptionnelles, rien n'interdit à ceux qui pensent le contraire de les utiliser comme des canevas préparatoires à leurs toiles ou aux plans de leurs constructions. C'est d'ailleurs ce qui se produit, et c'est pourquoi de nombreuses œuvres d'art utilisent le nombre d'or. Le tableau de Salvador Dali *Sacrement de la dernière cène* est l'une de ces œuvres bâties sur le nombre d'or (il contient d'ailleurs un dodécaèdre). D'autres comme *Le repas chez Levi* de Véronèse, *La résurrection* du Tintoret, par exemple, semblent aussi conçus en utilisant aussi un découpage fondé sur Φ . Au début du siècle, Φ a d'ailleurs été explicitement au centre des préoccupations des peintres Maurice Denis, Paul Sérusier, Juan Gris, Seurat, Puvis de Chavannes qui l'utilisèrent. La théorie esthétique du nombre d'or en peinture est un bel exemple de théorie auto-réalisatrice : le seul fait de l'énoncer et d'y croire fait qu'on l'applique et donc la rend vraie, du moins partiellement.

Les théories esthétiques du nombre d'or gênent par leur côté totalitaire et exclusif. D'autres théories esthétiques plus ouvertes, comme celles de Jay Hambridge et d'Edwards B. Edwards aux États-Unis, ont accordé autant d'importance aux autres nombres irrationnels élémentaires $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ ou $\sqrt{5}$ et ont suggéré d'exploiter les propriétés spécifiques clairement identifiées des rectangles fondés sur ces nombres. De telles théories, à conditions qu'elles ne prétendent pas interdire l'utilisation de divisions par des rapports entiers (eux aussi intéressants), sont utiles et conduisent incontestablement à d'intéressantes réussites picturales. Ces considérations esthétiques ne sont pas absurdes, ramenées à leurs justes, mais non divines, proportions.

CONSTANTES FRÉQUENTES

Finalement, en mathématiques et en science, le nombre d'or est-il important ? Le nombre d'or est naturellement associé à certaines figures géométriques simples, mais aussi à d'autres situations qui n'ont rien à voir avec la géométrie. Comme chacun le sait, la suite de Fibonacci 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13... (chaque terme est obtenu

8. LE NOMBRE D'OR ET FIBONACCI

La suite de Fibonacci est définie par $F_1=1$, $F_2=1$, $F_3=2$, $F_4=3$, $F_5=5$, $F_6=8$, $F_7=13$... Chaque élément est la somme des deux précédents. Cette suite possède de nombreux liens avec le nombre d'or.

(a) La limite

La limite, quand n tend vers l'infini, de F_{n+1}/F_n est Φ : une bonne approximation de Φ est donnée par le quotient F_{n+1}/F_n . Ainsi $13/8 = 1,625$, alors que $\Phi = 1,6181339$...

(b) Les formules donnant Φ^n

$\Phi^2 = \Phi + 1$; $\Phi^3 = \Phi^2 + \Phi = 2\Phi + 1$; $\Phi^4 = \Phi^3 + \Phi^2 = 3\Phi + 2$; $\Phi^5 = \Phi^4 + \Phi^3 = 5\Phi + 3$; $\Phi^6 = \Phi^5 + \Phi^4 = 8\Phi + 5$. La formule générale est : $\Phi^{n+2} = \Phi^{n+1} + \Phi^n = F_{n+2}\Phi + F_{n+1}$.

(c) La formule de Binet

$F_n = (\Phi^n - (-1/\Phi)^n) / \sqrt{5}$.

(d) La formule avec la partie entière

$F_n = [\Phi^n / \sqrt{5} + 1/2]$ ($[x]$ désigne la partie entière de x).

comme la somme des deux précédents) est fortement liée à Φ .

Certains résultats mathématiques font intervenir Φ en dehors de tout contexte géométrique. Ainsi, un résultat d'optimisation indique que, pour connaître le maximum d'une fonction continue, croissante puis décroissante, une méthode très efficace consiste à l'évaluer en des points qui découpent le segment auquel on s'intéresse selon le rapport Φ .

La plus simple des fractions continues est celle de Φ :

$$\Phi = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}}}}$$

Cela ne signifie pas que Φ est le plus simple des irrationnels : $\sqrt{3}$ pourrait aussi revendiquer ce titre, puisqu'il est présent dans le plus simple des polygones réguliers (le triangle équilatéral). Le nombre $\sqrt{2}$ lui aussi peut revendiquer ce titre (2 vient avant 3, $\sqrt{2}$ est associé à l'angle droit, le plus simple des angles) : il n'y a pas d'irrationnel le plus simple. La formule :

$$\Phi = \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \dots}}}}}$$

est certes très belle, mais plus compliquée que $\sqrt{2} = \sqrt{1+1}$. D'autres occurrences de Φ apparaissent ici et là en mathématiques, mais nul mystère à cela : Φ est solution d'une équation simple et les choses simples se retrouvent partout ; il en va de même des autres constantes mathématiques e , π , $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, qui, chacune à sa façon, est simple (la définition de chacune tient en quelques mots).

