



POUR LA

Pour la Science

SCIENCE

Avril 2000

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

www.pourlascience.com



L'ÉGYPTE :

de la naissance à l'apogée



BLOC-NOTES

de Didier Nordon

TRIBUNE DES LECTEURS



JEU-CONCOURS

Propriétés inévitables

par Pierre Tougne

POINT DE VUE

L'éthique de la fin de vie

par Robert Zittoun



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Des lois de Mendel à la lecture du génome

par Michel Morange



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Le goût du froid

par Hervé This



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

La Lune, artefact extraterrestre? Le bégaiement

des coucous Le service médical rendu

Fossiles et géographie de l'ère primaire

«Cellules» entrouvertes Ver à soie transgénique

Lutte tous azimuts contre le VIH L'interférence du désordre

Mourir de rire Manque d'expression Un Big Bang à l'envers



VISIONS MATHÉMATIQUES

La stratégie des sous-ensembles

par Ian Stewart



LOGIQUE ET CALCUL

Le tatouage des images numériques

par Caroline Fontaine



IDÉES DE PHYSIQUE

La propagation de l'influx nerveux

par Roland Lehoucq



ANALYSES DE LIVRES

Dictionnaire du règne animal, sous la direction de Simon Tillier

L'encyclopédie de la nature, de Doris Kinderley

Les insectes en 1 000 photos, de Patrick Glémas

Les insectes et les hommes, de Michel Lamy

Supermath, de Pierre Bornsstein

Clin d'œil à la vie. La grande aventure HLA, de Jean Dausset

Herborisations en zigzag. Journal d'un botaniste : Charles

Flahault, présenté par Jean-Marie Emberger

Deux encarts d'abonnement entre les pages 18 et 19, un encart broché service lecteurs et une carte d'abonnement entre les pages 98 et 99, un encart PLS vous recommande jeté au hasard.



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

La naissance de l'État égyptien

par Béatrix Midant-Reynes

En un millénaire, de -4000 à -3000 avant notre ère, l'Égypte est passée de plusieurs cultures d'agriculteurs-pasteurs à un État unifié, stable et fortement hiérarchisé : l'État des pharaons.

La découverte d'un vizir

par Karol Mysliwiec

Sur le plateau de Saqqara, au Sud du Caire, des archéologues ont mis au jour la tombe d'un vizir de l'Ancien Empire égyptien.

La conservation de la tombe de Néfertari

par Neville Agnew et Shin Maekawa

Ramsès II construisit pour son épouse favorite une tombe remarquable que les archéologues s'attachent à conserver.

Les momies

par Jacques Connan, André Macke et Christiane Macke-Ribet

Pour conserver les corps, les embaumeurs égyptiens les traitaient avec des baumes qu'ils préparaient à partir de substances naturelles. On découvre aujourd'hui les méthodes d'application des baumes et leur composition.

Cytokines et sensibilité aux maladies

56

par Dominique Émilie, Marc Humbert et Pierre Galanaud

Quand le système immunitaire s'emballe et que les cytokines sont trop abondantes, elles créent des lésions. De nouvelles substances les inhibent spécifiquement.



La mission Galileo vers Jupiter

64

par Torrence Johnson

Malgré les difficultés techniques, la sonde spatiale Galileo a révélé l'inouïe variété des satellites de Jupiter.



Matériaux numériques et dégradation virtuelle

76

par Julie Dorsey et Pat Hanrahan

Les ordinateurs formeront des images plus réalistes quand on décrira mieux la structure physique des matériaux.

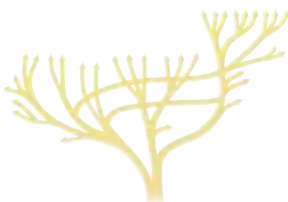


L'arbre du vivant : un buisson foisonnant

84

par Ford Doolittle

Depuis une dizaine d'années, les biologistes étudient l'apparition des formes de vie et cherchent un arbre généalogique des espèces vivantes.

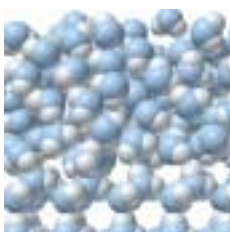


Quand l'eau refuse de geler

90

par John Wettlaufer et Greg Dash

Une mince couche d'eau subsiste à la surface de la glace, même aux températures bien inférieures à 0 °C.



L'État des pharaons revisité

Le dossier de ce numéro retranscrit les succès des archéologues, des linguistes et des physico-chimistes dans l'analyse et la protection des splendeurs de l'Égypte ancienne.

L'avènement de la civilisation égyptienne résulte des progrès d'une agriculture scandée par les effets favorables des crues du Nil, dont le Roi-dieu pharaon garantissait la régularité. Les surplus agricoles, dès le quatrième millénaire avant notre ère, ont imposé le stockage des denrées alimentaires, lequel a suscité l'établissement d'un ordre social fortement hiérarchisé (*La naissance de l'État égyptien*, page 28) dont le faste s'exprimait dans le culte des morts.

La civilisation égyptienne était fascinée par la mort, et le passage des dignitaires vers l'au-delà est superbement décrit sur les peintures tombales (*La découverte d'un vizir*, page 34), où est aussi reconstituée la vie des classes dirigeantes et leur relation avec le petit peuple. L'art du chimiste reconstitue les matières premières des baumes utilisés pour la momification (*Les momies*, page 48) et les peintures (*La conservation de la tombe de Néfertari*, page 42) ; cette analyse prévient les dangers de dégradation des tombes et autorise leur réouverture au public.

«Nous autres, civilisations, savons que nous sommes mortelles», écrivait Paul Valéry. La civilisation égyptienne est vivante aujourd'hui par son culte des morts, c'est cette spécificité qui l'a rendu immortelle.

Le bruit court que l'enseignement des mathématiques doit prouver son utilité. On peut s'étonner de cette sommation utilitaire, dans la mesure où les mathématiques sont aussi un enrichissement culturel. Cependant, même dans cette définition limitée de leur intérêt, les mathématiques peuvent relever le gant. *Le tatouage des images numériques* (page 102) démontre le besoin d'une analyse mathématique approfondie de la signature. Cette «marque», que l'on désire incorporer de façon invisible dans une image, doit résister à tous les traitements que subissent les images numériques. Les avancées actuelles illustrent l'importance des techniques mathématiques, nécessaires pour prouver la contrefaçon.

Philippe BOULANGER



BLOC-NOTES

DIDIER NORDON

L'art est difficile

Personne ne conteste que l'art, loin d'être superflu, est une composante essentielle de l'humanité. Manger ou dormir sont indispensables à la vie. L'art est indispensable à l'homme, sinon même constitutif.

Pourtant, chaque fois que quelqu'un dit : «Je suis peintre, venez voir mes tableaux»

ou : «Je compose, venez écouter ma musique», notre réaction est réservée. Un de plus, est-ce bien nécessaire? Avons-nous vraiment besoin de lui? Et quand nous allons prendre connaissance de l'œuvre, nous ressortons la plupart du temps plus incertains qu'en-

thousiastes. Nos applaudissements sont contraints. Subventionner ce travail, alors que tant de nécessités assaillent la société, n'est-ce pas donner une prime au superflu?

Pourquoi l'idée que nous avons de l'art est-elle, dans l'abstrait, si haute, et, dans les cas concrets, si piètre?

L'Hospital et la Charité

«La propriété, c'est le vol», proclament les aviateurs et les anarchistes. Ces derniers incluent-ils la propriété intellectuelle dans cette condamnation? Si oui, ils ont raison : dans le domaine des idées, quasiment toute propriété résulte d'un vol. En mathématiques, par exemple, il n'est à peu près pas un «théorème de Machin» qui soit effectivement dû à Machin. La contribution de Machin a consisté, au mieux, à donner un retentissement plus grand à un résultat déjà connu ; au pire, à s'en attribuer indûment la paternité.

Car le théorème de Bézout existait avant que

Bézout ne naisse ; la méthode de Cardan s'appelle ainsi parce que Tartaglia l'a expliquée à Cardan sous le sceau du secret, et que Cardan n'a pas tenu sa promesse ; l'ensemble triadique de Cantor aurait précédé Cantor ; Cauchy n'avait pas un an que «son» critère pour la convergence des séries était déjà connu ; d'Alembert n'a jamais démontré le théorème qui, en France, porte son nom ; les séries de Farey, le cercle de Feuerbach, la formule d'interpolation de Lagrange, l'équation de Riccati, la formule de Stirling, la transformée de Laplace, les séries de Maclaurin, la bande de Moe-

bius, le triangle de Pascal – autant d'attributions erronées (R.C. Gupta, *False Mathematical Eponyms*, Ganita Bharati, vol. 19, n° 1-4, 1997).

Il existe cependant un résultat dont l'appellation est conforme à la morale courante : la règle de L'Hospital. Non que L'Hospital l'ait démontrée, bien entendu : elle est due à Johann Bernoulli. Seulement, le marquis de L'Hospital avait passé un marché avec Bernoulli. En échange d'une rente annuelle, Bernoulli s'engageait à travailler sur tous les problèmes que lui proposerait le marquis et à réserver à ce dernier l'exclusivité de ses découvertes. Pour connaître la gloire mathématique, le marquis de L'Hospital n'a donc eu qu'à acheter la règle qui porte son nom. Il faut vraiment être anarchiste pour trouver quelque chose à redire dans cette affaire...

Jolie fleur de papillon

L'effet papillon existe-t-il? Le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il vraiment déclencher une tornade au Texas? Ou, pour poser la question de façon moins imagée, un événement infime peut-il avoir des conséquences démesurées?

La réponse est : oui, bien sûr. L'effet papillon est sa propre preuve! Voici en quoi. L'image de l'effet papillon a été employée, à la va-vite, lors d'une conférence en 1972. Rien ne laissait prévoir qu'elle connaîtrait l'énorme succès qui est le sien aujourd'hui. Elle aurait dû rester une simple image, née d'une inspiration soudaine et destinée à distraire un instant les auditeurs d'une conférence. Au lieu de cela, elle a été reprise et citée si souvent qu'elle a acquis les apparences d'une vérité scientifique irréfutable. Quiconque se pique d'écrire ou de penser doit se montrer conscient de l'effet papillon et soucieux de ses conséquences parfois dramatiques. Nul ne peut plus faire comme s'il n'existait pas. Il a pris les proportions gigan-

tesques d'un mouvement d'idée, influençant tant des philosophes que des décideurs.

L'effet papillon se démontre lui-même!

Lecteurs d'horoscopes

Une curieuse enquête, réalisée aux États-Unis, devrait vous inciter à renoncer au mépris que, peut-être, vous éprouvez face aux lecteurs d'horoscopes. La proportion de ceux qui affirment croire vraiment aux prédictions est en effet de 27 pour cent seulement. S'ils les lisent, c'est pour conjurer leur angoisse face à l'avenir, non pour le prévoir. En revanche, parmi les gens qui refusent de les lire, 73 pour cent disent que c'est parce qu'ils y croient : si les prédictions sont néfastes, ils aiment mieux rester dans l'ignorance de ce qui les attend ; si elles sont bonnes, ils ont peur, en les connaissant, d'interférer avec elles, donc de les gâcher. En outre, une forte minorité (39 pour cent) s'abstient de lire l'horoscope parce qu'elle est convaincue que cela porte malheur.

Ainsi la proportion de superstitieux parmi ceux qui ne lisent pas leur horoscope est plus grande que parmi ceux qui le lisent. Cela paraît paradoxal, mais puisque les chiffres le disent...



Ultima ratio

En absorbant une drogue supposée le rendre immortel, tel empereur chinois a au contraire trouvé une fin prématurée. Un autre empereur – Jules César, je crois – sur le point de se lancer dans une entreprise dangereuse, a dit : «Plutôt mourir tout de suite que vivre plus longtemps avec l'angoisse de la mort.»

Je crains que Jules César n'ait été meilleur psychologue que son collègue chinois, et ne suis pas enclin à me réjouir lorsqu'on nous promet à tous, empereurs ou pas, une longévité de 120 ans. Plus on consacre d'efforts à retarder la mort, plus on souligne qu'elle est le mal absolu. Cela contribue à augmenter l'effroi qu'elle inspire. Peut-être l'instant ultime exige-t-il d'autant plus de courage qu'on a vécu dans une société qui considère la mort comme l'ennemie suprême.

Qui sait, en outre, si le courage – à l'instar d'autres qualités physiques ou morales – n'a pas tendance à diminuer avec l'âge? La Fontaine a là-dessus un mot terrible : «Le plus semblable aux morts meurt le plus à regret.» Si l'objectif «Tous jusqu'à 120 ans» se réalise, il réserve peut-être à chacun de nous un grand soir qui ne chantera pas du tout.



TRIBUNE DES LECTEURS

Graphologues experts?

Dans votre éditorial (voir *Pour la Science*, février 2000), vous opérez une confusion entre les graphologues et les experts en écriture (c'est trop d'honneur que d'attribuer aux graphologues le titre «d'experts en écriture»).

Comme je le souligne dans mon ouvrage, qui est d'ailleurs cité en bibliographie par Mariou Bruchon-Schweitzer : «La graphologie est au dogme et à la croyance ce que l'expertise en écriture est à la science.»

A titre d'exemple : on peut demander à un expert en écriture d'authentifier un testament, mais jamais il ne prendra le risque de décrire la personnalité ou de prédire la réussite professionnelle d'un sujet, de telles ambitions n'ayant jusqu'ici aucun fondement scientifique.

Christian BALICCO, Champigny-sur-Marne

Thésards d'affaire

J'ai particulièrement apprécié votre «Point de vue : Y a-t-il des thésards heureux?» (voir *Pour la Science*, janvier 2000).

Vous dénoncez, avec insistance, l'existence d'un sentiment «d'aversion» marquée pour le monde de l'entreprise chez les doctorants. Vous vous faites rapporteur d'un constat qui me semble être remis en cause du fait d'une mutation importante du monde de la recherche.

Les laboratoires universitaires sont actuellement confrontés à une restriction des budgets pour la recherche. Associée à une augmentation des coûts et des moyens requis, la situation résultante engendre une nécessaire modification de leur politique de gestion. Des démarches prospectives vers les marchés de la recherche «contractualisée» ont été engagées. Nombre de postes destinés à promouvoir et à développer les relations avec l'entreprise en sont nés. Les ingénieurs de recherche sont aujourd'hui des «ingénieurs d'affaires».

Vous me permettez de citer Yves Quéré, Président de l'ABG : «Les mentalités ont changé pour quiconque 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.» (Voir sur le site Internet : <http://www.pourlascience.com/rendez-vous/tribune/formation.htm>).

Dans la situation qui concerne les Ecoles des Mines, la majorité des doctorants sont affectés à des contrats de recherche en partenariat avec des industriels. L'intéressement au monde industriel, ainsi que la connaissance d'un projet professionnel personnel sont, de fait, des critères pour le recrutement de tous les doctorants.

L'utilité de la critique est chose acquise, toutefois il convient de l'exprimer à sa juste valeur. Je vous remercie pour l'attention portée à mes propos, dont je précise qu'il ne s'agit nullement d'une marque d'opposition, mais d'une correction mineure, néanmoins nécessaire.

Marc FUMEY, Albi

Softeux et hardeux

Suite au Bloc-notes de Didier Nordon (voir *Pour la Science*, février 2000), dans les services de recherche et développement en électronique-informatique, les ingénieurs et les techniciens se dénomment les *softeux* quand ils font du software, et les *hardeux* quand ils font du hardware.

Cependant, les termes *softeux* ou *hardeux* deviendraient péjoratifs s'ils étaient employés «hors milieu», donc les gens croient qu'on s'appelle «informaticiens» ou «électroniciens» entre nous...

Inversement, quand on dit en recherche et développement que tel ou tel logiciel est un «travail d'informaticien», ce n'est généralement pas pour en dire du bien, par allusion à l'image d'Épinal de «l'informaticien qui fait des logiciels où personne n'y comprend rien», très bien connue par les développeurs.

En fait, le mot «informatique» est une invention littéraire pour lutter contre le français, et l'étiquette d'informaticien qui y est associée est peu précise. En mécanique, le titre de mécanicien s'applique à quelqu'un qui travaille dans un garage, mais les BAC+5 en mécanique préfèrent se faire appeler «ingénieurs».

Pour l'informatique, les gens désignent sous le vocable d'informaticien des compétences allant du programmeur BAC+2 au docteur en mathématiques BAC+10.

Il n'est donc pas vital de trouver un diminutif pour un mot assez peu utilisé par les professionnels de l'informatique.

Gildas TRÉBAOL, Paris

in-FORMAT-icien

Je souhaite vous faire part de mes réflexions concernant une abréviation pour «informaticien» (voir *Pour la Science*, février 2000). Je propose *Format*. Ce terme a plusieurs avantages : premièrement, il raccourcit réellement le mot «informaticien». Deuxièmement, il n'est aucunement ambigu, au contraire, et ce sera mon troisième point. Il désigne de manière très nette ce qui est une activité fondamentale d'un «informaticien», surtout dans le monde Windows®, à savoir la remise en état de marche d'un système informatique en le réinstallant complètement, après avoir net-

toyé le disque dur, à l'aide de la commande *Format*, justement.

Pour l'ensemble de ces raisons, je pense donc que le terme *Format* est un bon candidat pour être l'abréviation officielle du terme informaticien.

Goulwen REBOUX, Le Rheu

Conscience intime

Si Antonio Damasio s'en était tenu, dans son article (voir *Pour la Science*, Janvier 2000), au seul esprit, comme indiqué dans le titre, l'article serait parfait. Pourtant, dès la première phrase : «d'où vient la conscience?», il met en scène une entité bien mystérieuse, quoi qu'il en dise, et qui ne saurait en tout cas être confondue avec l'esprit.

Il est vrai que l'auteur parle surtout de l'esprit dans le texte, mais il traite aussi de la conscience, qu'il réduit à la «conscience de soi», perception de la différence entre soi-même et l'environnement. Certes, le mot conscience peut être pris dans différentes acceptations. Mais la plus importante est sans doute la conscience comprise comme l'ensemble des perceptions, le «ressentir intime», ineffable, que les philosophes appellent parfois «les qualia».

Plutôt que d'entamer une polémique, je renvoie les lecteurs à l'article de David Chalmers : «Qu'est-ce que la conscience?» (voir *Pour la Science*, février 1996).

Pour D. Chalmers, qui définit parfaitement le sens du mot tel qu'envisagé ci-dessus, et la différence des autres sens de ce mot, la neurophysiologie commence à y voir clair dans ce qu'il appelle les «problèmes faciles»; mais le «problème difficile», celui de la conscience intime, du ressentir, est esquivé.

Je suis d'accord avec A. Damasio lorsqu'il dit que, d'ici 2050, nous serons débarrassés des séparations traditionnelles entre le corps et le cerveau. Mais cela concernera les fonctions du cerveau qui seront (et sont en passe de l'être) reproduites par des puces : toutes les fonctions qui gèrent nos réactions aux stimulations sensorielles, et globalement notre comportement, la pensée, l'esprit si on veut.

Mais la conscience, en tant que ressentir, demeurera inviolée si l'on ne commence pas par admettre son existence...

Jean Pierre MORONI, Paris

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

JEU-CONCOURS N° 70

PIERRE TOUGNE

Propriétés inévitables

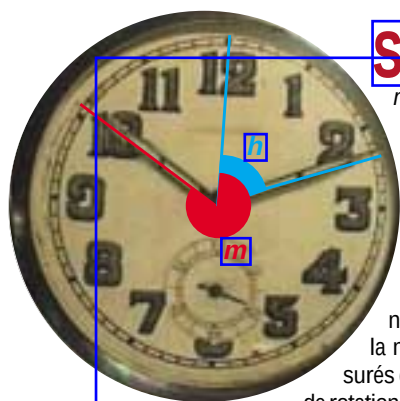
En mathématiques, démontrer que, selon le nombre d'éléments d'un ensemble, une propriété particulière sera toujours vraie, est généralement délicat sinon déconcertant. En voici deux exemples simples. Prenez les 26 lettres de l'alphabet que vous écrivez dans un ordre quelconque. Pouvez-vous démontrer qu'il y aura toujours six lettres lues de gauche à droite (mais pas nécessairement consécutives) qui seront dans l'ordre lexicographique normal ou inverse?

Dans le deuxième exemple, prenez n nombres entiers différents de 0 et 1 choisis au hasard. Quelle est la valeur minimale de n pour être certain que soit trois nombres ont un diviseur commun, soit trois nombres sont premiers entre eux? Pour les lecteurs qui trouveraient ce problème trop simple, je leur suggère hors concours de s'attaquer à la valeur de n pour quatre nombres.

k w d h f g
y r t i v s q
a z l c j u e
m o n x b p

Envoyez vos réponses aux questions à Pour la Science, 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois d'avril 2000, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 68



Si l'on désigne par h et m les angles que font respectivement l'aiguille des heures et des minutes avec minuit (le 12 de la montre) mesurés dans le sens de rotation des aiguilles avec pour unité l'angle d'un tour complet (soit 360 degrés), ces deux angles seront deux nombres réels compris entre 0 et 1 exclu. Soit t le temps écoulé depuis minuit (donc l'heure) avec comme unité l'heure, alors t sera un nombre réel compris entre 0 et 12 exclu. Les angles h et m des aiguilles pour cette heure seront $h = t/12$ et $m = t - [t]$ où $[t]$ désigne la partie entière de t (en fait, le nombre de tours qu'a fait l'aiguille des minutes depuis minuit).

Remarquons que tous les couples (h, m) ne sont pas possibles. En effet, en éliminant t entre h et m , on obtient $12h - m = [t]$, c'est-à-dire que $12h - m$ doit être entier. Si maintenant les deux aiguilles sont identiques avec des positions angulaires x et y , pour connaître l'heure, il suffit de calculer les deux nombres $12x - y$ et $12y - x$. Deux cas se présentent :

un seul nombre est entier, alors l'aiguille des heures est celle dont l'angle a été multiplié par 12, donc l'heure est connue où les deux nombres sont entiers, auquel cas on ne peut savoir quelle est l'aiguille des heures d'où l'ambiguïté. Soit a et b , ces deux entiers < 12 , on aura le système d'équations $12x - y = a$, $12y - x = b$ dont la résolution donne $x = (12a + b)/143$ et $y = (12b + a)/143$, c'est-à-dire $x = k/143$ avec k entier. La condition $0 \leq x < 1$ donne $0 \leq k < 143$, soit 143 ambiguïtés. Cependant il n'y a pas ambiguïté si les aiguilles sont confondues, cela se produira quand $t/12 = t - [t]$, soit $t = 12n/11$ avec n entier $0 \leq n < 11$ donc 11 fois. Il reste $143 - 11 = 132$ cas ambigus qui en fait se regroupent deux par deux (les deux possibilités pour l'heure), soit finalement 66 heures ambiguës. En cas d'ambiguïté, les deux heures possibles sont $t_1 = 12x = 12(12a + b)/143$ et $t_2 = 12y = 12(12b + a)/143$, l'ambiguïté est donc $|t_1 - t_2| = 12|a - b|/13$. Elle est minimale pour $|a - b| = 1$, soit $|t_1 - t_2| = 12/13h > 55mn\ 23s$ et maximale pour $|a - b| = 11$, soit $|t_1 - t_2| = 132/13h > 10h\ 9mn\ 14s$.

Comme me l'on fait remarquer plusieurs lecteurs : en cas d'ambiguïté, il suffit au mathématicien d'attendre quelques secondes pour savoir quelle est l'aiguille des minutes, mais c'est oublier le caractère entier de tous mathématiciens!

L'éthique de la fin de vie

ROBERT ZITTOUN

La médecine doit s'effacer face à la mort et accompagner les mourants au lieu de légaliser l'euthanasie.

Le seul problème moral vraiment sérieux, disait Camus, c'est le meurtre. Mais de savoir si je puis tuer cet autre devant moi, ou consentir à ce qu'il soit tué, savoir que je ne sais rien avant de savoir si je puis donner la mort, voilà ce qu'il faut apprendre. Le temps a passé, et l'on n'a pas fini d'apprendre, ni de débattre de la position de la société et, notamment, de la médecine sur l'euthanasie.

Pour se doter d'une législation sur cette question, les pays démocratiques font des sondages : ils choisissent des échantillons de personnes qu'ils espèrent représentatives et leur demandent si elles seraient d'accord pour que l'on aide à mourir des personnes atteintes d'une maladie incurable, quand elles le souhaitent. Il est remarquable que la majorité des Français, même proches de la religion, répondent «oui».

Toutefois ces sondages sont doublement ambigus. D'une part, quand on demande «pensez-vous qu'il faille aider les gens en fin de vie à mourir?», on évoque aussi bien une euthanasie active qu'un accompagnement des individus malades dans le chemin vers la mort. D'autre part, la question est posée à des personnes qui ont été parfois très peu exposées à la fin de vie de leurs proches : on meurt aujourd'hui à l'hôpital. N'est-il pas gênant que cette grande majorité des Français qui réclame la légalisation de l'euthanasie connaisse si mal la fin de vie?

Dans le grand débat de l'euthanasie, deux questions principales se posent : qui décide de faire mourir une personne en fin de vie? Qui fait le geste? À propos de la légitimité du geste, deux grands mouvements idéologiques s'opposent : certains militent pour légaliser l'euthanasie active, et d'autres, dont je suis, réclament le développement d'une médecine de soins palliatifs, afin que la vie s'achève en causant le moins possible de souffrances (morales et physiques) au patient, à ses proches et aux personnels soignants (on ne tient jamais assez compte de ceux-ci).

Les deux mouvements ont des points communs : ils disent se préoccuper du patient en fin de vie et ils sont opposés à l'acharnement thérapeutique, qui prolonge la vie, mais, surtout, prolonge la souffrance, dans des conditions de déshumanisation : mort sous machine, sans communication possible avec les proches.

Pourquoi préférer le développement des soins palliatifs à la légalisation de l'euthanasie? Certains de ceux qui prônaient l'euthanasie active voulaient conserver aux mourants leur «dignité», mais l'idée est dangereuse : est-on moins humain quand les fonctions physiques ou l'apparence ne correspondent pas à une norme? Craignons l'instauration insidieuse d'une échelle de valeurs dans l'humanité ; cette idée a déjà conduit à des horreurs.

De surcroît, l'homicide, même par compassion, a toujours semblé incompatible avec la fonction soignante. Le «droit de mourir» existe, écrit le philosophe allemand Hans Jonas, mais cela ne donne pas un droit de tuer. En outre, si la société décidait de recourir à l'euthanasie, pourquoi des médecins devraient-ils être chargés de tels actes, contraires à leur fonction?

Les Pays-Bas et l'Oregon ont pris de ces mesures qui se discutent en France. Aux Pays-Bas, l'euthanasie n'est pas légalisée, mais dépénalisée, quand elle est réalisée à la demande expresse et réitérée du mourant, après discussion avec plusieurs médecins, qui transmettent leur compte rendu au procureur. Ce système est médiocre, car la moitié des actes d'euthanasie restent clandestins : n'aurait-on pas instauré une procédure supplémentaire, qui aurait dû être évitée?

D'autre part, l'Oregon a légalisé le suicide médicalement assisté : les patients peuvent réclamer la prescription par le médecin de médicaments qui leur permettent de se suicider. Dans les deux cas, les analyses récentes montrent la per-

sistance de souffrances chez bien des personnes qui ont recours à ces méthodes.

Cette dernière observation incite à analyser mieux les demandes d'euthanasie. Certes, un nombre croissant de personnes en fin de vie réclame l'euthanasie, et la société reconnaît un droit au suicide. Les partisans de l'euthanasie en tirent argument. Toutefois la volonté d'euthanasie n'est peut-être pas si fréquente qu'on le dit. D'ailleurs le médecin de terrain constate inévitablement que nombre de demandes d'euthanasie sont surtout des appels à l'aide : à certains moments, les patients disent préférer en finir, expriment que la mort serait préférable. Toutefois les personnes en fin de vie admettent tardivement leur état. Sauf dans quelques cas, leur demande ne révèle pas véritablement la volonté de recevoir un acte d'euthanasie de la part d'un médecin. Ce dernier doit donc les écouter, décoder, comprendre et soulager.

Arrêt d'un traitement ou euthanasie active : dans tous les cas, la décision ne doit pas être confisquée par le pouvoir médical, mais elle doit être donnée à l'environnement social : patients, familles, médecins, équipes soignantes. Ce report de responsabilité impose l'échange d'informations médicales et psychologiques. Comment préparer ces dialogues? Informons le public et donnons aux médecins un enseignement de l'humanisme (qu'ils ont bien insuffisamment!), à côté de l'enseignement scientifique et technique.

Enfin, et surtout, organisons matériellement l'accompagnement des mourants afin que les tentations d'euthanasie se réduisent. Créées à la fin des années 1980, les équipes multidisciplinaires de soins palliatifs ont pour fonction d'assister les malades en fin de vie. Ces unités n'épuiseront pas les demandes d'euthanasie, mais elles éviteront une légalisation dangereuse pour l'avenir. La recommandation récente du Comité consultatif national d'éthique, d'intégrer dans les pratiques et la loi une «exception d'euthanasie», entrouvre la porte vers une déviance des soins de fin de vie et des valeurs qui fondent notre société. Parfois, s'il est bon d'apporter une sédation terminale, apportons-la sans la qualifier d'euthanasie.

La fin de la vie est une intimité que la loi ne doit pas violer.

Robert ZITTOUN est professeur à l'Université Paris VI, ancien chef de service d'hématologie de l'Hôtel-Dieu et fondateur de l'équipe mobile de soins palliatifs.

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

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

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



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

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



Des lois de Mendel à la lecture du génome

MICHEL MORANGE

Les lois de l'hérédité que Mendel a établies sur des petits pois ont marqué le début de l'histoire de ce qui allait devenir la génétique, et de la grande aventure de la biologie du xx^e siècle.

Le 26 mars 1900, le botaniste néerlandais Hugo de Vries publie dans les comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris un texte intitulé *Sur la loi de disjonction des hybrides*, considéré comme l'acte de naissance de la génétique, même si ce nom ne fut donné à la nouvelle discipline que quelques années plus tard. Cent ans après, le décryptage complet du génome humain est entré dans sa phase finale et devrait être achevé d'ici deux à trois ans. Pendant ce siècle, la génétique est devenue le principal moteur des transformations de la biologie.

Pourtant, la publication de de Vries n'était que la «redécouverte» des lois établies, dès 1865, par Mendel : celui-ci avait travaillé sur des petits pois, et choisi sept caractères qui différaient entre variétés, par exemple la taille et la couleur des graines ou la longueur de la tige. En croisant ces différentes variétés, il avait pu

suivre la transmission, au cours des générations, de ces caractères, et établir les principales lois de l'hérédité : il existe des caractères dominants et d'autres récessifs ; les déterminants des caractères ne se mélangent pas et sont transmis inaltérés et de façon aléatoire à la descendance ; des caractères différents sont transmis de manière indépendante.

Les travaux de Mendel sont remarquables par le grand nombre de croisements réalisés, ce qui lui a permis d'établir des rapports exacts, que certains de ses prédécesseurs avaient entrevus, mais n'avaient pu démontrer ; ils le sont aussi par la rigueur de la démarche expérimentale, par le soin apporté au choix des caractères ou par les précautions prises pour éviter toute interférence avec la pollinisation naturelle.

Mendel présenta ses résultats en 1865 à la Société des sciences naturelles de Brno, et les publia un an plus tard dans

les comptes rendus de cette société. Pourtant, ces résultats furent ignorés.

Non pas, comme une légende tenace continue à l'affirmer, que Mendel ait été un pauvre moine isolé travaillant dans une province retirée de l'Empire austro-hongrois. Appartenant à un ordre religieux dynamique, ouvert sur le monde, enseignant dans une école technique située dans une région riche et commerçante de l'Europe, Mendel avait étudié à Vienne les derniers développements de la théorie cellulaire et il entretenait une correspondance avec plusieurs des grands biologistes de son temps. Si l'importance de son travail ne fut pas immédiatement reconnue, c'est que l'objectif de Mendel, la recherche des principes qui assurent la stabilité des plantes hybrides – un objectif de «jardinier» –, était bien différent de celui de la jeune génétique, qui recherchait les lois de transmission, au cours des générations, des variations héréditaires impliquées dans l'évolution des formes vivantes.

En outre, à l'époque de Mendel, les mécanismes intimes de la fécondation étaient encore mal connus. Grâce au travail des cytologistes et aux écrits de Charles Darwin, du biologiste allemand August Weismann (l'un des premiers à comprendre le rôle des chromosomes), et de de Vries, notamment, s'impose peu à peu, à la fin du xix^e siècle, l'idée qu'il existe un support matériel des phénomènes héréditaires, probablement localisé dans le noyau cellulaire.

En 1900, le terrain scientifique est prêt à accueillir une science de l'hérédité : presque simultanément, Carl Correns et Erich von Tschermak obtinrent les mêmes résultats que de Vries, et tous firent de Mendel le précurseur méconnu de leurs propres travaux. En réalité, les travaux de Mendel avaient été cités plusieurs fois dans des ouvrages publiés entre 1865 et 1900, et ses redécouvreurs les connaissaient



Le jardin botanique où Mendel fit ses expériences.

probablement : en attribuant à Mendel la découverte fondamentale, ils réglaient ainsi un difficile problème de priorité.

La génétique se développe ensuite, simultanément, dans de nombreux pays. Elle se transforme, aussi, rapidement. En 1900, elle est une science d'observation et de prédiction de l'effet des croisements, elle n'est pas une science explicative. Elle n'apprend rien sur la nature du «matériel héréditaire», ni sur les mécanismes qui contrôlent la formation des caractères. Plusieurs des «pères de la génétique», et Thomas Morgan lui-même, qui est pourtant le premier à travailler sur la petite mouche drosophile et qui va fonder, aux États-Unis, dès 1910, l'école de génétique la plus dynamique, sont assez réticents à tenter d'identifier le support de l'hérédité.

L'attitude des premiers généticiens vis-à-vis des gènes ressemble à celle de beaucoup de chimistes vis-à-vis de l'atome quelques décennies plus tôt : certains chimistes acceptèrent le concept d'atome, car il permettait de prédire de nombreux phénomènes, mais ils refusèrent de transformer ce concept en un objet. Les raisons de cette attitude étaient multiples : prudence, influence de la philosophie empiriste, très répandue parmi les scientifiques à la fin du XIX^e siècle, qui recommandait de se méfier des concepts superflus, ou peur de la part de certains biologistes de revenir aux errements des préformationnistes qui, quelques siècles plus tôt, supposaient que les êtres vivants étaient entièrement préformés dans les organes reproducteurs de leurs parents, qu'ils existaient déjà terminés sous forme d'un homonculus minuscule, et qu'ils ne faisaient que se développer durant la grossesse. Toutes ces raisons se conjuguèrent sans doute pour donner à la jeune génétique un caractère formel, quelque peu désincarné, contrastant fortement avec les autres branches de la biologie.