Le nombre π est évidemment bien mieux représenté dans la nature que Φ puisque dès qu'on rencontre un cercle ou une sphère, le nombre π est implicitement donné : mesurez la longueur du

périmètre du premier arbre venu et divisez-le par le diamètre vous trouverez une valeur proche de π ! De même, $\sqrt{2}$ apparaît dès que des carrés sont présents (il y en a dans les cristaux) et $\sqrt{3}$, dès qu'on a des réseaux triangulaires ou hexagonaux (cristaux, nids d'abeilles, par exemple), etc.

La découverte des quasicristaux (ayant une symétrie d'ordre cinq), des molécules dont la forme est celle d'un dodécaèdre, et des virus ayant aussi cette forme montre que la symétrie d'ordre cinq est plus fréquemment utilisée par la nature qu'on ne l'imaginait il y a 20 ans. Cela accroît légèrement l'importance en science de la constante mathématique Φ , qui cependant reste loin derrière $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, π ou e .

Le mythe du nombre d'or plaît, car il procure à ceux qui l'adoptent l'illusion agréable de détenir un secret essentiel du monde. On peut parier que ce sentiment survivra longtemps encore : ni les travaux de Gustav Theodor Fechner qui, dès le XIX^e siècle le réfutait, ni ceux de Marguerite Neveux, qui dénonçant l'inconsistance de sa base historique, montrent le peu de sérieux de ses thuriféraires, ni bien sûr cet article, ne suffiront à l'éteindre.

J.-P. ADAM, *Le passé recomposé : chroniques d'archéologie fantasque*, Seuil, Paris, 1988.

C. BOULEAU, *Charpentes. La géométrie secrète des peintres*, Seuil, Paris, 1983.

M. GHYKA, *Le nombre d'or. Rites et rythmes pythagoriciens...* Gallimard, 1931.

Roger HERZ-FISHER (1987, 1998, Dover Publication, New York)

H. E. HUNTLEY, *The Divine Proportion : A Study in Mathematical Beauty*, Dover Publications, New York, 1970.

M. NEVEUX, *Le nombre d'or. Radiographie d'un mythe (suivi de La divine proportion de H. Huntley)*, Seuil, 1995.

Les feux d'artifice

GEORGE ZAMBELLI

Aucune application de la chimie ne suscite autant d'émerveillement que les feux d'artifices. Aujourd'hui, lors des plus grands feux d'artifices, les ordinateurs synchronisent les mises à feu des fusées très bien temporisées avec la musique d'accompagnement. Les explosions elles-mêmes résultent de l'agencement précis (mais souvent secret) de poudre, de résine, de gomme, de papier et de ficelle. Cette structure des fusées a peu évolué pendant cinq siècles de pyrotechnie.

LES TUBES DE LANCEMENT, en métal ou en plastique, sont fixés au sol et chargés avant le spectacle. Un contacteur électronique commandé par ordinateur allume la mèche, qui enflamme de la poudre noire composée de nitrate de potassium, de charbon et de soufre – jusqu'à 170 grammes pour une fusée de 15 centimètres de diamètre et constituée de trois niveaux – chargée de propulser les fusées.

TUBES DE MORTIER

CERTAINES FUSÉES libèrent des motifs lumineux variés : étoiles, cœur, etc. Ces motifs proviennent de boulettes chimiques, disposées à la périphérie d'une enveloppe à la forme voulue et emplies de poudre explosive. L'ensemble est contenu dans une coquille sphérique pleine de sciure ou de cosses de riz.

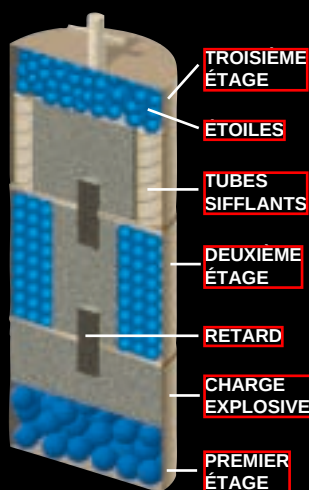
CHARGE DE PROPULSION

MOTIFS CONSTITUÉS D'ÉTOILES

MECHE

CHARGE EXPLOSIVE

UNE FUSÉE de 15 centimètres de diamètre peut exploser en plusieurs étapes au cours de son ascension jusqu'à plusieurs centaines de mètres d'altitude. L'étincelle passe d'un étage à un autre grâce à de petites mèches rigides, nommées retards. La quantité de poudre dans ces mèches détermine le laps de temps qui sépare deux explosions (entre une et huit secondes).



LES FUSÉES SIFFLANTES contiennent des tubes en carton qui renferment du perchlorate de potassium, de la gomme accroïque (une sécrétion végétale) et du benzoate de sodium ; ils sont bouchés par de l'argile à leur extrémité supérieure. Lorsque le mélange brûle, il libère des gaz qui sont injectés avec un sifflement aigu.

LES CHARGES EXPLOSIVES, à l'intérieur des fusées, enflamment des «étoiles» sphériques composées d'un mélange de poudre métallique, de sels chimiques et de colle. Les étoiles incandescentes peuvent changer périodiquement de couleurs selon les couches qui se vaporisent à leur surface et en libèrent d'autres de composition différente.

Paléontologie

L'âge du monde

Pascal Richet. Éditions du Seuil, 1999.

Jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, l'Occident admettait que la Terre était âgée de 5 000 ans environ. Aujourd'hui, on a révisé cet âge à la hausse : il serait de 4,5 milliards d'années. Comment deux siècles d'études ont-ils conduit à une telle révision ? C'est le thème du livre intéressant de Pascal Richet, qui embrasse une histoire longue (elle commence chez les philosophes de la Grèce antique) et complexe (les approches successives qui ont été employées pour estimer l'âge du monde vont de l'exégèse biblique à la physique nucléaire, en passant par la géologie, l'astronomie et la thermodynamique).

On découvre, à la lecture de ce livre, combien de penseurs, parfois éminents, parfois un peu oubliés, se sont penchés sur ce problème. Plus longue encore est la liste de ceux dont les travaux ont contribué, de façon indirecte mais essentielle, à la résolution du problème, en établissant les principes de la thermodynamique, en mettant en évidence le rôle de la sélection naturelle ou en découvrant les rayons X. Au fil des pages, on rencontre aussi bien Aristote qu'Ernest Rutherford ou Jean Buridan, Pierre et Marie Curie que Léonard de Vinci, Thomas Huxley, Gottfried Wilhelm Leibniz ou Sadi Carnot... La question de l'âge du monde n'était pas simple, même pour ceux qui cherchaient la réponse dans la Bible (en témoignent les résultats discordants tirés des généalogies bibliques, y compris par des savants de l'envergure de Newton). D'ailleurs, pouvait-on vraiment donner un âge au monde ? N'était-il pas éternel, comme le pensaient Aristote ou James Hutton, qui ne trouvait « nul vestige d'un début – nulle perspective d'une fin » ? On ne doute plus, aujourd'hui, que la Terre ait eu un commencement, mais la question se pose pour l'Univers.

Quand la recherche de l'âge du monde se révéla un objectif scientifique légitime, beaucoup s'attaquèrent au problème. P. Richet a le grand mérite d'envisager l'évolution des idées en la matière dans un cadre très large. Il ne craint pas les digressions utiles, pas plus que les anecdotes révélatrices, qui rendent plus vivante, plus humaine, la kyrielle de personnages qu'il fait défiler devant le lecteur. L'auteur montre bien que les recherches qui visent à déterminer l'âge du monde,

que ce soit dans les astres, les strates ou les isotopes, sont le fait de chercheurs individuels, pas d'équipes, pas même d'écoles. Certes, ils travaillent dans un contexte, dans un environnement scientifique, mais les découvertes et les progrès fondamentaux sont dus à des individus. Ils font parfois fausse route, certains se trompent lourdement, leurs découvertes sont parfois fortuites, ou réalisées à une tout autre fin que celles auxquelles elles serviront finalement, ils se heurtent à des oppositions diverses, peu scientifiques et parfois vigoureuses (qui viennent, suivant le lieu et l'époque, de l'Inquisition, de l'Université de Paris, du NKVD ou de la Gestapo !). Bref, ils sont humains. P. Richet nous les décrit d'ailleurs avec beaucoup de sympathie, sans aucun manichéisme : il n'y a pas de méchants réactionnaires qui auraient tenté de faire obstacle au progrès de la science, confrontés à de lumineux bienfaiteurs de l'humanité. Il y a des chercheurs qui tâtonnent, se fourvoient parfois, ont souvent des opinions divergentes et ne font pas de cadeaux à leurs adversaires – mais c'est la réalité de la science, sur laquelle il ne sert à rien de vouloir porter un jugement.

Bien sûr, les efforts de tant de talents divers ne font pas une histoire linéaire, un progrès continu des connaissances. Ce livre réserve donc quelques surprises : on verra comment Buridan, au XIV^e siècle, envisageait sans être inquiet des durées de centaines de millions d'années, position qui deviendra plus difficile dans une Renaissance troublée par l'intégrisme protestant et catholique, et empêtrée dans la théorie des correspondances entre microcosme et macrocosme. On verra aussi comment les tenants des « sciences dures » n'ont pas toujours raison. L'exemple le plus démonstratif est celui de William Thomson (qui devint lord Kelvin), dont les calculs (mathématiquement irréprochables) imposaient à la Terre un âge ne dépassant guère une vingtaine de millions d'années. Les biologistes contemporains, Darwin et Huxley en tête, ne se contentaient pas d'une si courte durée comme cadre de toute l'évolution des êtres vivants. Le conflit dura jusqu'à ce que la découverte de la radioactivité montre que Kelvin avait ignoré une source de chaleur fondamentale dans ses calculs sur le refroidissement de la Terre et l'évolution du Soleil.

Cette histoire aux multiples rebondissements est aussi une célébration de la science, d'autant plus efficace qu'elle est subtile. Pas de triomphalisme, pas de glorification d'un illusoire progrès inexorable des connaissances. L'avancement de la connaissance se fait par à-coups, la chance et le hasard y jouent un rôle notable, et les scientifiques sont

des hommes comme les autres. Toutefois la connaissance progresse.