L'histoire de la génétique pendant la première moitié du XX^e siècle est un lent processus d'objectivation du gène : localisation sur le chromosome, identification à une molécule d'acide nucléique et, enfin, démonstration de sa capacité à coder une protéine qui participe à l'une des multiples fonctions inhérentes à la vie cellulaire.

Cette difficulté à comprendre la structure et la fonction des gènes explique en partie l'isolement de la génétique pendant ses premières années d'existence. Le rapprochement avec les autres disciplines biologiques fut lent et progressif. À la fin des années 1930, les modèles des généticiens se combinèrent à la théo-

rie darwinienne de l'évolution pour engendrer le néo-darwinisme, ou théorie synthétique de l'évolution. Celle-ci propose que l'évolution des formes vivantes résulte de mutations de petite amplitude, apparaissant spontanément chez les êtres vivants et transmises selon les lois de Mendel, et de la sélection naturelle de ces mutations au cours des générations. Le rapprochement avec l'embryologie fut encore plus difficile, et ce n'est qu'au début des années 1980 que s'est pleinement épanouie la génétique du développement.

UNE DISCIPLINE ISOLÉE, MAIS AUTONOME

Cet isolement de la génétique n'a pas eu que des effets négatifs : en Grande-Bretagne ou aux États-Unis, notamment, il a favorisé l'autonomisation de cette discipline et son développement rapide. La petite mouche drosophile choisie par Morgan était un matériel expérimental exceptionnel : peu consommatrice de nourriture, se reproduisant rapidement, elle permettait, avec un investissement matériel et financier limité, d'observer en peu de temps l'effet de centaines de croisements différents. Les résultats ainsi établis furent transposés à d'autres espèces animales et végétales.

Ce schéma de développement, c'est-à-dire une autonomisation et une croissance rapide, suivies de l'établissement difficile de relations avec les autres branches de la biologie, n'a pas été général. En Russie, par exemple, les approches de la génétique furent très tôt appliquées à l'étude des populations animales en milieu naturel, ouvrant ainsi la

voie au rapprochement entre génétique et théories de l'évolution. De même, plusieurs mutations perturbant la formation de la drosophile ont été décrites précisément par les généticiens russes, qui tentèrent de les expliquer par le schéma de développement de cet organisme. Ces travaux furent brusquement arrêtés lorsque la génétique fut critiquée comme science bourgeoise et réactionnaire, à laquelle on substitua la théorie lyssenkiste, forme caricaturale du néo-lamarckisme. La génétique semblait figer le devenir des formes vivantes et, en particulier, de l'homme ou, du moins, rendre ce devenir aléatoire et incontrôlable. À l'opposé, le lamarckisme, en proposant que le milieu puisse transformer, de manière stable et transmissible, les formes vivantes, laissait à l'homme un large champ d'action sur les espèces vivantes, animales ou végétales, et sur lui-même : la transformation de l'homme par l'homme restait possible. Toutefois, les premiers travaux russes ne furent pas entièrement oubliés : grâce à plusieurs savants qui émigrèrent aux États-Unis, comme Theodosius Dobzhansky, ces spécificités de la génétique russe furent importées dans la génétique américaine.

En Allemagne, les études de génétique n'ont pas été séparées des travaux de physiologie ou d'embryologie : la modicité des moyens attribués à la recherche allemande, du fait de la crise économique, et la rigidité du système universitaire germanique ont rendu impossible l'autonomisation de la discipline. De surcroît, la biologie allemande fut décapitée en 1933, lors de l'arrivée au pouvoir des nazis, ce qui assura le succès sans partage de la génétique «morganienne».



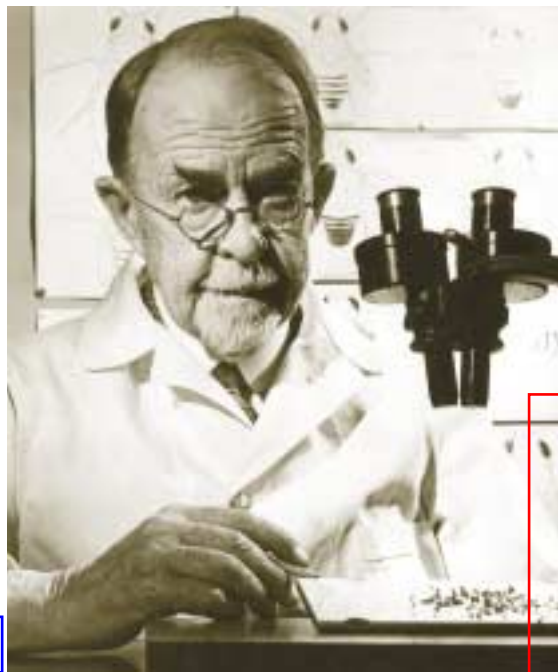
Le botaniste de Vries, ici procédant à des fécondations et à des croisements de fleurs, a activement participé à la redécouverte des lois de Mendel.

LA MENACE
EUGÉNISTE

En France, plus encore même qu'en Allemagne, l'autonomisation de la génétique fut lente. La première chaire de génétique ne fut créée dans notre pays qu'après la Seconde Guerre mondiale. Ce rejet de la génétique est souvent considéré comme la suite logique, mais regrettable, du mauvais accueil réservé au darwinisme à la fin du XIX^e siècle et comme la conséquence d'une forte tradition lamarckienne. En fait, la situation était plus complexe. Dès 1902, le biologiste français Lucien Cuénot est le premier à montrer que les lois de Mendel établies sur les végétaux s'appliquent aussi aux mammifères. La plupart des biologistes français, tel Maurice Caullery, ne rejettent pas le mendélisme, mais lui attribuent une importance moindre que celle d'autres mécanismes essentiels pour le développement embryonnaire.

Enfin, la contribution des biologistes français Georges Teissier, Philippe L'Héritier et Gustave Malécot au développement de la génétique des populations commence seulement aujourd'hui à être pleinement reconnue. De plus, l'attention portée par beaucoup de biologistes français à la physiologie et aux capacités d'adaptation des organismes vivants, héritée de Claude Bernard, fut essentielle pour le développement des travaux sur la régulation génétique de l'école française de biologie moléculaire, représentée par André Lwoff, François Jacob et Jacques Monod. Ces travaux permettaient de comprendre comment l'activité des gènes pouvait être modifiée par des signaux venus de l'extérieur de la cellule, ou même de l'organisme. Considérés comme les plus «élégants» de l'histoire de la biologie moléculaire, ils constituèrent, dans les années 1980, le socle de la génétique du développement.

Les biologistes français, qui ont quelque peu dédaigné la génétique et opté pour un modèle lamarckien d'évolution, ont généralement échappé aux errements eugénistes. L'eugénisme n'est pas une conséquence directe de la génétique, puisque les idéologies eugénistes, visant au contrôle de la reproduction humaine, ont accompagné l'humanité depuis l'Antiquité. La «science de l'eugénique» a été fondée par Galton à la fin du XIX^e siècle, avant même l'essor de la génétique. Beaucoup de généticiens ont crû qu'ils devaient apporter leurs compétences au service des projets eugénistes, certains par conviction personnelle qu'une politique eugé-



Thomas Morgan a été l'un des premiers à entrevoir le potentiel qu'offrait la drosophile pour l'étude des gènes.

niste était nécessaire pour lutter contre la dégradation du «patrimoine» génétique humain (pour reprendre une expression actuelle), d'autres, sans doute, par opportunisme et dans l'espoir d'attirer ainsi vers eux attention et financements.

Aujourd'hui comme hier, les gènes fascinent. Montaigne s'étonnait déjà dans *Les Essais* que sa propension à avoir des calculs rénaux lui ait été transmise par son père des décennies plus tôt, alors que ce dernier n'en avait pas encore lui-même souffert. Quel mystère et quelle puissance dans cette goutte de semence ! Logés au cœur de chacune de nos cellules, les gènes semblent être les témoins fidèles de notre passé biologique et les organisateurs de notre devenir. L'étude des gènes permet de reconstituer l'histoire du peuplement de la terre par *Homo sapiens sapiens*. La lecture de la séquence de certains de nos gènes annonce la survenue de telle ou telle maladie. Demain peut-être, demain sans doute, elle nous autorisera à connaître, dès la naissance, certaines des caractéristiques physiologiques ou psychologiques fondamentales des êtres humains.

Paradoxalement, plus la connaissance des produits des gènes progresse, plus la relation entre les gènes et les caractères apparaît compliquée. Les produits élémentaires de nos gènes s'assemblent en réseaux et en machines moléculaires complexes, nichées au sein de nos cellules. Les mêmes composants élémentaires participent à des fonctions très diverses. Les fonctions les plus complexes de l'organisme reposent sur les propriétés de milliers de cellules, elles-mêmes constituées

de centaines de composants élémentaires différents, dont bien peu sont spécifiques de la fonction considérée. Intervention multiple des mêmes gènes dans des mécanismes différents, participation de plusieurs gènes semblables à la réalisation d'un même mécanisme : tous ces phénomènes connus depuis les débuts de la génétique, mais dont les travaux récents ont souligné l'importance, donnent au pouvoir des gènes des caractéristiques bien particulières.

Les approches de l'ère post-génomique, où nous entrons aujourd'hui après que la structure de l'ensemble des gènes de plusieurs organismes vivants a été déterminée, tiennent compte des observations précédentes. En s'appuyant sur de nouvelles technologies comme les biopuces à ADN, les biologistes vont étudier simultanément l'activité de l'ensemble des gènes de l'organisme. L'objectif est de remplacer la réductionnisme étroit de la génétique classique, qui mettait en relation les différentes caractéristiques d'un organisme vivant avec l'activité d'un ou de quelques gènes, par une vision plus globale, où les états de fonctionnement de la cellule ou de l'organisme seront reliés à des «cartes» d'activité génique.

Cette nouvelle génétique, aujourd'hui en gestation, représentera sans nul doute une révolution profonde dans notre connaissance des êtres vivants. Elle aura le mérite d'écarter les fantasmes de la recherche «du» gène de l'intelligence ou de l'homosexualité. Elle ne retirera rien, au contraire, au pouvoir des gènes.

Il faudra apprendre à naviguer entre l'eugénisme et l'angélisme de ceux qui dénie tout pouvoir aux gènes, et se convaincre que les gènes sont ce qui nous permet d'être humain, non ce qui détermine quelle femme ou quel homme nous serons. Chacun de nous porte un ensemble de formes de gènes différentes, qui nous donnent des aptitudes différentes. À nous de développer ces aptitudes et de pallier nos inaptitudes. Notre égalité en tant qu'êtres humains ne repose pas sur l'identité de nos capacités et de nos gènes, mais sur la liberté que chacun de nous a de développer au mieux ses propres capacités.

Michel MORANGE travaille dans le Laboratoire de génétique moléculaire à l'École normale supérieure de Paris. Il a participé à l'organisation du colloque de l'Académie des sciences et de l'Institut de France 1900, *Redécouverte des lois de Mendel*, qui s'est tenu du 23 au 25 mars 2000.

Le goût du froid

HERVÉ THIS

Le refroidissement ou le réchauffement de la langue suscitent la perception de saveurs, même en l'absence d'aliments.

La physiologie du goût est aujourd'hui une déferlante : ces dernières années, les physiologistes ont élucidé les bases moléculaires de la sensation gustative du piquant, puis ils ont identifié, dans les cellules des papilles gustatives, les mécanismes qui conduisent à la perception de la saveur ; le mois dernier, ils ont découvert – enfin ! – le premier récepteur d'une molécule sapide. Les physiologistes ont en main les méthodes analytiques pour trouver d'autres récepteurs... mais la nouveauté est inattendue. C'est la découverte de «saveurs thermiques» : des variations de la température de la langue suscitent la perception de saveurs sans que des molécules sapes ne soient présentes!

Quand nous mangeons, diverses molécules des aliments stimulent les cellules olfactives du nez, les papilles de la bouche, des récepteurs de la douleur (pour le piquant) et, aussi, des capteurs mécaniques ou thermiques. Comment les diverses perceptions interagissent-elles pour former la notion synthétique du «goût»? On a longtemps supposé que les informations obtenues par les diverses cellules sensorielles montaient, de neurone en neurone, jusqu'aux centres supérieurs du cerveau, qui les interprétaient, formant la sensation du goût, mais les électrophysiologistes ont compris, il y a quelques années, que cette description était insuffisante : les informations sensorielles se mélangent dès les premiers relais neuronaux, et l'«intégration» sensorielle commence dès la langue.

Afin de déterminer l'effet physiologique de ce mélange, Ernesto Cruz et Barry Green, de l'Université Yale, ont cherché l'effet de la température des aliments sur la perception des saveurs. À cette fin, ils ont stimulé la langue de sujets à l'aide de petites «thermodes», des systèmes dont on commande la température à l'aide de courants électriques... et

c'est ainsi qu'ils ont redécouvert les «saveurs thermiques» suscitées par divers réchauffements ou refroidissements de la langue (l'effet avait été découvert il y a 35 ans, mais l'observation avait été intégrée à une théorie controversée).

Les réactions n'étaient pas identiques pour tous les individus, mais, pour une forte proportion des sujets testés, le chauffage de la pointe de la langue (jusqu'à la température de 35 °C) produisait une légère sensation sucrée, tandis que le refroidissement (jusqu'à 5 °C) provoquait la sensation acide, et salée pour un des sujets. Le chauffage de l'arrière de la langue ne donnait qu'une faible sensation de sucré, mais le refroidissement de l'arrière langue suscitait souvent des sensations plus nettes, décrites comme amères ou acides. Certains des sujets testés ne percevaient aucune de ces saveurs thermiques.

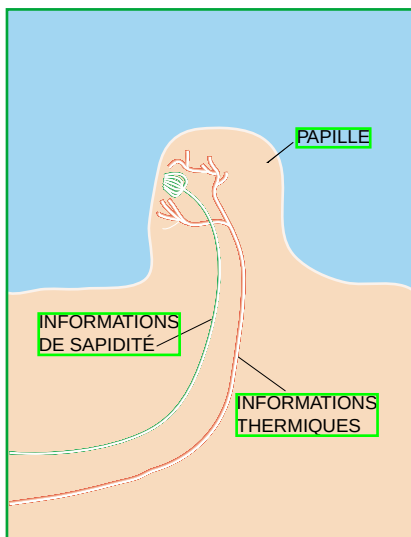
Étrange phénomène, qui méritait d'être exploré. Les physiologistes cherchèrent d'abord à quantifier les relations entre la température et l'intensité des sensations : l'intensité de la saveur sucrée, à l'avant de la langue, augmente avec la température (jusqu'à 35 °C), alors que l'«acide thermique», dû au refroidisse-

ment, évolue vers le salé. Puis, comme les sujets avaient souvent signalé des différences entre le centre et les bords de la langue, les chercheurs précisèrent les impressions : la perception du sucré thermique est maximale sur la pointe de la langue pour tous les sujets et l'acide thermique est mieux perçu sur les bords de la langue.

Comment interpréter ces résultats? On sait que les fibres nerveuses de deux nerfs crâniens innervent les papilles : les fibres de la corde du tympan se ramifient dans les papilles gustatives et transmettent les informations sur les saveurs, tandis que les fibres de la branche linguale du nerf trigéminal se terminent dans l'épithélium des papilles, près des bourgeons du goût, et elles transmettent au cerveau les informations de température, douleur, irritation et pression. Les capteurs thermiques et les récepteurs des saveurs sont proches dans la bouche.

Ainsi les changements de température activeraient les récepteurs responsables du codage normal de la perception des saveurs. Dans cette hypothèse, on devrait bloquer les saveurs thermiques en stimulant les récepteurs de saveurs. Au contraire, si la saveur thermique n'est pas due aux récepteurs normaux des saveurs, le blocage de ces récepteurs n'aura pas d'effet sur la perception de la saveur thermique. Les tests sont en cours.

Que feront les cuisiniers de telles découvertes? On ne goûte pas de la seule pointe de la langue, de sorte que l'effet des saveurs thermiques est faible en dégustation courante. En revanche, chacun peut déterminer s'il fait partie des personnes qui perçoivent les saveurs thermiques : il suffit de placer un glaçon contre la pointe de la langue, ou de tremper celle-ci dans un verre d'eau tiède.



Les capteurs thermiques (en rouge) sont proches des récepteurs des saveurs (en vert) dans les papilles gustatives.

Prochain rendez-vous **France Info et Pour la Science** le 25 avril 2000, avec la chronique **Info Sciences** de Marie-Odile Monchicourt.

La Lune, artefact extraterrestre ?

Une mission sera lancée vers la Lune afin de le vérifier.

Si, quelque part dans notre Galaxie, il existe une civilisation extraterrestre plus évoluée que la nôtre, les modèles mathématiques montrent que cette civilisation aurait dû coloniser la Galaxie rapidement. Dans ce cas, cette civilisation aurait vraisemblablement atteint notre Système solaire il y a des millions d'années. Y aurait-elle laissé des traces ?