C'est certainement là un des meilleurs livres d'histoire des sciences publiés en France ces dernières années.

ÉRIC BUFFETAUT

Astronomie

Soleil noir. Histoire et mécanique des éclipses

Leïla Haddad et Alain Cirou. Coéditions le Seuil-Association française d'astronomie, 1999.

L'éclipse totale de Soleil, phénomène naturel grandiose, est un événement commercial et médiatique. De nombreuses revues ou livres décrivent ce spectacle, joignant parfois, pour les lecteurs, une paire de lunettes, en Mylar, afin de protéger efficacement leur vue lors de l'observation de l'éclipse partielle, très dangereuse pour la rétine. Les productions littéraires sont de qualités très diverses : du banal au très bon.

Le livre publié par les Éditions du Seuil et l'Association française d'astronomie est avant tout original par sa présentation : l'ouvrage est tout rond, comme le Soleil ou la Lune. Le texte est en blanc sur fond noir, entouré d'une marge circulaire avec, parfois, des photographies ou des schémas qui viennent le masquer partiellement... comme lors d'une éclipse.

Cette maquette a ses inconvénients : quelques illustrations sont trop petites pour être bien lisibles, et certains mots de vocabulaire scientifique auraient gagné à être mis en valeur par de la couleur, qui aurait ainsi facilité la lecture.

Le contenu de ce livre de bonne vulgarisation, au style attrayant, plus journalistique que didactique, est très bien documenté. On n'y trouve pas les erreurs historiques, hélas habituelles, concernant, par exemple, les légendes du *saros* (un cycle des éclipses, égal à 18 ans environ) qui aurait été « connu des Chaldéens » (suite à une erreur d'interprétation de Edmond Halley en 1692), ou de l'éclipse survenue en l'an 585 avant notre ère et qui aurait été « prévue » par Thalès (d'après Hérodote, un siècle plus tard), ou encore des malheureux Chinois Hi et Ho, exécutés il y a 45 siècles pour n'avoir pas su « prévoir » une éclipse. Au contraire, le livre mentionne clairement que ces anecdotes sont erronées. Les éclipses de Soleil ne sont réellement prévisibles que depuis Hipparque, un siècle seulement avant notre ère.

Les deux auteurs, journalistes de l'Association française d'astronomie, cherchent à faire partager leur passion de spectateur attentif et de photographe, et ils y réussissent plutôt bien. Quelques coquilles (de dates, notamment) n'empêcheront pas d'apprécier les cartes détaillées de l'éclipse, dessinées d'après celles de la publication de référence de Fred Espenak et de Jay Anderson, de la NASA, ou les très belles photographies d'éclipses en chapelet, ainsi que celles de la magnifique couronne solaire que beaucoup attendent de voir prochainement.

Ce livre permettra de mieux apprécier le spectacle.

Michel TOULMONDE

Zoologie

Fonds sous-marins de la Bretagne

Yves Turquier, Camille Lusardi et Maurice Loir. Éditions Ouest-France, 1998.

A moins d'être un plongeur confirmé, le visiteur sensible à la diversité des milieux naturels sur les côtes maritimes de l'Ouest de la France en ignore souvent la «face cachée» : l'étage marin infralittoral. Immergé en permanence, mais encore pénétré par la lumière, celui-ci est compris entre le niveau inférieur de l'estran et une profondeur d'environ 40 mètres. Seules les plus grandes marées basses en révèlent, pour un court instant, au naturaliste «terrien» la frange supérieure et lui font pressentir la prodigieuse richesse d'un «monde sans pesanteur et sans limites, plein d'une vie ignorée dont le chalut et la drague lui ont si peu appris». S'il existe de nombreux documentaires sur des milieux analogues, la plupart sont consacrés à la faune marine des régions tropicales et s'attachent le plus souvent à ses aspects spectaculaires, mettant en valeur la singularité des formes et la richesse polychrome d'espèces animales maintes fois présentées. Qui soupçonnerait que les fonds sous-marins proches des côtes bretonnes offrent, par rapport à ceux des tropiques, une égale splendeur multicolore, une diversité analogue et la même occasion d'insolites rencontres ? Issu de la collaboration d'un spécialiste de la faune et de la biologie marines et de deux photographes dont les superbes images sous-marines ont acquis une réputation

internationale, cet ouvrage nous en apporte la plus brillante démonstration.