En 1948, l'écrivain britannique Arthur C. Clarke imagine dans sa nouvelle *La sentinelle* que des extraterrestres avaient placé sur la Lune une balise qui se déclencherait dès qu'elle serait découverte, signalant à ses constructeurs que l'homme avait atteint l'âge de l'astronautique. L'idée de ces balises bien proches est reprise et étendue, en 1968, dans *2001, l'Odyssée de l'espace* : enterré sur la Lune, un monolithe parallélépipédique noir émet un signal en direction de Jupiter.

Entre temps, l'idée d'une présence extraterrestre sur la Lune avait été exploitée par différents auteurs, notamment par les Français Alfred Nahon et Jean Sendy qui proposaient d'interpréter dans ce sens les émissions lumineuses énigmatiques, repérées par les astronomes et connues sous le nom de phénomènes lunaires transitoires.

Tous ces scénarios oublient qu'une civilisation suffisamment évoluée pour voyager à travers la Galaxie disposerait de capacités techniques bien supérieures aux nôtres, au point de pouvoir créer des structures indiscernables des structures naturelles. Aussi, ne doit-on pas chercher une structure manifestement artificielle, mais plutôt quelque chose d'apparemment naturel, hormis quelques détails conduisant à soupçonner l'intervention d'une intelligence. C'est cette idée que retint le grand astronome russe Joseph Schklovski, en 1959, lorsqu'il suggéra qu'un certain nombre d'anomalies dans les orbites des deux satellites de Mars, Phobos et Deimos, ne pouvaient s'expliquer que s'ils étaient creux et, donc, artificiels. Scrutant attentivement la face de l'orbite de l'un comme de l'autre, Schklovski suggéra qu'une antique civilisation martienne, arrivée à son apogée alors que la vie terrestre sortait à peine des océans, aurait pu laisser cette marque de

son passage. Depuis, les anomalies des satellites martiens ont été expliquées par la mécanique céleste, et le problème est revenu à son point de départ.

Considérons le problème soulevé voici quelques années par l'astrophysicien américain Gregory Benford : quelle est la probabilité que, sur un astre abritant la vie, la taille apparente de son satellite «naturel» coïncide exactement avec la taille apparente de l'astre solaire ? Très faible, et il est manifeste que la Terre est le seul lieu du Système solaire d'où l'on peut contempler des éclipses totales de Soleil. D'où l'idée d'arrêter la recherche d'artefacts ou de signaux extraterrestres et de tester l'hypothèse selon laquelle la Lune est elle-même un artefact extraterrestre. Il n'est même pas nécessaire d'imaginer que la Lune soit artificielle. Ce qui est artificiel, c'est qu'elle soit placée exactement là où elle se trouve.

Cette idée, absurde au premier abord, se révèle pourtant d'une logique implacable. Pour plusieurs raisons. La première, et la plus évidente, est bien entendu l'existence des éclipses de Soleil. Ces spectacles impressionnants ont joué un rôle majeur dans les religions antiques, et leur compréhension a nécessité des siècles de recherche en mathématiques et en astronomie tant théorique qu'observationnelle. Les éclipses de Soleil ont donc indéniablement été un facteur important d'évolution culturelle.

Ensuite, on a reconnu ces dernières années que plusieurs circonstances, négligées jusqu'alors, avaient joué un rôle clé dans l'apparition de la vie sur Terre. L'un de ces événements «miraculeux» concerne justement la Lune. Dotée d'une masse relativement importante par rapport à celle de la Terre, elle a stabilisé la position de l'axe de rotation terrestre grâce aux forces de marées, ce que Galilée analysa comme l'«effet des forces liantes de marées». En empêchant la Terre de danser la gigue sur son axe, la présence de la Lune évite les catastrophes climatiques que ces déplacements chaotiques répétés auraient entraînées. En effet, la variation saisonnière de la durée des nuits et des jours est due à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite autour du Soleil. Si cet axe se couchait dans le plan orbital, les saisons seraient terriblement contrastées : une moitié du Globe serait plongée dans une nuit d'environ six mois, tandis que l'autre serait, pendant la même période, soumise au rayonnement solaire. Certains scientifiques pensent que



ce scénario catastrophe a privé Mars de son atmosphère initiale, y interdisant à jamais le développement de la vie. La Lune ayant stabilisé l'axe de rotation terrestre, les saisons seraient restées relativement stables sur Terre, assurant la clémence des conditions climatiques et permettant l'émergence de la vie. Y aurait-il, quelque part dans la Lune, des réacteurs qui serviraient à modifier son orbite et qui l'auraient amené à sa position actuelle ?

Enfin, la sonde *Lunar Prospector*, qui s'est écrasée sur le sol de notre satellite en juillet 1999, a décelé dans le spectre infrarouge de certaines régions lunaires des signatures spectrales inexpliquées.

Fort de ces indices convergents, la NASA vient de décider de lancer SETOM (pour *Search for Extraterrestrial Origin of the Moon*, soit «recherche de l'origine extraterrestre de la Lune»), un nouveau projet de recherche en marge du fameux programme SETI (pour *Search for Extraterrestrial Intelligence*, soit «Recherche d'intelligence extraterrestre»). La première étape de ce projet consistera en la construction et l'envoi en orbite lunaire d'une sonde nommée LOVE (*Lunar Orbiter Vehicle Expedition*) qui analysera de manière fine la gravité lunaire afin de détecter d'éventuelles anomalies souterraines : si la Lune comporte des creux qui abritent des réacteurs ou des systèmes de commande, sa gravité sera différente de celle d'une sphère pleine. Plusieurs petits modules d'excavation seront aussi largués à la surface lunaire. Outre détecter d'éventuels sons, leur rôle sera de s'enfouir dans le sol lunaire afin d'analyser de plus près les anomalies décelées par la sonde, après avoir noté la cote des creux. Cette mission ambitieuse et originale devrait être lancée au tournant du siècle.

P. THEBARN et R. LYEHOOKE,
Département d'exo-sociologie
& Chaire de bioastronomie,
Université Miskatonic, Rhode Island

Le bégaiement des coucous

Pour que ses parents adoptifs le nourrissent assez, le petit coucou émet des «cris de faim» de plus en plus fréquents.

Étudié par Nicholas Davies et ses collègues de l'Université de Cambridge, depuis une quinzaine d'années, le coucou gris *Cuculus canorus* est d'une surprenante «ingéniosité». Si les femelles reproductrices usent de tactiques variées et efficaces pour faire adopter leurs œufs par des familles hôtes appartenant à d'autres espèces, les petits coucous au nid sont tout aussi habiles pour se faire nourrir par leurs parents adoptifs. Ainsi, les jeunes coucous élevés par des rousserolles effarvates, une espèce de fauvettes, utilisent les signaux de l'espèce hôte pour élaborer d'autres signaux, différents de ceux des petites fauvettes, mais aussi efficaces.

N. Davies et ses collègues ont d'abord étudié la communication familiale lors du nourrissage des jeunes de l'espèce hôte. Pour obtenir à manger de leurs parents, les petites fauvettes émettent un double signal, visuel et sonore : elles ouvrent largement leur bec, exhibant l'intérieur coloré, et émettent un petit cri répétitif. Utilisant un grand échantillon de «familles» naturelles ou expérimentales, les ornithologues ont vérifié, d'une part, que les petites fauvettes informent «honnêtement» leurs parents de leurs besoins alimentaires : plus les poussins ont faim, plus ils ouvrent le bec et plus ils crient vite. D'autre part, ils ont montré que

l'empressement des parents à nourrir les jeunes augmente avec le double signal de sollicitation codé par la superficie de la tache colorée et par la fréquence du bégaiement.

Comment un petit coucou parvient-il à se faire nourrir efficacement par des fauvettes ? À peine éclos, le poussin parasite se débarrasse des œufs présents dans le nid en les poussant par dessus bord. Seul dans le nid, il exige à peu près autant de nourriture qu'une couvée de quatre fauvettes. Au début, il émet des cris semblables à ceux de l'espèce hôte, et se fait nourrir à bonne allure. Toutefois, à mesure qu'il grandit, la surface de son bec ouvert diminue plus vite que la surface totale des becs d'une couvée de quatre fauvettes : il devient vite incapable d'émettre les signaux de sollicitation visuels d'une couvée de fauvettes qui requerraient le même apport alimentaire.

Pour activer le comportement nourricier de ses parents adoptifs, il recourt alors à un subterfuge : il émet un signal sonore de plus en plus rapide, qui compense la faiblesse de son signal visuel (la petitesse de son bec ouvert par rapport à sa taille). De jour en jour, le petit coucou bégaiement de plus en plus vite : de quelques cris par seconde le premier jour, il accélère la cadence chaque jour pour atteindre une dizaine de cris par seconde vers l'âge de trois semaines ! Le bégaiement frénétique du petit coucou n'existe pas chez l'espèce hôte, mais il est très efficace pour abuser les parents.

Dans le monde vivant, la communication trompeuse entre espèces est fréquente : de nombreux animaux trompent d'autres espèces – proies, prédateurs, hôtes, compétiteurs – en émettant des signaux qui masquent leur identité. Ainsi l'araignée Bola attire ses proies, des papillons nocturnes mâles, en émettant une odeur identique à la phéromone sexuelle attractive des femelles de l'espèce. Ou encore la Sésie apiforme, un papillon inoffensif, dissuade les oiseaux insectivores de la chasser en arborant une livrée à rayures jaunes et noires, qui la fait ressembler à des abeilles venimeuses.

Jusqu'à présent, les éthologistes pensaient que seuls des signaux mimétiques étaient utilisés dans la communication trompeuse. Ce n'est pas tout à fait le cas du coucou : par cette série d'expériences sur la communication entre les petits coucous et leurs parents adoptifs, l'équipe anglaise a montré que, pour obtenir autant à manger que quatre fauvettes de douze jours, un petit coucou ouvre son bec comme deux d'entre elles et bégaiement comme huit.

Anne TEYSSÈDRE

BRÈVES

Le rêve de la drosophile

Quand la drosophile, cette minuscule mouche qui apprécie le vinaigre et les fruits, est immobile on s'interroge : est-elle morte ? Se repose-t-elle ? Est-elle endormie ? Une équipe de San Diego a montré que la drosophile dort. En effet, quand on place les mouches pendant 12 heures à la lumière et 12 heures dans l'obscurité, 90 pour cent d'entre elles s'immobilisent dans le noir. Par ailleurs, les mouches privées de sommeil pendant plusieurs jours restent immobiles plus longtemps que les autres : elles ont besoin de «récupérer». Diverses substances, dont la caféine, réduisent les phases d'immobilité. La découverte ouvre une nouvelle voie de recherche, celle de l'étude des troubles du sommeil chez l'homme, encore mal élucidés. Reste une question : à quoi rêvent les drosophiles ?

À qui a écrit Ramanujan ?

En 1912, le jeune mathématicien autodidacte hindoux, Srinivasa Ramanujan écrivait à des mathématiciens pour montrer le résultat de ses travaux. Un seul destinataire des lettres répondit : G. Hard. Il comprit l'intérêt des formules envoyées par Ramanujan et le fit venir en Angleterre. On a déterminé aujourd'hui les noms des mathématiciens anglais auxquels Ramanujan avait écrit : les professeurs Hobson, Baker et Hill. Ceux-ci n'avaient pas compris les mathématiques de Ramanujan, et sans Hardy, un génie mathématique serait resté ignoré et désespéré.



Les moutons physionomistes

À Cambridge, des neurobiologistes ont montré qu'un mouton sait reconnaître l'un de ses congénères, parmi deux images de mouton qui lui sont projetées. Après une phase d'entraînement, il avance vers l'image qu'il a choisie pour avoir une récompense (de la nourriture). En revanche, quand on projette des images de moutons dont la tête est cachée, le mouton est incapable de les identifier. Comme les primates, les moutons utiliseraient l'hémisphère droit de leur cerveau pour reconnaître les traits de leurs congénères : des marqueurs génétiques indiquent que l'activité du cortex temporal droit est supérieure à celle du gauche lors de la reconnaissance.



Vanja / CORIS/APRÈS

Pour obtenir assez de nourriture de ses parents adoptifs, un jeune coucou crie autant que plusieurs jeunes fauvettes.

La face cachée du Soleil

Comment prévoir les éruptions solaires dont les jets de particules perturbent les télécommunications terrestres? En surveillant les groupes de taches solaires qui accompagnent les éruptions.



Comme le Soleil tourne sur lui-même en 27 jours, les astronomes ne pouvaient pas voir les taches cachées, annonciatrices d'éruptions. En examinant les durées de parcours des ondes sonores à la surface du Soleil, les astronomes déterminent l'existence de ces taches, même quand elles sont sur la face cachée du Soleil. En effet, ces taches modifient la vitesse de propagation des ondes de quelques secondes pour trois heures de trajet, comme l'a mesuré le satellite SOHO.

Fibres sèches

Les réseaux de fibres optiques transportent une lumière laser infrarouge. Malheureusement, des impuretés du verre de ces fibres, dues à une contamination par l'eau, absorbent ces longueurs d'onde. L'eau provient de la combinaison de l'oxygène et l'hydrogène des torches à plasma utilisées pour fabriquer les fibres. En analysant le contenu en eau de fibres et en modélisant comment l'eau pénètre dans le verre, une équipe de l'Institut de technologie du Massachusetts a amélioré les procédés de fabrication des fibres optiques. Des fibres «sèches», dont la transmission de certaines longueurs d'onde est améliorée d'un facteur cinq, ont été fabriquées.

L'implant anti-hémophilie

Les caillots sanguins bloquent les hémorragies. La formation de tels caillots requiert l'activation en cascade de molécules, nommées facteurs de coagulation, qui catalysent la précipitation d'une protéine, la fibrine. Chez certains hémophiles, l'un des facteurs est déficient : il ne peut plus activer les suivants de la chaîne et la coagulation ne se fait pas. Une équipe de l'Institut américain de la santé a proposé une alternative aux injections des facteurs activés qui traitent cette maladie. Placé dans la cavité abdominale, un implant poreux, contenant le facteur de coagulation activé qui pallie le facteur déficient, est traversé par le sang : la cascade des autres facteurs est ainsi réactivée jusqu'à la coagulation. Testés sur des singes, de tels implants sont restés efficaces pendant un mois.

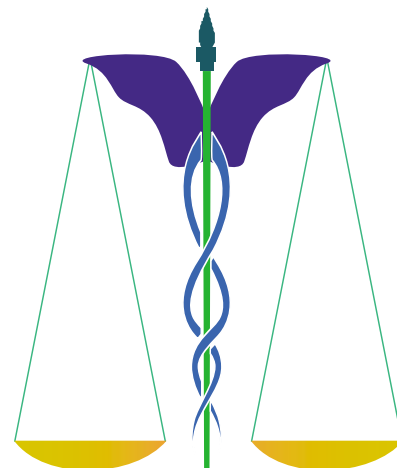
Le Service médical rendu

L'ensemble des médicaments est aujourd'hui réévalué à l'aune d'une nouvelle notion : le service médical rendu.

Le 18 septembre 1999, le quotidien *Le Monde* publiait une liste de 286 médicaments déclarés «inutiles». L'article était consacré à l'évaluation de certains de médicaments afin de justifier – ou non – leur remboursement par la Caisse nationale d'assurance maladie et le taux. Le critère retenu était le «service médical rendu». Cette notion semblait floue et confondue avec la notion d'efficacité. En quoi consiste ce service médical rendu? Quels différences y a-t-il avec l'autorisation de mise sur le marché d'un médicament?

Pour être vendus, les médicaments doivent obtenir une autorisation de mise sur le marché délivrée par l'Agence française de sécurité sanitaire et des produits de santé (l'ancienne Agence du médicament). Cette autorisation requiert l'évaluation de la qualité, de l'efficacité et de la sécurité du médicament candidat à partir de données fournies par l'industriel producteur. Pour la qualité, on teste la stabilité du produit, sa pureté et l'on s'assure que le passage de la production expérimentale à l'échelle industrielle ne modifie pas ses propriétés. Pour l'efficacité, on examine la capacité du médicament à produire un effet thérapeutique afin de définir ses indications et sa posologie. Des études cliniques sont effectuées par le fabricant ou par des organismes spécialisés indépendants. Enfin, pour la sécurité, on vérifie l'innocuité du médicament, on détermine ses effets indésirables, et des experts valident la pertinence de la méthodologie employée. Au final, après l'estimation d'un rapport bénéfice/risque, l'autorisation de mise sur le marché est accordée. L'Agence dispose d'inspecteurs qui vérifient parfois la conformité des données fournies.

Ainsi, l'autorisation de mise sur le marché ne se fonde que sur des données médicales et techniques. En revanche, le service médical rendu aborde les médicaments d'un point de vue économique. Il s'agit de replacer chaque médicament dans le paysage pharmaceutique existant avant de préconiser son admission au remboursement et un taux adapté. En fait, ce nouveau service permettait de réévaluer des médicaments anciens qui n'auraient jamais dû obtenir leur autorisation de mise sur le marché.



Jusqu'en 1980, le remboursement des médicaments ne dépendait que de la gravité de la maladie pour laquelle ils étaient prescrits. Un médicament contre le cancer pouvait ainsi être moins efficace qu'un principe actif ancien, et être remboursé jusqu'à 100 pour cent selon le régime de l'assuré social.

Depuis octobre 1999, le service médical rendu est déterminant dans la fixation du taux de remboursement. L'Agence française de sécurité sanitaire et des produits de santé a été mandatée par le ministère de la Santé pour réunir une commission, dite de transparence, chargée d'examiner l'ensemble de la pharmacopée française et de déterminer pour chaque classe de médicaments son service médical rendu.

Cette commission est composée de pharmacologues, de médecins généralistes, de médecins spécialistes, de représentants du Syndicat national des industries pharmaceutiques et de représentants de l'ordre des médecins. L'examen a été divisé en quatre tranches : la première, qui vient de se terminer, concernait la cardiologie, le métabolisme, la rhumatologie, la nutrition et la psychiatrie.

Pour chaque catégorie de médicament, un groupe de travail composé de spécialistes avait à se prononcer sur la gravité de la maladie pour laquelle le médicament est prescrit, sur les preuves de son efficacité et de la tolérance de l'organisme, sur la place dans la stratégie thérapeutique au regard des thérapies existantes et sur l'intérêt en terme de santé publique.

Les preuves de l'efficacité sont de quatre types : l'efficacité est certaine lorsque le médicament a fait l'objet d'au moins deux études cliniques dont les résultats ont été publiés dans des revues reconnues ; l'efficacité existe quand un seul essai a été publié ; l'efficacité est vraisemblable quand le médicament jouit d'un consensus professionnel fort, c'est-à-dire que, malgré l'absence d'étude publiée, il est reconnu efficace par tout le corps médical, et est

prescrit depuis longtemps, dans tous les pays et pour la même maladie ; enfin, l'efficacité est douteuse lorsque le médicament ne fait l'objet ni d'études publiées ni d'un consensus fort.

Le service médical rendu dépend également de l'effet recherché : un médicament ou un traitement préventif peut-être mieux coté qu'un traitement symptomatique. En outre, le service médical rendu est plus important lorsque, dans une stratégie thérapeutique, le médicament est prescrit en première intention plutôt qu'en deuxième intention. À l'inverse, il est faible quand le médicament est prescrit en appoint. L'absence d'alternatives thérapeutiques à ce médicament augmente son service médical rendu.

Enfin, l'intérêt en termes de santé publique est le dernier critère d'évaluation : un médicament qui évite une longue et coûteuse hospitalisation sera bien remboursé.

À partir de ces quatre critères, les professionnels du groupe de travail ont statué sur le service médical rendu : majeur, modéré, faible ou insuffisant ; le résultat a été validé ensuite par la commission de la transparence. Notons que parmi les médicaments dont le service médical rendu a été déclaré insuffisant, on trouve ceux dont l'effet se distingue peu de celui d'un placebo : la commission conseille de ne pas les rembourser. Le coût social de l'effet placebo semblait prohibitif, même en l'absence d'autre médication.

Informés des verdicts de la commission, les fabricants des médicaments disposaient de recours : un dossier concis sur le médicament était examiné par la commission et, dans un second temps, une audition permettait à l'industriel de défendre son produit. Peu d'avis ont été modifiés au terme de ces deux démarches. La commission a enfin confié les résultats de son étude – il s'agit de simples « avis » – au ministère de la Santé pour que des mesures soient éventuellement prises.

Cette démarche s'inscrit dans une politique de maîtrise des dépenses de santé publique, notamment en vue de financer la Couverture médicale universelle, selon laquelle tout citoyen français, quelle que soit sa situation, peut se faire rembourser ses soins. Quelques questions subsistent. Pourquoi l'homéopathie, si controversée et remboursée jusqu'à 65 pour cent, n'est-elle pas concernée par cette réévaluation ? Si un médicament n'est plus remboursé, le patient ne choisira-t-il pas un médicament différent, plus cher mais remboursé ? Comment le ministère va-t-il négocier avec les industries pharmaceutiques qui voient dans cette réévaluation une baisse de leur chiffre d'affaire ? Devant les réactions et le lobbying des industriels, le ministère pourrait faire machine arrière.

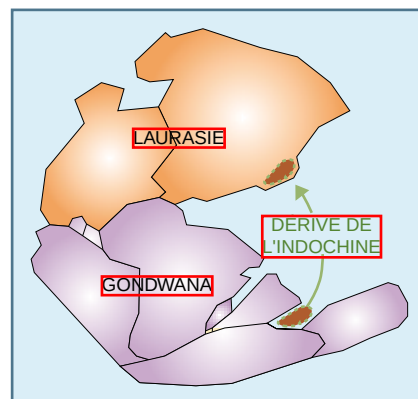
Fossiles et géographie de l'ère primaire

Des restes de reptiles, découverts au Laos, indiquent l'époque de la rencontre de l'Indochine avec l'Asie.

En 1896, le géologue français H. Counillon découvre un crâne d'animal préhistorique dans des couches de sol rouges près de Luang Prabang, au Nord du Laos. L'appartenance de ce fossile à un groupe de reptiles est vite établie, mais son identité précise reste controversée pendant les premières décennies du ^{xx}e siècle. Puis ce fossile tombe dans l'oubli et on en perd même la trace. L'histoire troublée de l'Indochine rend par la suite les prospections impossibles.

Au début des années 1990, une équipe du Muséum national d'histoire naturelle a décidé de partir sur les traces de Counillon. Elle a découvert de nouveaux fossiles qui éclairent la géographie de l'Asie du Sud-Est à la fin de l'ère primaire, il y a environ 250 millions d'années.

Bernard Battail et ses collègues ont entrepris une série de prospections, dans le cadre d'une mission franco-laotienne dirigée par Philippe Taquet. Ils sont d'abord allés à l'endroit approximatif (la carte d'origine manque de précision) où Counillon avait découvert le premier fossile, une zone dans la forêt qui s'étend en face de la ville de Luang Prabang, sur l'autre rive du Mékong. Les premières prospections sont décevantes et les conditions difficiles : dans ce petit bassin sédimentaire couvert de végétation, les affleurements de couches géologiques rouges susceptibles de livrer des fossiles sont limités à des zones érodées de faible étendue. De plus, à la saison des pluies, les précipitations abondantes empêchent toute prospection.

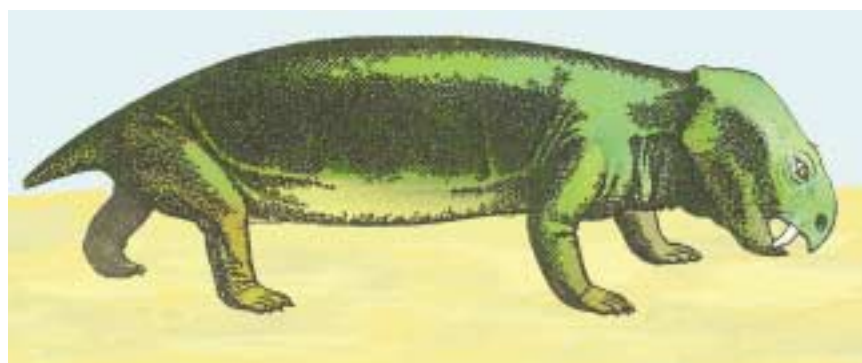


La disposition des continents, il y a 250 millions d'années : l'Indochine avait alors atteint l'Asie, après s'être détachée du Gondwana et avoir dérivé à travers l'océan.

A force de persévérance, les paléontologues découvrent les premiers crânes, puis prospectent systématiquement tous les affleurements de couches rouges. Le rythme des découvertes s'accélère. Les campagnes de prospection, qui ont lieu chaque année, s'achèvent en décembre 1999.

La collection de fossiles ainsi rassemblée comprend des amphibiens et, surtout des reptiles, représentés notamment par une dizaine de crânes. Ces derniers sont des reptiles mammaliens (certains de ces animaux, probablement ovipares, ont engendré les mammifères) appartenant à un groupe qui s'est éteint sans descendance, les dicynodontes. Il s'agit d'animaux terrestres, quadrupèdes, dont les membres restaient fléchis pendant la locomotion, tels ceux des crocodiles actuels (sans parenté avec les précédents). Ils avaient des mâchoires en forme de bec. La plupart d'entre eux avaient une denture réduite à une paire de canines supérieures. C'était le groupe de vertébrés terrestres végétariens le plus commun à la fin de l'ère primaire et au début de l'ère secondaire. Il se divise en plusieurs genres, comprenant eux-mêmes de nombreuses espèces.

Les reptiles découverts au Laos mesuraient environ un mètre de long, ce qui



Reconstitution d'un reptile mammalien du groupe dont font partie les fossiles laotiens.

Silence éloquent

Les ARN messagers sont des intermédiaires essentiels entre les gènes et les protéines. On a découvert que des petites constructions moléculaires constituées de doubles brins d'ARN sont de puissants inhibiteurs de gènes. De tels inhibiteurs semblent très répandus parmi tous les organismes vivants, des parasites aux mammifères, des vers nématodes aux plantes et aux champignons. Dès qu'un ARN est en présence de l'ARN double brin correspondant, il est dégradé. L'expression des gènes est vitale, mais leur silence ne l'est pas moins. Ce mécanisme par l'ARN double brin serait un rempart naturel contre l'expression d'ADN étranger introduit accidentellement dans un génome. Ces ARN doubles brins pourraient être un instrument de choix pour identifier les innombrables gènes découverts dans le cadre du programme international de séquençage du génome humain.

Tempête dans un verre de bière

Pourquoi les bulles de la bière, sensées remonter vers le haut du verre, descendent-elles parfois? Des chercheurs australiens ont élucidé le mystère : le comportement des bulles dépend de leur taille et de la forme du verre. Les bulles situées au centre du verre remonte bien à la surface, mais entraînent du liquide avec elles, qui redescend le long des parois, en emportant les plus petites bulles vers le fond.

De la plume au plastique

Un chimiste américain a inventé un procédé pour transformer les plumes des poulets d'élevage en matières plastiques ou en fibres absorbantes. Le problème du recyclage des plumes est de taille : aux États-Unis, deux mille tonnes de plumes sont produites chaque



année. Seule la partie légère des plumes est intéressante : elle est séparée du tuyau central par déchiquetage et passage dans un courant gazeux. Après un traitement chimique qui détruit les liaisons protéiques de la kératine, puis compression et laminage dans une presse hydraulique, les plumes sont sous forme de films plastiques. Cette matière plastique peu coûteuse a, de plus, l'avantage d'être biodégradable.

en fait des animaux de taille moyenne, dans leur groupe. D'après un premier examen, les crânes récoltés au Laos appartiennent tous à un même genre (nommé *Dicynodon*) dont les représentants vivaient à la fin de l'ère primaire. Les paléontologues les ont comparés aux figures représentant le crâne découvert par Counillon et ont conclu que celui-ci appartient aussi à ce genre. Parmi les auteurs anciens, plusieurs pensaient avoir affaire à un autre genre du début de l'ère secondaire. À l'époque, l'identification était difficile, car le fossile n'était qu'un fragment.

Le genre des reptiles découverts au Laos était répandu sur de nombreux continents : on en trouve des restes en Afrique australe, en Écosse, en Russie et en Chine. L'extension de son aire de répartition au Laos éclaire la paléogéographie.

À la fin de l'ère primaire, les terres étaient rassemblées en une gigantesque masse continentale, subdivisée en deux supercontinents, la Laurasia au Nord (composée de l'Amérique du Nord et de l'Eurasie), et le Gondwana au Sud.

Le bloc indochinois, qui faisait initialement partie du Gondwana, a lentement dérivé à travers l'océan avant d'entrer en contact avec l'Asie. Les reptiles laotiens se déplaçaient uniquement à pied sec : d'après leur anatomie, ils auraient été incapables de nager sur de grandes distances. Leur présence au Laos à la fin de l'ère primaire montre qu'un contact terrestre entre l'Indochine et l'Asie existait à l'époque. Elle confirme que la rencontre entre ces deux blocs avait eu lieu à la fin de l'ère primaire, il y a au moins 250 millions d'années.

«Cellules» entrouvertes

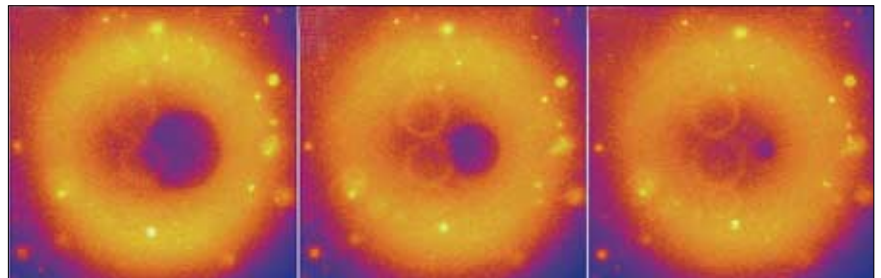
Quand elles adhèrent à un support, des cellules artificielles s'ouvrent et se dégonflent progressivement.

Comment introduire les principes actifs des médicaments dans les cellules de l'organisme? Ou comment y introduire l'ADN qui doit pallier une déficience génétique? Pour atteindre les cellules, portées par le sang, les substances thérapeutiques doivent être solubles dans l'eau, mais alors elles ne peuvent pas traverser la membrane cellulaire, qui est imperméable aux composés hydrosolubles. À l'Institut Curie, Françoise Brochard et Olivier Sandre ont exploré l'ouverture de pores dans des «vésicules», qui sont des systèmes artificiels, analogues aux cellules vivantes. De tels pores pourraient être empruntés par des principes actifs si l'on savait commander leur ouverture. Doubles couches de molécules «amphiphiles» (ces molé-

cules ont une partie soluble dans l'eau et une partie non soluble), les membranes cellulaires sont équipées de canaux sélectifs, qui laissent entrer ou sortir les ions, et de diverses pompes ou systèmes qui absorbent les nutriments et évacuent les déchets. Toutefois ces pompes et systèmes ne véhiculent généralement pas les principes actifs des médicaments, parce que ces derniers ont une structure chimique différente de celle des molécules échangées par les cellules avec leur milieu.

Pourquoi la médecine est-elle quand même efficace? Les biologistes soupçonnaient l'existence de pores, c'est-à-dire d'ouvertures dans la membrane cellulaire. Pour déterminer comment ces pores s'ouvrent et se ferment, les physico-chimistes de l'Institut Curie ont examiné expérimentalement ceux de vésicules qu'ils créent *in vitro*.

Les vésicules sont constituées d'une membrane enfermant une solution aqueuse (qui provient du milieu où l'on a formé les vésicules). Dans de tels systèmes, on sait introduire à volonté des composés dont on examine la libération. Dans les expériences effectuées, les physico-chimistes ont introduit des



Fermeture d'un pore (en bleu), qui avait été ouvert sur la face supérieure d'une vésicule. Ces vésicules mesurent environ 50 micromètres de diamètre, et les pores subsistent une dizaine de secondes.

marqueurs fluorescents dans la membrane, afin d'observer l'ouverture des pores.

Ces dernières années, les recherches sur la thérapie génique ont conduit à plusieurs méthodes pour percer des trous dans les membranes cellulaires. L'électroporation, par exemple, est l'application d'un courant électrique dans la solution où les cellules sont suspendues. De même, l'ajout de détergents ou, plus généralement, de molécules amphiphiles variées modifie la perméabilité membranaire. Toutefois ces méthodes, bien qu'efficaces, restent mal comprises. Avec O. Sandre et L. Moreaux, F. Brochard a préféré étirer les membranes en utilisant les forces naturelles d'adhérence des vésicules à des supports (des verres diversément traités). En l'absence de tension, les vésicules se comportent comme des bulles «dégonflées» ; leur membrane ondule sous l'effet des incessants mouvements aléatoires des molécules. En revanche, les vésicules étirées par l'adhérence à un support ont une membrane qui se déplie et se met sous tension. Les premières observations ont montré que les vésicules devenaient alors extrêmement perméables à l'eau. Des pores s'ouvraient-ils et se fermaient-ils trop rapidement pour être observés au microscope ?

Pour observer l'ouverture des pores, les physico-chimistes ont modifié la viscosité de la solution où ils créaient les vésicules. Ils ont alors eu le temps d'observer que les vésicules sont comme une membrane tendue : quand un pore s'ouvre dans la membrane, celle-ci laisse échapper un peu de la solution interne ; la membrane est alors moins étirée, et le pore se referme. Plus on augmente la viscosité de la solution, plus on ralentit cette fuite du liquide encapsulé, et plus les trous restent ouverts longtemps.

Dans l'eau, les pores sont «avortés», car la fuite très rapide de liquide relâche la tension avant que les pores atteignent une taille observable par microscopie de fluorescence. Trop petits pour être observés, ces pores sont cependant géants à l'échelle moléculaire (100 à 1 000 fois plus gros que les canaux membranaires), ce qui explique que les vésicules sous tension, même très faible, deviennent des passoirs ! Les cellules vivantes, elles, sont équipées d'un cytosquelette (une sorte de filet de pêche, avec des mailles 100 fois plus grosses que des molécules) fixé à la membrane, ce qui limite sans doute la taille des pores. L'étude de globules rouges devrait révéler comment le cytosquelette modifie la taille des pores transitoires.

Comprenant la dynamique de ces pores, pourra-t-on administrer, avec les médicaments, des molécules qui modifieront la tension des membranes cellulaires, afin de favoriser l'entrée des principes actifs ?

Ver à soie transgénique

Aujourd'hui, on sait incorporer, à la demande, des gènes dans le génome du ver à soie : on pourra extraire de la soie des protéines d'intérêt thérapeutique.

Domestiqué depuis plus de 4 000 ans, le ver à soie, *Bombyx mori*, survit grâce à l'homme. Pour s'y métamorphoser, les vers fabriquent un cocon constitué d'un fil unique, plus long que un kilomètre. On dévide le cocon en faisant fondre, dans l'eau chaude, la protéine (le grès) qui protège le fil et assure la cohésion de l'ensemble. On récupère alors le précieux fil de soie sans le casser.