Son introduction montre comment les peuplements littoraux et infralittoraux sont liés à la pétrographie côtière de la péninsule armoricaine et, fait moins connu, aux glaciations quaternaires qui ont fragmenté les roches et accumulé les sables sur les côtes. Les communautés marines qui peuplent ces substrats sont fortement influencées par le régime thermique et par l'hydrodynamique vigoureuse des marées, de la houle et des tempêtes auxquelles la pointe bretonne, «figure de proue», est particulièrement soumise. Ces influences s'exercent d'ailleurs de façon inégale entre le littoral de la Manche et celui de l'Atlantique : les cartes des températures de l'eau de surface en été et en hiver sont à cet égard particulièrement significatives. Outre l'occultation progressive de la lumière en profondeur, ces facteurs écologiques commandent l'organisation des communautés vivantes. Bien que soumises à une sélection impitoyable, la faune et la flore infralittorales présentent une prodigieuse diversité : les côtes bretonnes sont les plus riches d'Europe en algues, avec 750 espèces ; quant à la faune, il faut renoncer à la dénombrer, puisque chaque décennie apporte son lot de découvertes (ainsi celles de 37 espèces de vers minuscules, nouvelles pour la science, près de Roscoff, dans les 25 dernières années).

De splendides illustrations, toutes prises dans les eaux armoricaines, nous font connaître et admirer un nombre considérable de ces espèces au sein de leurs biocénoses. Le texte, au style particulièrement vivant, très évocateur en dépit

de sa rigueur scientifique (ou à cause de lui ?), conduit agréablement le lecteur le moins informé à un haut niveau de connaissances sur les multiples aspects de la biologie marine, qu'il s'agisse de la complexité des relations entre espèces (les réseaux trophiques : «des banquets sous la mer» ; commensaux, symbiotes et parasites : «vivre ensemble»), de leurs modes de reproduction («du clone au couple», «qui fait un œuf fait du neuf», formule qui résume admirablement les conséquences génétiques de la sexualité et sera sans doute souvent reprise).

Il faudrait aussi citer en totalité le texte éloquent et inspiré «en guise de conclusion», qui dénonce les multiples agressions subies par les océans et, se démarquant «du catastrophisme systématique [comme] des propos lénifiants» sur le prétendu pouvoir épurateur de la mer, dresse un constant objectif des actions anthropiques sur les milieux océaniques. Ces pages font prendre pleinement conscience de la nécessité de préserver l'espace maritime, gravement menacé par les innombrables agressions d'origine humaine en dépit de ses dimensions (longtemps imaginées sans limites). Elles appellent à une attitude responsable, aussi bien ceux qui vivent et travaillent sur la mer et ses rivages que les décideurs économiques ou politiques, en vue de promouvoir l'exploitation rationnelle du milieu marin, condition de sa survie et de celle de l'homme.

Souhaitons une large audience à cette magnifique invitation à la découverte prudente et respectueuse du si proche et si fragile pays des merveilles sous-marines.

Marcel BOURNÉRIAS



Ce crabe (*Inactus* sp.) vit en association avec une anémone de mer (*Anemonia viridis*). Comme d'autres espèces d'«araignées de mer», il se camoufle avec des algues ou des éponges, qu'il bouture sur sa carapace.

Évolution

Évolution biologique

Mark Ridley. Éditions De Boeck Université, 1997.

A la fin du XIX^e siècle, Darwin procurait aux hommes le plus grand choc affectif de leur histoire. Ils ne descendaient pas de Dieu, mais du singe ! Un siècle plus tard, on ne doute plus guère que nous ayons un ancêtre commun non seulement avec le singe, mais aussi avec les escargots et les mille-pattes, et le choc est bien digéré. Ceux qui croient que l'homme a été créé par Dieu et ceux qui ne le croient pas acceptent que nous soyons, de toute manière, les produits de l'évolution biologique. L'évolution est un processus si grandiose, si écrasant, si mystérieux, si envoûtant, si magique que notre orgueil se félicite finalement d'en être les enfants.

À l'aube du troisième millénaire, l'heure n'est plus aux querelles qui ont entouré la publication de *L'origine des espèces* et de *La descendance de l'homme*. De toutes autres préoccupations s'imposent : l'espèce humaine est la première qui ait détruit un nombre si considérable d'autres espèces vivantes en si peu de temps (quelques décennies), la première qui ait tant bouleversé le fonctionnement des écosystèmes naturels, la première qui s'apprête à modifier les plans de sa propre structure en cisillant et en recollant l'ADN.

La période d'extinction biologique que nous vivons n'est pas la première. On connaît bien l'extinction de masse de la limite Crétacé-Tertiaire, lors de laquelle disparurent notamment les dinosaures et dont certains supposent qu'elle résulte de la chute d'un aérolithe ou peut-être, comme le pense Claude Allègre, qu'elle fut la conséquence des éruptions gigantesques qui se sont produites alors dans le Dekkan indien. On connaît moins les autres grandes extinctions de l'évolution, à l'Ordovicien supérieur, au Dévonien supérieur, à la fin du Permien, à la fin du Trias.

La perturbation des écosystèmes qui cause ces extinctions est due à l'exploitation excessive des ressources (la destruction de la forêt tropicale, notamment) et au rejet de résidus de cette exploitation (la pollution). La fragmentation des écosystèmes (par les autoroutes, le développement des villes, l'extraction des richesses du sous-sol) engendre de nouveaux types de paysages, où des écosystèmes de nature différente interagissent de plus en plus fortement et où des espèces vivantes, notamment pathogènes, se

trouvent soudainement en contact avec des partenaires inconnus. D'où, peut-être, les maladies émergentes.

Enfin les modifications de génomes engendrent des phénomènes nouveaux qu'il est important de bien comprendre. Ces modifications ont longtemps résulté d'une sélection artificielle qui ne faisait qu'imposer la volonté de l'homme aux variations naturelles nées des mutations. De là sont nées les races de chiens, les vaches à lait et les melons succulents de nos tables. Aujourd'hui, les biologistes interviennent directement sur les génomes, avec tous les avantages et les craintes que soulève le ménage à trois entre les rêves du sorcier, la raison du savant et les intérêts du marketing.

Le livre de Mark Ridley ne traite pas directement de ces trois questions, mais il en donne une approche conceptuelle correcte. C'est un ouvrage destiné avant tout aux étudiants, et sa volonté de pédagogie va loin, puisque chaque chapitre se termine non seulement par un résumé, mais aussi par deux rubriques intitulées «Pour approfondir» et «Pour réviser». Pour ceux qui préparent licences ou maîtrises, le livre est une excellente synthèse sur l'état actuel des connaissances concernant l'évolution.

Toutefois, ce livre «destiné aux étudiants» permet aussi à chacun de voir, tout d'abord, ce qui a changé depuis Darwin et, tout spécialement, depuis la révolution de la biologie moléculaire. Ensuite, le livre nous donne à réfléchir à cette aventure incroyable commencée par une molécule et parvenue jusqu'à l'homme actuel en trois milliards et demi d'années. Enfin, il procure les outils conceptuels pour réfléchir à la façon qu'a l'humanité de faire aujourd'hui trembler l'arbre dont elle n'est que l'un des fruits.

L'ouvrage commence par un historique des idées où l'on retrouve les grands noms du siècle, Ronald A. Fisher, J.B.S. Haldane, Sewall Wright, Julian Huxley, Theodosius Dobzhanski, Ernst Mayr, et surtout des résumés précis de leurs contributions à l'état actuel de la théorie. Il consacre un développement important à la génétique des populations, sans laquelle la théorie moderne de l'évolution ne peut être comprise, aux mécanismes de la sélection naturelle et de l'adaptation, au problème encore trop mal saisi de la formation de nouvelles espèces, à la coévolution, par exemple entre parasites et hôtes. Il énonce les principes généraux et les difficultés de construction des arbres phylétiques fondés sur les séquences d'ADN (le nombre d'arbres possible pour les 30 millions probables d'espèces vivantes est un nombre qui s'écrit avec un 1 suivi de 300 millions de zéros). Il fait (sans la nommer !) une critique simplifiée, mais constructive et com-

plète, de l'hypothèse de l'Eve mitochondriale des années 1980 : on a suggéré alors que tous les hommes descendaient d'une unique femme qui aurait vécu en Afrique il y a trois millions d'années.

M. Ridley discute aussi de nombreuses questions qui sont en relation étroite avec l'impact de l'homme sur le monde vivant. Par exemple, la périodicité apparente des grandes extinctions d'espèces sur un cycle de 26 millions d'années, la troublante accumulation d'iridium dans les sédiments déposés lors des périodes d'extinction, la sélectivité des extinctions avec des groupes entiers qui disparaissent ou s'affaiblissent fortement, tandis que d'autres résistent. Ces notions enrichissent toute spéculation sur les conséquences possibles des pressions de l'homme sur la biosphère actuelle. L'ouvrage est suivi d'un glossaire qui donne l'exacte définition de plus de 150 mots indispensables pour développer, discuter (ou critiquer) la théorie de l'évolution.

Un ouvrage «pour étudiants» donc. Un ouvrage bien fait, complet, critique, illustré de schémas nombreux et clairs. Comme tel, il fera du lecteur non étudiant, un nouvel étudiant, attentif certainement, passionné peut-être.

Claude COMBES

Écologie

Itinéraires sauvages. Le guide du voyage nature et de l'écotourisme

Christian Weiss. Éditions Balland, 1999.

Où partir pour observer, dans la nature, les animaux en liberté ? Ce petit guide répond à la question. Avec la multiplication des films et des émissions télévisées animaliers, on a suscité l'envie d'observer de visu ce qui nous est si bien montré ou décrit. Le public réclame donc des voyages «de tout repos» pour découvrir la faune sauvage dans son milieu. Des voyageurs spécialisés s'y consacrent ; ce guide se veut le manuel de ce nouveau type de voyages.

Cinquante-sept itinéraires dans le monde entier sont proposés, permettant d'approcher (souvent de loin !) des animaux emblématiques, présentés dans le livre avec un titre accrocheur : «la flamboyance des aras rouges» ; «les koalas, des peluches au sacré caractère» ; «les bouquetins des Alpes, seigneurs du roc» ;

«le ballet stellaire des globicéphales tropicaux», etc.

Pour chacun d'entre eux, le guide indique le site et les périodes d'observation, puis il donne un portrait, qui apprend à reconnaître l'animal ; il précise la vie sociale et donne un aperçu des mœurs ; quelques indications regroupées sous le titre «préservation» signalent la rareté des animaux ; puis une section indique comment observer, quels autres animaux on peut rencontrer quand on sera en chemin ; enfin une rubrique «partir» signale l'équipement et les précautions nécessaires au voyage : gîtes et couverts, hébergements...