La soie est produite par les glandes séricigènes ; la chenille bave par une filière un fil fluide qui se solidifie rapidement à l'air. Les équipes lyonnaises de Gérard Chavancy et Bernard Mauchamp, à l'Unité séricicole de l'INRA, et de Pierre Couble, du Centre de génétique moléculaire et cellulaire du CNRS, ont obtenu une lignée transgénique de ver à soie qui produit, en même temps que la soie, la protéine codée par un gène étranger, introduit dans le génome du ver.

Cette lignée a été longue à obtenir, car, contrairement à la drosophile, voire aux petits mammifères, les vers à soie ne se sont pas laissés aisément modifier. Pour transformer la drosophile, on utilise depuis longtemps des constructions génétiques constituées d'un élément transposable auquel on accole le gène à étudier. L'élément transposable assure l'intégration de cette construction dans le génome de la drosophile. On a ainsi

obtenu des centaines de lignées de drosophiles génétiquement modifiées, mais la méthode n'est pas utilisable pour les vers à soie. Pour les mammifères, la méthode est encore plus simple, puisque l'on injecte directement dans le noyau de l'œuf modifié le gène étudié, lequel s'intègre spontanément dans le génome. En revanche, la méthode ne s'applique pas pour le ver à soie, car le noyau est difficilement accessible.

L'équipe de l'INRA semblait donc dans une impasse, quand on a découvert un autre «véhicule» de gène, l'élément nommé *PiggyBac*. Grâce à lui, on réussit désormais à introduire des gènes étrangers dans le génome du ver à soie. Dans les deux heures qui suivent la fécondation d'un œuf, on y introduit la construction génique, constituée de *PiggyBac* auquel est accolé le gène étranger ; l'ensemble s'intègre dans l'ADN du receveur. Lorsque le gène étranger est correctement intégré, il se transmet de génération en génération.

Quel est l'intérêt des vers à soie transgéniques ? Les glandes séricigènes «livrent» directement le produit recherché en même temps que la soie filée. Quand on réussit à faire produire à un animal une protéine d'intérêt, il reste souvent une difficulté de taille : sa récupération. Quand la protéine est produite par toutes les cellules de l'animal transgénique, on doit trouver une méthode d'extraction, par exemple en broyant les cellules, ce qui présente le risque d'extraire, en même temps que la protéine recherchée, des substances indésirables spécifiques de l'animal et entraînées avec la protéine intéressante lors du procédé de purification. C'est pourquoi l'on a mis au point des mammifères transgéniques : on recueille la protéine d'intérêt produite par les glandes mammaires en trayant



Larve de ver à soie transgénique, où l'on a introduit le gène d'une protéine fluorescente verte.

V. Mauchamp - Unité nationale séricicole - INRA

l'animal. Or le ver à soie expulse spontanément le contenu de ses glandes séricigènes, que l'on récupère facilement. On sépare la protéine recherchée des protéines de la soie sans risque de contamination par des constituants cellulaires.

Ainsi, une lignée stable de vers à soie modifiés donnerait une protéine facile à récupérer dans le fil de soie. De surcroît, ces usines de production miniatures seraient très flexibles, car on sait maîtriser les élevages de vers à soie, notamment le moment de l'éclosion des œufs.

Ce type d'élevage serait beaucoup moins contraignant que celui des souris ou autres mammifères transgéniques.

Après avoir fourni le matériau des soieries qui ont fait la renommée des soyeux lyonnais, les vers à soie – génétiquement modifiés – fourniront peut-être demain des protéines thérapeutiques faciles à purifier et dont on pourrait ajuster la production à la demande. En outre, comme on maîtrise désormais l'introduction de nouveaux gènes dans le génome de ces vers, les équipes lyonnaises espèrent les rendre

résistants aux champignons, virus et autres parasites qui dévastent parfois les élevages. On pourrait aussi introduire des gènes qui codent d'autres types de soie (par exemple, le fil d'araignée, plus résistant que le fil de soie) ; on obtiendrait ainsi un fil qui aurait les propriétés de la soie, mais une résistance supérieure, de sorte que de nouvelles applications seraient envisageables. Enfin, le ver à soie étant totalement inféodé à l'homme, il ne risque pas de disséminer dans la nature les gènes que l'on y introduira.

Lutte tous azimuts contre le VIH

Plusieurs nouvelles molécules inhibent la réplication du VIH in vitro. Combien d'entre elles seront efficaces in vivo?

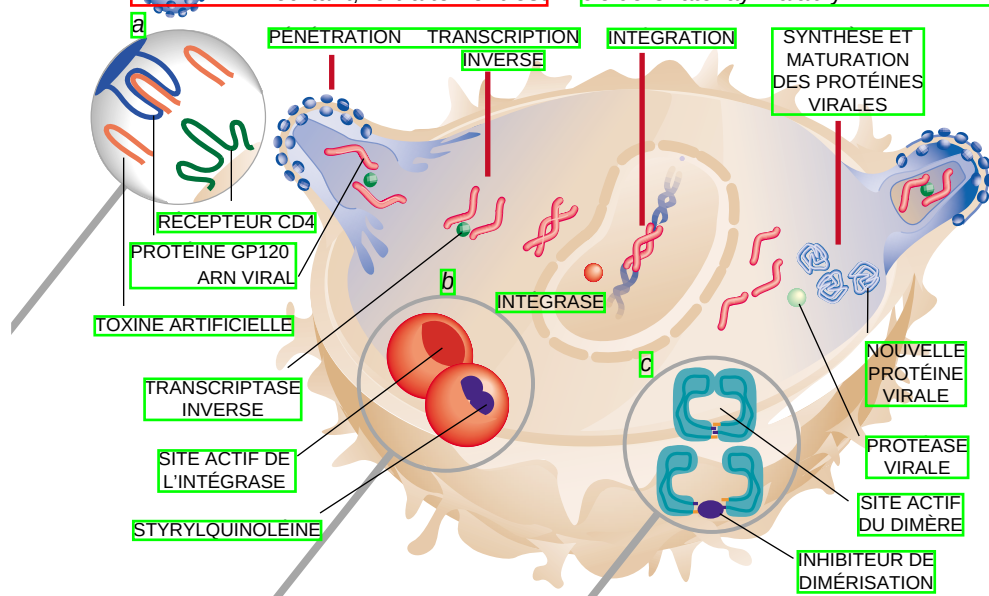
Les trithérapies, des traitements qui associent plusieurs molécules luttant contre le virus de l'immunodéficience humaine, le VIH, ont radicalement changé le pronostic des personnes séropositives en retardant la phase du SIDA et en leur permettant de reprendre une vie normale. Pourtant, le traitement est

aujourd'hui, on ignore ses effets à long terme et, s'il réduit considérablement la quantité de virus dans l'organisme, il ne l'élimine pas. Plusieurs équipes continuent à chercher d'autres moyens de lutte contre ce virus : soit en essayant de l'empêcher de pénétrer dans les cellules, comme une équipe du département d'ingénierie et d'études des protéines du CEA, à Saclay, dirigé par André Menez ; soit en empêchant l'intégration du matériel génétique viral au génome cellulaire, comme l'équipe de Jean d'Angelo, à la Faculté de pharmacie de Châtenay-Malabry ; soit encore en perturbant l'étape de synthèse des protéines virales, comme Michèle Reboud, de l'Institut Jacques Monod, et Sames Sicsic, également à la Faculté de pharmacie de Châtenay-Malabry.

Ainsi, l'équipe de Saclay a synthétisé une mini-protéine destinée à contrer la toute première étape de l'infection, c'est-à-dire l'interaction du virus et de la cellule qu'il cherche à infecter. Le virus reconnaît ses cibles, les lymphocytes T, grâce à la protéine virale d'amarrage, nommée GP120 ; cette glycoprotéine de l'enveloppe virale a pour cible cellulaire une protéine de la membrane des lymphocytes, le récepteur CD4. Dans la partie centrale de ce récepteur, une boucle de neuf acides aminés constitue l'élément clé de la reconnaissance : la GP120 a une cavité où s'insère cette boucle protubérante du CD4 en forme d'épingle à cheveux.

La mini-protéine sélectionnée par l'équipe de Saclay est une toxine de venin de scorpion, la scyllatoxine, dont une région ressemble beaucoup à celle en épingle à cheveux du récepteur CD4. Les biologistes ont remplacé les acides aminés de la boucle de la toxine par les neuf acides aminés de la boucle fonctionnelle du récepteur CD4. Ils ont ainsi obtenu une toxine artificielle (dont on inactive la fonction toxique) qui reproduit exactement la zone d'ancrage de la protéine virale GP120 sur les lymphocytes T humains. Quand on met des cellules en culture en présence de cette toxine artificielle, cette dernière bloque les sites de fixation, et interdit toute liaison du VIH aux cellules humaines. Jusqu'à présent les tentatives d'inhibition de l'entrée du virus dans les cellules ont échoué, car le virus, extrêmement variable, se transforme et réussit à se fixer malgré les leurres. Cette nouvelle molécule, dont il reste à évaluer le potentiel *in vivo*, réussira peut-être là où d'autres ont échoué en raison de la parfaite similitude de sa structure avec celle de la boucle du récepteur CD4.

L'équipe de Châtenay-Malabry, pour sa part, s'est intéressée à l'intégrase virale, une enzyme qui intervient au cours de l'insertion de l'ADN proviral dans l'ADN cellulaire (une fois le génome viral intégré, il profite de la machinerie cellulaire pour produire des protéines virales et de nouveaux



Pour éviter soit l'infection des lymphocytes T par le VIH, soit la réplication du virus, on essaye de mettre au point des substances qui attaquent le virus en divers points stratégiques. On a isolé du venin de scorpion une molécule (a, en rouge) dont la structure ressemble beaucoup à celle de la boucle du récepteur CD4 sur laquelle s'ancore la protéine virale GP120. Cette molécule bloque le site de reconnaissance et devrait empêcher l'interaction du virus et de sa cellule cible. L'enzyme intégrase sert à l'intégration du génome viral dans le génome cellulaire ; en bloquant le site actif de cette enzyme par des styrylquinolines (b, en violet), on l'empêche d'agir et on évite cette intégration. Enfin, l'enzyme protéase apprête les protéines virales synthétisées par la machinerie cellulaire pour former de nouvelles particules virales : en évitant la formation de son site actif, grâce à un inhibiteur de la dimérisation (c, en violet), on évite la libération de nouvelles particules virales.

virions). Pour fonctionner, cette enzyme requiert des ions magnésium. Dès lors, on a recensé différentes molécules capables de complexer ces ions pour les séquestrer, notamment des composés de la famille des quinoléines. En associant deux sous-unités de telles molécules, on a obtenu une styrylquinoléine inhibitrice qui s'insère dans l'intégrase et bloque son fonctionnement. Testées sur des cultures cellulaires, les styrylquinoléines présentent une bonne activité anti-virale à des concentrations très faibles, non toxiques. Ces inhibiteurs semblent empêcher la fixation du magnésium sur le site actif de l'enzyme.

À la fin du cycle de réplication du VIH, une autre enzyme, la protéase virale, intervient en découpant les protéines virales, qui peuvent alors s'assembler en nouvelles particules virales infectieuses. Cette enzyme est constituée de deux sous-unités identiques ; chaque monomère est inactif, car le site actif de l'enzyme n'apparaît qu'avec la formation du dimère.

Les antiprotéases thérapeutiques dont on dispose aujourd'hui bloquent le site actif de l'enzyme déjà dimérisée. M. Reboud et S. Sicsic ont envisagé un autre mécanisme d'inhibition de la protéase : ils en empêchent la formation, de sorte que le site actif n'est pas constitué. Pour ce faire, ils tirent parti de la structure particulière de ce dimère, parfaitement symétrique : chaque monomère a une extrémité dite C-terminale et une autre dite N-terminale, et les deux monomères s'assemblent, notamment, en intercalant leurs extrémités N- et C-terminales. Pour inhiber la formation du dimère, ils ont créé des « pinces moléculaires » qui enserment l'extrémité C-terminale d'un monomère, empêchant ainsi son interaction avec l'autre monomère.

Ces pinces sont constituées d'un espaceur rigide de type aromatique (naphthalène ou pyridine), sur lequel sont greffés deux tripeptides qui assurent la liaison de l'inhibiteur aux acides aminés de l'extrémité C-terminale. Les espaceurs rigides étant d'excellents inhibiteurs de la dimérisation, on cherche à en augmenter la biodisponibilité. Ces composés, qui visent une cible moléculaire différente des antiprotéases disponibles aujourd'hui, forment une nouvelle classe de candidats thérapeutiques qui bloqueraient la prolifération des virus résistants aux antiprotéases actuelles.

Ces exemples illustrent l'effervescence qui continue de régner dans les laboratoires où l'on recherche des moyens de lutte contre le VIH. Toute la question reste de savoir combien de ces traitements potentiels démontreront qu'ils sont également efficaces *in vivo* et bien tolérés.

Marie-Thérèse Landousy

L'interférence du désordre

La rétrodiffusion de la lumière par des atomes mesure leurs propriétés quantiques.

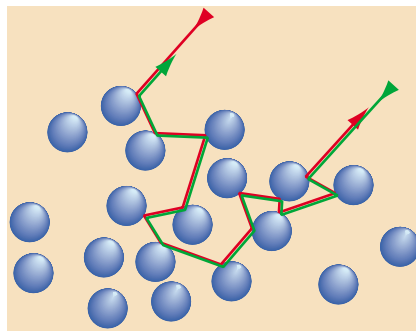
Pourquoi ne voit-on pas le disque solaire à travers une épaisse couche de nuages ? Parce que les multiples réflexions et réfractions des rayons lumineux sur les molécules du nuage font perdre à l'onde lumineuse la trace de sa direction initiale. Toutefois, dans une direction privilégiée, celle du retour arrière de la lumière vers l'émetteur, on observe une surintensité de lumière diffusée. Cette rétrodiffusion n'avait été observée que sur des diffuseurs classiques, tel le lait ou les anneaux de Saturne, jamais sur des atomes. En éclairant un paquet d'atomes froids, donc quasi-immobiles, avec un laser, nous avons observé un pic de rétrodiffusion de la lumière incidente dont l'amplitude traduit la structure quantique des atomes.

La rétrodiffusion est un cas particulier de la propagation d'une onde dans un milieu où les « réflecteurs » sont disposés de manière aléatoire. Éclairons un sac de billes de verre à l'aide d'un faisceau laser. La lumière diffusée a un aspect granulaire, très irrégulier, comme la « neige » sur l'écran de télévision. Cette structure, nommée tavelure, résulte de l'interférence des ondes qui ont emprunté de multiples trajets. Dans certaines directions, l'interférence entre les ondes est constructive (zone brillante sur un écran), ailleurs, elle est destructive (zone sombre). Secouons maintenant les billes, de façon à en modifier la configuration, et renouvelons l'expérience. La nouvelle figure d'interférence est radicalement différente : les zones sombres et brillantes se sont déplacées et déformées.

Quand on ajoute les figures d'interférence de tavelure, l'intensité de la lumière devrait être la même dans toutes les directions : les interférences constructives ou des-



Lorsque l'on éclaire un groupe d'atomes froids à l'aide d'un laser, la majeure part de la lumière est diffusée de manière aléatoire. La lumière rétrodiffusée (en sens opposé à celui de la lumière laser), interfère constructivement et donne naissance à un pic de rétrodiffusion.



Une onde qui suit le chemin rouge effectue la même séquence de diffusion, mais en sens inverse, qu'une onde qui suit le chemin vert. Ces chemins sont géométriquement réciproques.

tructives devraient se compenser. Qu'observe-t-on en faisant l'expérience ? L'intensité est bien uniforme, excepté dans un secteur angulaire étroit autour de la direction de rétrodiffusion, où apparaît un pic d'intensité. Ce pic résulte d'une interférence entre chemins optiques réciproques : les rayons lumineux, qui empruntent deux chemins identiques, mais en sens inverse, interfèrent constructivement (voir la figure ci-dessus).

Précisons : dans la direction inverse de la direction initiale, l'interférence est toujours constructive, car la différence de longueur des chemins réciproques est exactement nulle, de sorte que les amplitudes des ondes réciproques s'ajoutent. Cet effet est observé quelle que soit la nature des ondes (ondes acoustiques, ondes de matière) quand elles se propagent dans un milieu aléatoire.

Que voit-on lorsque le milieu diffusant est constitué d'atomes froids ? Pour le savoir, nous avons envoyé un faisceau laser sur un gaz d'atomes de rubidium refroidis. Le pic de rétrodiffusion est bien présent, mais son amplitude est inférieure à celle qui est prévue par la théorie des diffuseurs classiques. L'intensité de la lumière transmise dépend de la séquence d'excitation des atomes. Tous les atomes ne sont pas exactement dans le même état quantique : la diffusion sur un premier atome, puis sur un deuxième, ne sera pas équivalente aux diffusions sur le chemin réciproque, où les atomes sont excités dans l'ordre inverse (dans la diffusion directe, le premier atome est excité avant le deuxième, tandis que, sur le chemin de l'onde réciproque, le deuxième est excité avant le premier). Les « chemins quantiques » ne sont pas réciproques.

La réalisation de la même expérience sur un condensat de Bose-Einstein, où les atomes solidaires sont tous dans le même état quantique, accentuera vraisemblablement les effets d'interférence entre les chemins de diffusion multiple.