Ce livre, pour être le bréviaire du voyageur naturaliste, rappelle les préceptes d'une éthique fondée sur une approche compréhensive des hommes et de la nature, avec cet aphorisme : «La Nature nous émerveille, respectons la Nature.»

Ouvrage grand public, il met essentiellement l'accent sur les «grosses bêtes» ; le seul insecte présenté est le monarque (*Danaus plexippus*), ce papillon d'Amérique aux migrations imposantes. Or si les vertébrés (parce que très visibles) sont souvent le symbole zoologique d'un milieu, on attendrait qu'ils soient l'occasion de découvrir quelques-unes des autres composantes de cet environnement, même lorsqu'elles sont moins notoires ou moins spectaculaires.

Premier guide de ce genre, il devrait, tout en contentant la soif de curiosité, aider à préserver la biodiversité.

Jacques d'AGUILAR

Chimie

Les dendrimères

Coordination Dominique Antoine.
Association CRIN (32, boulevard de Vaugirard, 75015 Paris), 1998.

L'Association des clubs CRIN vient de publier un ouvrage rédigé par des chercheurs français associés dans le Club CRIN Hétérochimie. Ce livre est une très bonne compilation des travaux des équipes françaises qui préparent et qui étudient les dendrimères, ces molécules étoilées que l'on obtient, par exemple, en branchant des ramifications sur une «graine» centrale, les extrémités de ces ramifications servant à leur tour de point de départ pour de nouvelles ramifications.

Le premier chapitre présente les principales études des dendrimères phos-

phorés. Le phosphore, en raison de sa place en biologie et de son comportement chimique particulier, est un élément de choix pour les constructions envisagées.

La contribution des chimistes français, plus particulièrement celle de l'équipe de Jean-Pierre Majoral et d'Anne-Marie Caminade, est essentielle dans ce domaine. Ils indiquent de nombreuses synthèses originales, ainsi que des méthodes de caractérisation de ce type de composés.

La résonance magnétique nucléaire (RMN) du phosphore 31 est une de ces méthodes : quand on place dans un champ magnétique un échantillon contenant certains isotopes (le phosphore 31 est l'un de ceux-ci), il se produit une multiplication des niveaux d'énergie du noyau qui dépend de l'environnement chimique de l'atome. L'utilisation d'une onde radio permet de provoquer des transitions entre ces niveaux d'énergie et d'en déduire certains éléments structuraux de l'échantillon.

Stables thermiquement, les dendrimères ont une réactivité prometteuse, non seulement par leurs groupes fonctionnels de surface, mais aussi parce qu'on peut loger des groupes spécifiques à l'intérieur de ces macromolécules.

La même équipe présente ensuite les dendrimères constitués d'autres éléments : germanium, bore ou silicium. Les deux premiers ont été peu utilisés, tandis que le silicium a donné lieu à de nombreux travaux. Soulignons cependant que les seuls dendrimères à germanium qui ont été confectionnés (à des fins purement fondamentales) sont ceux d'une équipe française, celle de P. Mazerolles.

Les dendrimères au bore, au contraire des précédents, ont été préparés en vue d'une utilisation dans le traitement des tumeurs cancéreuses par capture de neutrons. On a également utilisé des extrémités aminées ($-NH_2$) des dendrimères afin de les fonctionnaliser par l'acide boronique : les interactions possibles de ce dernier avec les sucres semblent prometteuses.

Enfin, les dendrimères siliciés existent sous trois formes : ceux de type polysiloxane, avec des liaisons entre des atomes de silicium et des atomes d'oxygène ; ceux de type carbosilane, où le carbone est lié au silicium ; et les polysilanes, dont le squelette est formé de liaisons entre atomes de silicium.

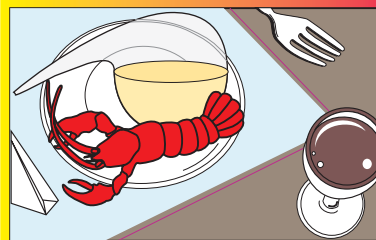
L'obstacle principal au développement des dendrimères restant la mise au point de réactions quantitatives, il n'est pas étonnant que les dendrimères les plus étudiés soient ceux de type carbosilane ; les acquis de la chimie organique du silicium mettent à la disposition du chimiste des réactions classiques, très efficaces, qui ont permis d'obtenir des dendrimères stables jusqu'à des générations élevées

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 30 août 1999.

FRANCE

info

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). Secrétaire de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Séverine Merviel et Marie Hubert. Direction financière : Anne GUSDORF. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Bénéteau. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Nathalie Audard, Yves Barroux, Daniel Collobert, Paul Decaix, Jean-Paul Delahaye, Marie-Thérèse Landousy, Bernard Lang, Claire Maurel, Claude Olivier, Pierre Pfeiffer, Christophe Pichon, Françoise Poirier, Jacques-Philippe Saint-Gérard, Camille Saisset, Jean-Baptiste Thibaud.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Rick Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman : John Hanley. Co-Chairman : Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer : Joachim Rossler. Vice-President : 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
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

Marie Hubert.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 104A et 104B.