Ch. MINIATURA, G. LABEYRIE et R. KAISER, Institut non linéaire de Nice

Mourir de rire

Lorsque l'on rit aux éclats, la sensation de faiblesse serait due à l'inhibition du tonus musculaire.

Le réflexe H, découvert en 1918, ressemble au réflexe de la contraction du mollet que l'on obtient en percutant le tendon d'Achille avec un marteau à réflexe. Toutefois, pour stimuler le réflexe H, on n'utilise pas un marteau à réflexe, mais une impulsion électrique appliquée sur le nerf sciatique, à travers la peau de la face arrière du genou : cette stimulation entraîne une contraction du réflexe du mollet. Une équipe néerlandaise a montré que ce réflexe, qui est un indicateur du tonus musculaire, est inhibé lors des fous rires, ce qui expliquerait la faiblesse ressentie alors, et justifierait l'expression «mourir de rire».

Un coup de marteau sur le tendon d'Achille exerce une pression qui étire le mollet et stimule les mécanorécepteurs, très sensibles aux variations de la longueur

des muscles qui les contiennent. Après le coup de marteau, le muscle se contracte en raison de l'existence d'un circuit réflexe. La stimulation électrique du nerf sciatique excite directement les fibres sensorielles qui proviennent de ces récepteurs sensoriels situés dans le mollet. Les impulsions envoyées sur ces fibres activent directement les neurones moteurs de la moelle épinière, qui commandent le muscle : la stimulation électrique équivaut à un étirement du muscle. Comme le choc mécanique, la stimulation électrique entraîne une contraction du mollet après excitation.

Pour étudier plus en détail le réflexe H, l'équipe de S. Overeem et de G. Lammers, à l'Université de Leiden, aux Pays-Bas, a étudié des volontaires sains, qu'ils ont confortablement installés dans un fauteuil, les jambes maintenues pour éviter les mouvements parasites. Des électrodes de stimulation et d'enregistrement ont été fixées sur la peau. Au cours de l'expérience, on déclenche des contractions réflexes H par des stimulations électriques répétées du nerf sciatique. On enregistre l'électromyogramme grâce à des électrodes placées au-dessus du muscle soleus, au tiers inférieur de la jambe.



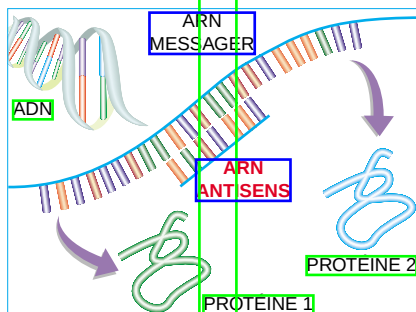
Le tonus musculaire des quatre volontaires a été évalué pendant qu'on leur projetait des diapositives tristes, neutres ou très drôles. L'équipe hollandaise a montré que les contractions musculaires réflexes, normalement déclenchées par la stimulation électrique du nerf sciatique, disparaissent quand les personnes observées rient à gorge déployée. À chaque fois que les spectateurs éclatent de rire, le réflexe H est inhibé, ce qui prouve que le tonus musculaire diminue. La diminution de l'amplitude du réflexe H expliquerait la sensation de faiblesse ressentie lorsque l'on rit à gorge déployée. Reste à comprendre quelle est la fonction de ce relâchement général du tonus musculaire.

Manque d'expression

Grâce au programme international de séquençage du génome humain, on identifie tous les jours de nouveaux gènes. Toutefois, lorsque l'on connaît la séquence d'un gène, il reste à trouver – tâche immense – la fonction de ce gène. Le génome humain contient quelque 150 000 gènes, mais on a élucidé la fonction d'un millier seulement d'entre eux. Les méthodes d'étude des gènes étaient jusqu'à présent longues et fastidieuses. L'utilisation d'oligonucléotides antisens, des substances qui, à volonté, interdisent la production de protéines ciblées, accélère notablement l'étude des gènes. Aujourd'hui, deux ans séparent souvent le clonage d'un gène et l'obtention d'une lignée stable d'animaux où ce gène a été inhibé. Dans la méthode, dite de *knockout*, on supprime définitivement l'expression du gène étudié, ce qui empêche de suivre sa fonction au cours de la vie de l'animal, voire même dans les stades précoces du développement si son inactivation est létale. On sait aussi museler l'expression d'un gène à un moment voulu et dans des tissus particuliers, mais l'obtention de tels animaux transgéniques est encore plus difficile. Avec la méthode des oligonucléotides antisens, on muselle les gènes comme on le souhaite. Ces antisens sont des assemblages de «briques» complémentaires des éléments constitutifs des ARN messagers : ils se fixent sur leurs séquences complémentaires, empêchant ainsi la traduction des ARN en protéines.

L'équipe de Samuel Driver, à Boston, a modifié chimiquement des oligonucléotides antisens de sorte qu'ils résistent aux enzymes qui abondent dans l'organisme et qu'ils diffusent, après injection intraveineuse, dans tout l'organisme. Ces antisens, injectés à des souris en gestation, traversent la barrière placentaire et, en s'appariant à leur ARN complémentaire, ils inhibent des gènes spécifiques à différents moments du développement embryonnaire. Les généticiens ont d'abord injecté des oligonucléotides antisens dont on savait qu'ils se fixent sur les ARN messagers du gène VEGF (le gène du facteur de croissance de l'endothélium vasculaire). Le facteur VEGF déclenche, *in vitro*, la prolifération et la migration des cellules endothéliales et, *in vivo*, joue un rôle essentiel dans la vascularisation des tissus. Ils ont obtenu des souris dont le système vasculaire était plus ou moins perturbé : la gravité de la pathologie provoquée dépend de la séquence injectée, du moment de l'injection et de la dose administrée.

La méthode devrait faciliter l'étude de la fonction des nouveaux gènes séquencés, mais il reste quelques difficultés techniques à résoudre : les séquences antisens doivent réellement empêcher la traduction de la protéine ciblée ; ils doivent diffuser dans tout l'organisme pour y inhiber la production de la protéine étudiée ; or ils ne traversent pas tous la barrière hémato-encéphalique, de sorte que l'on ne bâillonne pas toujours les gènes qui s'expriment dans le cerveau.



L'ADN est transcrit en ARN, lequel est normalement traduit en protéine. Un ARN antisens se lie à l'ARN qui lui est complémentaire, ce qui empêche toute production de la protéine correspondante, tandis que les autres protéines continuent à être synthétisées.

Un Big Bang à l'envers

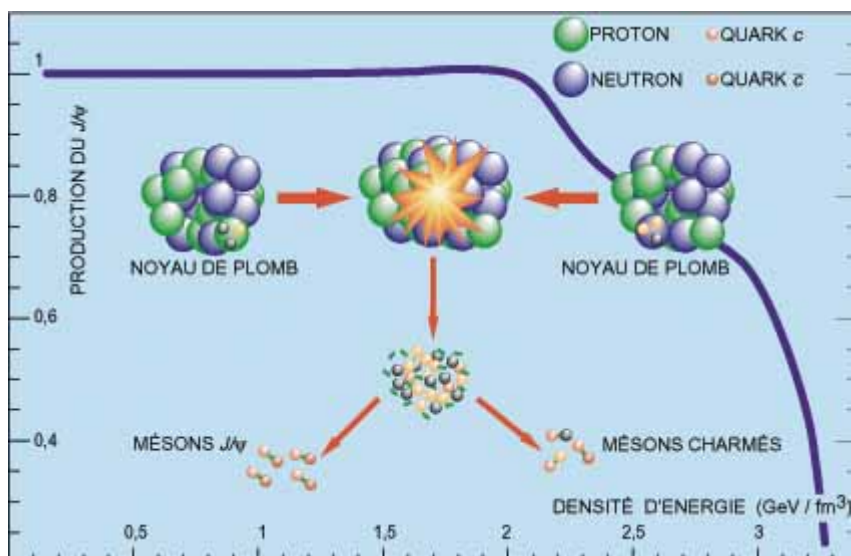
Le CERN annonce la mise en évidence du plasma quark-gluon.

Quelques microsecondes après le Big Bang, les quarks et les gluons se sont combinés pour constituer les particules «élémentaires», notamment les protons et les neutrons. Depuis, impossible de les isoler : les quarks restent désespérément confinés avec d'autres quarks dans les particules élémentaires. Impossible ? Pas tout à fait, car notre équipe vient de mettre en évidence un nouvel état de la matière, le plasma quark-gluon ou «quagma», prévu par la théorie il y a une vingtaine d'années.

Comme la matière ordinaire, le quagma est constitué de quarks et de gluons, mais ses constituants sont dans des conditions de température et de pression où sont annihilées les forces qui les lient par paires de quarks dans les mésons (π , K , etc.) ou par groupe de trois quarks dans les baryons (tels le neutron ou le proton). De façon imagée, quarks et gluons sont à ce point serrés qu'ils perdent leur sentiment d'appartenance aux mésons et aux baryons : ils deviennent des objets autonomes. La création et la détection de ce Big Bang à l'envers sont difficiles : un quagma formé en laboratoire ne survit que 10^{-23} seconde. Après quoi, quarks et gluons se réassocient avec leurs voisins.

L'année 1986 marque un tournant dans la quête du quagma. Le CERN, à Genève, met à la disposition des physiciens des faisceaux d'ions oxygène de 200 gigaélectronvolts par nucléon, une énergie bien supérieure à celles que l'on obtenait auparavant. Désormais, l'étude des collisions de noyaux lourds à haute énergie est possible et la voie vers le quagma est ouverte.

Quelques mois plus tôt, deux théoriciens, H. Satz et T. Matsui, avaient prédit que la formation du quagma s'accompagnerait d'une forte diminution de la production du méson J/ψ , un état où le quark «charmé» c , et son antiquark, le $\bar{c}$, sont regroupés. Ces deux quarks sont créés, en faible proportion, aux tout premiers instants de la collision. Quand, par la suite, ces quarks sont immergés dans le quagma, ils y évoluent librement et se perdent de vue ; lors du reconfinement ultérieur, ils sont bien trop éloignés et, du fait de leur rareté dans le milieu, ils ne trouvent plus leur conjoint pour former un méson J/ψ . Ces quarks abandonnés se regroupent alors avec d'autres



Lorsque l'on projette l'un contre l'autre deux noyaux lourds, du plomb par exemple, leurs protons et neutrons se séparent en leurs constituants les plus intimes : les quarks et les gluons. Pour des densités d'énergie de la collision très élevées, certains de ces quarks, dits charmés, se recombinaient moins souvent, de sorte que la production du méson J/ψ , une combinaison de deux quarks charmés, décroît anormalement (courbe bleue). Cette décroissance est le signe de la création d'un nouvel état de la matière : le plasma quark-gluon.

quarks de leur entourage immédiat, plus légers et plus abondants : ils formeront d'autres mésons, voire des baryons.

Dès que cette prédiction est publiée, en 1986, les physiciens saisissent au vol cette possibilité de diagnostic du déconfinement des quarks en réaménageant l'expérience NA38 au CERN. Commence alors une longue série de mesures de la production du méson J/ψ dans les interactions entre noyaux d'oxygène et noyaux d'uranium, puis, plus tard, entre les noyaux de soufre et d'uranium.

Encore fallait-il déterminer le taux de production «normal» du méson J/ψ , ce qui est réalisé dans une expérience où l'on bombarde divers noyaux avec des protons. Les résultats de cette expérience montrent que, à mesure que l'énergie mise en jeu dans la collision augmente, la production de méson J/ψ décroît régulièrement. Cette décroissance traduit la destruction normale que subit le J/ψ lors de ses interactions avec les protons et neutrons impliqués dans la collision des deux noyaux. Connue de longue date dans le cas de protons incidents, cette «suppression normale» se trouve également vérifiée pour les collisions qui résultent du choc de noyaux d'oxygène et de soufre. Restait à détecter une éventuelle «suppression anormale», révélatrice de la formation d'un quagma dans des collisions de plus haute énergie.

En 1994, le CERN réussit à accélérer des noyaux de plomb à 158 gigaélectronvolts par nucléon : l'expérience NA38, transformée, prend le nom de NA50. En 1996, les premiers résultats montrent que pour les interactions plomb-plomb «périphériques», où les noyaux

se frôlent à peine dans la collision, la production de J/ψ reste normale. En revanche, pour les interactions les plus violentes, où les deux noyaux qui interagissent se cognent frontalement, la production de mésons J/ψ n'atteint que la moitié de la valeur attendue. De nouvelles mesures, l'année suivante, confirment avec une bien meilleure précision cette suppression anormale du J/ψ . En outre, elles révèlent que le régime anormal apparaît soudainement, pour des densités d'énergie supérieures à un seuil de deux gigaélectronvolts par femtomètre cube (un femtomètre, ou fermi, est égal 10^{-15} mètre, la taille typique d'un nucléon).

Les mesures les plus récentes, déduites des données collectées à la fin de 1998, établissent, sans ambiguïté, que la suppression anormale s'accroît nettement pour les interactions les plus frontales, dès que la densité d'énergie dépasse 2,8 gigaélectronvolts par femtomètre cube.

Ainsi, après plusieurs séries de mesures longues et difficiles, les éléments d'une conclusion claire ont émergé. On a d'abord mesuré la production de J/ψ pour des densités voisines de celle de la matière froide ordinaire, un élément de référence indispensable. On a ensuite établi l'apparition soudaine d'écarts importants par rapport à cette référence. Cet écart révèle un nouveau mécanisme de déconfinement. Les futures expériences, notamment au collisionneur de Brookhaven cette année, puis au CERN, à partir de 2005, étudieront en détail les propriétés de ce rétro-Big Bang miniature.

Louis KLUBERG, Expérience NA50

La naissance de l'État égyptien



BÉATRIX MIDANT-REYNES

En un millénaire, de -4000 à -3000 avant notre ère, l'Égypte est passée de plusieurs cultures d'agriculteurs-pasteurs à un État unifié, stable et fortement hiérarchisé, l'État des pharaons.

L'étude de la civilisation égyptienne a longtemps été exclusivement celle de la civilisation pharaonique, une société fastueuse, hiérarchisée, où le pouvoir est aux mains d'une minorité représentée par un seul homme : le pharaon, symbole du roi-dieu, garant de l'ordre cosmique, qui veille au bon fonctionnement de l'ordre social. Pourtant, cette civilisation, dont on fixe aujourd'hui l'origine autour de 3 200 avant notre ère, n'est pas apparue *ex nihilo*. Nous savons aujourd'hui qu'en Égypte la transition (tardive) d'une société nomade à une organisation sociale fondée sur l'agriculture et le stockage des denrées s'est accompagnée d'une forte hiérarchisation sociale.

Les premières études sur la préhistoire de l'Égypte datent de la fin du XIX^e siècle, époque où l'archéologue britannique, Flinders Petrie a mis au jour, dans le secteur de Nagada, en Haute-Égypte, un ensemble de plusieurs milliers de tombes attestant l'existence de coutumes funéraires encore mal connues, où les défunts sont recroquevillés sur le côté et entourés de vestiges de poterie spécifiques.

Ainsi, il existait une Égypte organisée avant les pharaons dont Flinders Petrie a identifié les premières structures, mais dont il n'a pu, faute de datation absolue (la datation au carbone 14 n'avait pas encore été inventée), assurer la chronologie. L'idée, révolutionnaire, était de penser que l'État égyptien était né d'une évolution interne et non d'un apport oriental : à l'époque, l'Orient se dressait tel un phare de la civilisation, et il était tentant, sinon logique, d'en faire dériver une explosion civilisatrice qui avait, pensait-on, fait surgir la civilisation des pharaons. Si l'on admettait que des cultures anciennes s'étaient développées dans la vallée du Nil, l'élément civilisateur avait été apporté par une ethnie nouvelle, venue de l'Est.

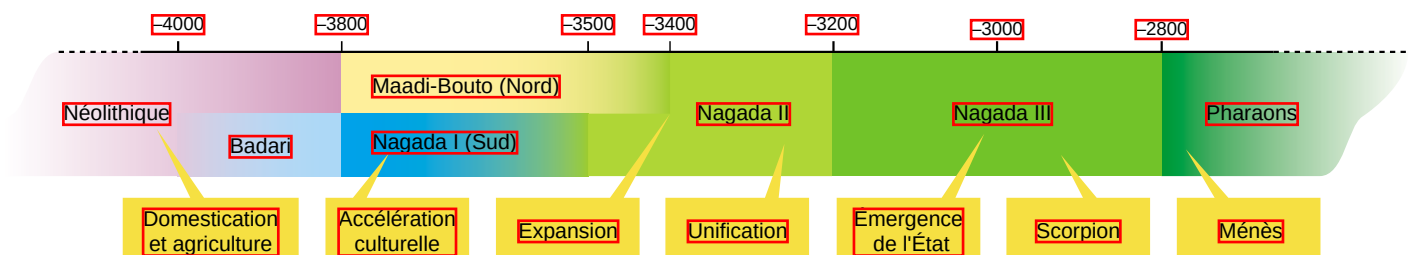
Dans les années 1960, certains égyptologues, intéressés par les civilisations sahariennes prospectées par les préhistoriens, ont attiré l'attention sur les possibles contributions des habitants de ces régions aujourd'hui désertiques à la genèse de la civilisation égyptienne. Les travaux pionniers de Jean Leclant et du général

1. POTERIE DE L'EPOQUE NAGADA I (3800-3400 avant notre ère), représentant un chasseur au milieu d'animaux (ci-dessus).

Paul Huard sur les gravures rupestres entre Nil et Sahara montrent l'existence d'un fonds paléo-africain commun aux deux régions.