(la septième). Pour ces dendrimères siliés, on a notamment exploré la réactivité d'atomes de chlore (Cl) ou de groupes vinyle ($-\text{CH}=\text{CH}_2$), liés à des atomes de silicium de surface. Des complexes dendritiques organométalliques, ferrocènes, complexes du cobalt, du palladium, du nickel ont été obtenus, et leurs propriétés électrochimiques et catalytiques étudiées. Les interactions éventuelles des sites métalliques de surface constituent l'une des voies de recherches prometteuses (propriétés électriques ou magnétiques).

Ce sont encore des dendrimères à motif carbosilane qui ont formé des structures cristallines bien définies. G. Friedmann présente, au chapitre 4, la synthèse et la structure cristalline de tels composés, de type arylalcoylsilane. La formation de complexes d'inclusion stables avec le tétrahydrofurane incite à les utiliser comme cocatalyseurs dans les réactions de polymérisation ou de polycondensation : la structure des dendrimères régule de telles réactions et évite la formation de gels par réticulation du polymère.

Le chapitre 5 aurait mérité d'être en tête de l'ouvrage, à la place du premier chapitre. Reproduction intégrale d'un article de N. Ardoin et de Didier Astruc, il constitue une excellente mise au point sur les arbres moléculaires, avec l'ambition de couvrir tous les domaines : des synthèses aux applications. Les deux méthodes d'obtention : divergente (génération successive de branches) et convergente (fixation de branches à plusieurs rameaux sur un cœur réactif) sont décrites avec plusieurs exemples, ainsi que leurs variantes.

Un point intéressant, dans cette revue, est l'analogie des espèces chargées avec les micelles, groupes de molécules «amphiphiles» dont une extrémité hydrophile est à l'extérieur, en solution dans l'eau, et dont l'autre extrémité, hydrophobe, est au cœur. D'autres groupes fonctionnels sont également décrits : éthers couronnes, fullerènes, porphyrines, sucres, tétrathiafulvalène et clusters de bore.

Le sixième et dernier chapitre, par Didier Taton et Yves Nanou, nous amène dans le domaine des dendrimères à générations macromoléculaires. Les dendrimères sont, en eux-mêmes, des polymères, mais cette dernière catégorie représente une contribution plus forte des polyméristes à la synthèse et à l'étude de structures dendrimères. On obtient ainsi des structures arborescentes macromoléculaires en associant des entités dendritiques à des chaînes polymères linéaires, ou bien en greffant des chaînes macromoléculaires sur un cœur dendritique, ou encore en ramifiant des structures en peigne par divers greffages.

La contribution des auteurs concerne une nouvelle famille d'objets dendritiques.

à générations macromoléculaires, préparés par synthèse divergente à partir d'un amorceur plurifonctionnel, ce qui conduit à un nombre précis de points de ramification et de fonctions externes. Comme dans le chapitre précédent, les auteurs mettent l'accent sur les substances amphiphiles, rapprochant leurs composés des structures micellaires, composés qu'ils qualifient ici de structures micellaires unimoléculaires.

Cette œuvre collective des conférenciers des réunions plénières du Club CRIN Hétérochimie donne une excellente idée de la plupart des travaux menés en France sur cette classe de composés remarquables. Elle montre aussi combien cette contribution est de qualité. De façon plus générale, le sous-titre de l'ouvrage, *De nouveaux polymères aux applications prometteuses*, souligne que les applications potentielles sont nombreuses, mais que les applications effectives restent rares.

Avec son talent habituel, Pierre-Gilles de Gennes, dans la préface, s'interroge sur les potentialités réelles des dendrimères et propose deux voies de recherche qui lui paraissent prometteuses : le contrôle de transferts (d'électrons ou d'excitation optique) et l'obtention d'objets «subtils».

On peut certes s'interroger sur l'avenir des structures dendritiques quand on sait que le concept est vieux de 21 ans. Quand des applications des dendrimères démontreront-elles l'intérêt de ces molécules fascinantes ? Tandis que l'on commence à disposer de productions industrielles, les études fondamentales continuent de donner des résultats marquants : l'équipe d'Isabelle Rico-Lattes, dans notre laboratoire des IMRCP, à Toulouse, a obtenu des inductions asymétriques élevées dans des réactions de réduction, par exemple, tandis que des chimistes de l'Université du Texas et de l'Institut moléculaire du Michigan formaient des nanoclusters métalliques encapsulés dans des dendrimères.

Pour que des applications se multiplient, il était sans doute nécessaire que soient mises au point des synthèses performantes et que des études physico-chimiques soignées précisent le comportement des dendrimères. C'est ce à quoi se sont attachées, avec compétence, les équipes françaises qui participent au Club CRIN Hétérochimie. Ces dernières mettent à la disposition de tous une foule de résultats et d'informations, en même temps qu'elles font découvrir des composés dont l'esthétique pourrait, à elle seule, justifier l'intérêt qu'on leur porte.

Armand LATTES

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>