Dans les années 1970, la préhistoire égyptienne est revenue sur le devant de la scène archéologique quand de nouvelles recherches, liées au sauvetage des monuments de Nubie (situés à la frontière de l'Égypte et du Soudan actuels) ont été entreprises par l'UNESCO. Les fouilles dans la vallée du Nil, mais également dans le désert occidental et dans ses oasis, ont mis en évidence un passé encore plus ancien : ce passé se traduit par des témoignages de l'adaptation des derniers hommes du Paléolithique à l'hydrologie particulière du Nil, vers 20 000 ans avant notre ère, des restes de cultures du VI^e millénaire avant notre ère et des preuves de l'apparition tardive d'une économie de production au cours du V^e millénaire.

Par ailleurs, la reprise des fouilles sur les grands sites mis au jour au



2. EN UN MILLENAIRE, les différentes cultures égyptiennes anciennes ont adopté l'agriculture, se sont unies et enfin ont constitué un État stable et hiérarchisé que les pharaons allaient diriger pendant les trois millénaires suivants, jusqu'à l'invasion romaine, en 30 avant notre ère.

temps de Flinders Petrie, tels Hiérakonpolis ou Abydos, et la découverte de nouveaux sites, tels Minshat Abou Omar dans la région orientale du delta du Nil, ou Adaïma, en Haute-Égypte, ont mis au jour des vestiges riches d'enseignement sur la préhistoire égyptienne. Aussi de multiples questions se sont posées. Comment la hiérarchie de l'époque pharaonique s'est-elle constituée? Comment un état unifié a-t-il émergé? Comment l'Égypte est-elle passée de la préhistoire à l'histoire?

Les méthodes d'étude

On utilise aujourd'hui, pour répondre à ces questions, des méthodes développées en France sous l'impulsion

d'André Leroi-Gourhan dans les années 1960.

La première de ces méthodes replace les vestiges dans un contexte global de «système technique» : par exemple, l'étude d'un ensemble d'objets (poteries, outils de pierre, etc.) reconstitue leur histoire depuis le prélèvement de la matière qui a servi à les façonner jusqu'à leur abandon, en intégrant, à chaque phase de la séquence d'utilisation, le maximum d'éléments pertinents dans le choix de l'instrument, le contrôle de sa fabrication et ses conditions d'emploi.

Cet examen s'inscrit dans le concept de «chaîne opératoire» : le premier maillon d'interactions s'emboîte dans un deuxième, constitué par les diverses autres techniques développées par le

groupe, puis dans un troisième, formé par les autres composantes de l'organisation sociale. Les ethnologues définissent des «modèles» de groupes humains et le type de vestiges que peuvent produire ces groupes ; sur ces bases, l'archéologue analyse et interprète les restes mis au jour au cours des fouilles. Ainsi, l'évocation de «clans», de «chefferies», de «royauté» se réfère à des modèles élaborés par les ethnologues, que l'archéologue intègre pour interpréter ses données.

La sédentarisation modifie l'organisation sociale

Armés de tels outils conceptuels, nous pouvons aller à la rencontre de la naissance de l'État égyptien. Cette naissance



3. PALETTE, DITE AUX TAUREAUX : le roi, sous la forme d'un taureau, renverse un ennemi. Sur la face de gauche, des hampes terminées par des mains, tiennent une corde sans doute fixée à un ou plusieurs ennemis (cette partie a disparu). Sur la face de droite, la même image du roi domine deux enceintes fortifiées (celle du bas n'est que partielle). Cette tablette, datée de 3200 avant notre ère, environ, conservée au musée du Louvre, illustre le thème de la violence et de la victoire du roi. Ce sont les signes d'un pouvoir central fort.

s'enracine loin dans le temps, à l'époque où la domestication des espèces végétales et animales oblige l'homme à se fixer et à remodeler son système de production et d'organisation sociale.

Les hommes de la fin du Paléolithique (vers 15 000 avant notre ère) pratiquent la chasse, la pêche et la cueillette dans des aires restreintes de la vallée ; parallèlement, les crues régulières du Nil, qui fertilisent les rives, les ont habitués à une semi-sédentarité. Cette facilité a peut-être retardé l'adoption de moyens de production plus contraignants, tels que l'agriculture, déjà bien développés chez les voisins orientaux.

Environ 6 400 ans avant notre ère, les modifications du climat, notamment la fin de la période

humide, suscitent l'adoption d'un nouveau type de production, l'économie de production agricole, plus prévisible, mieux contrôlable, et qui complète les ressources fournies par la chasse, la pêche et la cueillette. L'agriculture a d'abord été un réajustement des ressources traditionnelles : les hommes hésitaient à abandonner un mode de vie périodiquement nomade et réglé par les crues, qu'ils avaient modelé à leur convenance et qui leur semblait sans doute créé pour eux.

Dès le VI^e millénaire avant notre ère, des espèces domestiquées végétales et animales (orge, blé, chèvre, mouton) arrivent d'Orient et sont cultivées dans la région du delta du Nil, avant qu'elles gagnent, plus tard, la Haute-Égypte. Dans le Nord du Sinaï, on a trouvé des traces de chèvres domestiquées au VIII^e millénaire avant notre ère.

Par ailleurs, des pasteurs sahariens, fuyant la sécheresse, ont peut-être apporté en Haute-Égypte le bœuf

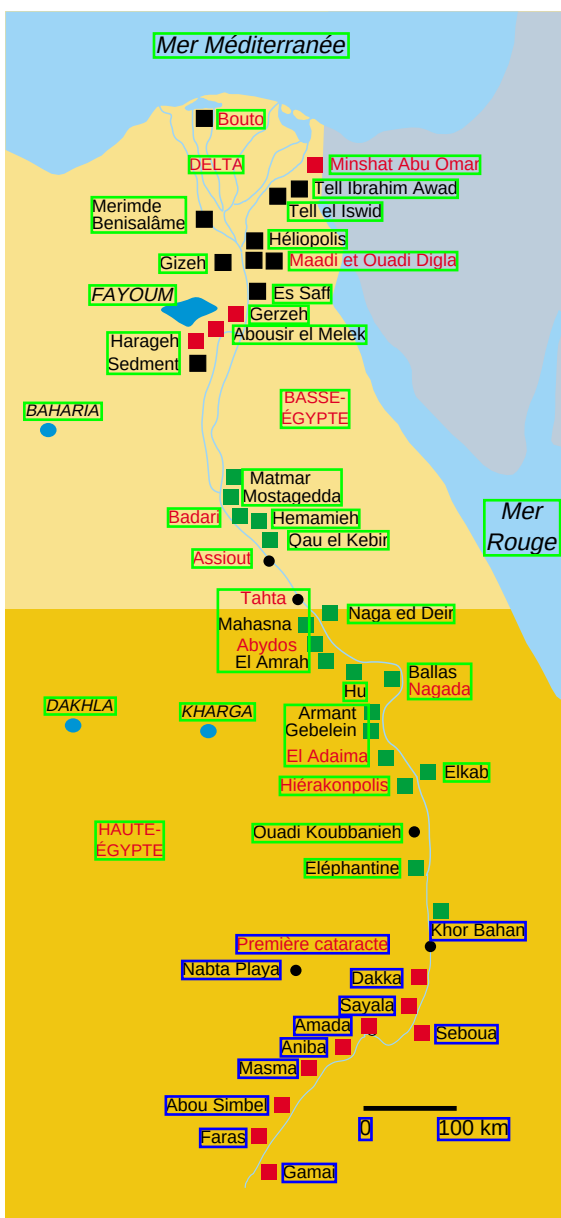
domestiqué ; si la question de l'origine du bœuf domestique en Égypte reste controversée, les contacts entre le Nil et le Sahara sont avérés. Les artisans des oasis de la zone saharienne fabriquaient aussi et exportaient peut-être des céramiques, dont les plus anciens exemplaires connus remontent au IX^e millénaire avant notre ère dans le Sahara central.

Il est possible que la structure des groupes adaptés au Nil depuis plusieurs milliers d'années se soit déjà hiérarchisée. L'ethnologue Alain Testart a montré qu'au sein de ces groupes, le stockage des produits qu'attestent l'importance du matériel de broyage, entraîne un processus d'accumulation, lequel engendre des phénomènes d'inégalités sociales.

Le matériel archéologique fait défaut pour les VI^e et V^e millénaires avant notre ère. En revanche, il est abondant pour la fin du V^e millénaire et témoigne d'un processus d'accélération culturelle qui mènera, vers -3200, à la naissance de l'État pharaonique.

La culture Maadi-Bouto

Pendant la première moitié du IV^e millénaire, deux ensembles culturels distincts s'épanouissent dans la vallée du Nil : la culture Maadi-Bouto, au Nord, composée d'agriculteurs et de pasteurs



4. LES SITES NAGADIENS (en vert) sont principalement en Haute-Égypte, tandis que les Maadiens (en noir) dominent la Basse-Égypte. À partir de 3200 avant notre ère, les Nagadiens investissent tout le territoire (carrés rouges). Cette époque, dite prédynastique, est caractérisée par un art et par des rites funéraires qui disparaîtront à l'époque des pharaons. Par exemple, les poteries rouges à bord noir, étaient fréquemment posés, avec d'autres vases, en offrandes dans des tombes. À droite, de tels vases retrouvés dans une sépulture à Adaima.



faiblement hiérarchisés, et la culture Badaro-Nagadienne, au Sud, formée également d'agriculteurs et de pasteurs, mais attestant des inégalités sociales plus marquées. Ces noms (Maadi, Bouto, Badari, Nagada) dérivent des lieux géographiques où les vestiges archéologiques ont été trouvés et étudiés.

Les traces de cette culture sont disséminés dans différents sites, notamment dans les sites éponymes de Maadi, aujourd'hui dans la banlieue du Caire, et de Bouto, dans le delta du Nil. Les kilos de graines (blés divers, orge, lentilles et pois) retrouvés dans des jarres de stockage et les indices de l'écrasante majorité de la faune domestique sur les espèces sauvages assurent que les Maadiens étaient des agriculteurs et des éleveurs.

Cette culture, qui domine la Basse-Égypte pendant trois siècles, de 3800 à 3500 avant notre ère, a des relations privilégiées avec le Proche-Orient voisin. On a retrouvé des céramiques à pied, à col, à anses, des grands racloirs de silex, des lames de type dit «cananéen» (du pays biblique Canaan qui regroupe la Palestine et la Phénicie), de la résine d'origine palestinienne. On a égale-

ment trouvé du cuivre, qui sera utilisé plus vite qu'ailleurs et dans de plus grandes proportions que dans les autres régions. Ces échanges internationaux se font peut-être au sein de «quartiers d'étrangers», où l'on a retrouvé des maisons dont l'infrastructure souterraine rappelle celles de Beersheba, en Palestine, alors que ce type d'habitation est inconnu en Égypte.

En revanche, les contacts et les échanges avec les cultures sahariennes n'ont pas modifié l'univers funéraire des Maadiens : les tombes sont simples, avec peu ou pas d'offrandes dans les deux nécropoles mises au jour : celle de Maadi, avec 76 sépultures, et celle de Ouadi Digla, qui en compte 471. Alors que les tombes des sites néolithiques de Basse-Égypte sont regroupées dans des secteurs abandonnés du village, la culture maadienne se caractérise par l'exis-

5. CETTE FEMME ET SON ENFANT, retrouvés à Adaïma, ont été inhumés en position repliée, sur le côté gauche, avec des vases en guise d'offrandes (à gauche). Cette sépulture, le vase à décor peint en ocre sur fond blanc (à droite), où l'on distingue un bateau (en bas) et la palette en forme de poisson (ci-contre), datent de l'époque Nagada II.

tence de nécropoles vraies, séparées de l'habitat. Seuls les restes de très jeunes enfants sont encore conservés dans des fosses ou dans des pots.

La culture Badaro-Nagadienne

Pendant cette période, en Haute-Égypte, une autre culture méridionale, Badaro-Nagdaniennne, se développe. La plupart des sites badariens s'échelonnent le long de la rive orientale du Nil, sur 30 kilomètres environ, d'Assiout au Nord à Tahta au Sud. Une quarantaine de zones d'habitation a été examinée. On y découvre des fosses de stockage comportant des restes de céréales, majoritairement des espèces sauvages : les riverains du Nil, en Haute-Égypte, au début du IV^e millénaire, pratiquaient un mode de subsistance mixte, où l'économie de ponction dans

l'environnement joue encore un rôle important.

On ne pourrait guère en dire plus si les nécropoles ne révélaient l'existence d'inégalités sociales. Les défunts, enveloppés dans une natte ou dans une peau d'animal, ont été ensevelis en position contractée, sur le côté gauche, tête au Sud et regardant vers l'Ouest. Le matériel funéraire se compose de poteries à bord noir, qui étaient peignées avant cuisson (voir la figure 4) afin d'obtenir une surface ondulée, de poteries polies entièrement brunes ou rouges, et de

poteries plus grossières. L'outillage en os abonde, attestant l'importance du travail des tissus et des cuirs.

Les parures dénotent la structuration sociale. Dans les tombes, on a répertorié des bracelets, des perles, des anneaux, des cuillères, des peignes à longues dents et des statuettes en ivoire, ainsi que des palettes à fard en grauwacke (roche sédimentaire de teinte sombre), des perles en stéatite (un silicate de magnésium) émaillée, en cuivre, et des coquillages de la mer Rouge : les distinctions sociales s'expriment par la possession d'ivoire et

de cornaline. La richesse de la tombe ne dénote ni le sexe ni l'âge des individus : quelques tombes d'enfants sont particulièrement « riches ».

On pense que la richesse d'une tombe témoigne du statut social de la famille du défunt. Par ailleurs, le nombre des objets de culte varie d'une nécropole à l'autre et à l'intérieur même d'une nécropole. Sur 262 tombes fouillées dans sept cimetières, environ 20 pour cent des inhumés ont plus de 10 offrandes par tombe, 51 pour cent n'en ont qu'une seule et 29 pour cent, aucune.

La culture de Nagada se divise en plusieurs périodes. Nagada I (3800-3500 avant notre ère) englobe et développe la culture précédente : ce qui était amorcé est accentué. Les traces d'habitat sont plus importantes qu'à la période précédente, et la présence régulière de trous de poteaux, de clôtures de piquets de bois indique l'existence de constructions plus élaborées.

Les fosses de stockage enterrées sont remplacées par de larges structures en silos : ces constructions témoignent de stocks plus importants et d'une dépendance accrue vis-à-vis des plantes cultivées (blé, orge, lin, lentilles...). L'inventaire de la faune montre également un nombre croissant d'animaux domestiques (bœufs, moutons, chèvres, porcs).

Les pratiques funéraires de cette époque ressemblent beaucoup à celles de la période précédente. La tombe est toujours une simple fosse où le défunt, dans la même position repliée, est entouré d'offrandes. Toutefois, les poteries à surface ondulée sont remplacées par des poteries polies rouges, la plupart ouvertes (bols, écuelles, plats) et ornées de dessins peints en blanc (voir la figure 1), tels des motifs géométriques ou des animaux (crocodiles, hippopotames) au corps strié de décors en chevrons. La figure humaine apparaît également, notamment en ronde bosse (voir la figure 6). Les palettes à fard se diversifient et multiplient les représentations d'animaux (voir la figure 5, la palette en forme de poisson), tandis qu'une industrie de la pierre taillée se développe.

Ces éléments sont concentrés dans certaines sépultures et des variations apparaissent dans la forme des tombes, qui deviennent rectangulaires avec des cercueils en terre crue ou en bois. Ces évolutions illustrent la différenciation sociale croissante.



Musée de Brooklyn

6. CETTE STATUETTE FÉMININE de terre cuite date de l'époque Ngada II. Elle a été trouvée sur le site de El Ma'mariya, en Haute-Égypte.

L'extension territoriale

Ainsi, en Haute-Égypte, à partir de la fin du Paléolithique, les hiérarchies s'amplifient en même temps que les espèces domestiquées, animales et surtout végétales prennent plus d'importance dans l'alimentation.

Les deux entités socio-économiques et culturelles s'opposent par les pratiques funéraires : au Nord, les défunts sont inhumés pour moitié sans offrandes, et, lorsque celles-ci sont présentes, elles ne comportent au maximum qu'une dizaine de pots. En revanche, au Sud, dans l'aire badaro-nagadienne, les rites funéraires sont plus complexes, et les offrandes, plus nombreuses, traduisent une stratification sociale évidente. On discerne une «aristocratie» naissante par le double processus d'accumulation (plusieurs dizaines d'objets par tombe) et d'ostentation (les objets sont travaillés dans des matières précieuses). Ce phénomène traduit des échanges de matières premières tels l'ivoire, les pierres et les métaux précieux avec des contrées de plus en plus lointaines.

Entre 3 550 et 3 400 ans avant notre ère, la culture de Nagada II, qui domine en Haute-Égypte, s'étend peu à peu à toute la vallée, vers le Nord jusqu'au Delta et, vers le Sud, au-delà de la première cataracte. La taille de certaines tombes augmente. Elles deviennent rectangulaires et sont parfois soulignées par des murs de briques crues. Les défunts ne sont plus simplement enroulés dans des peaux ou recouverts d'une natte, mais protégés dans un coffre de bois ou de terre crue. Les offrandes funéraires des tombes augmentent en nombre et en qualité. L'absence de traces guerrières dans les vestiges retrouvés indique que la culture nagadienne a diffusée pacifiquement.

On a proposé un modèle où une série de «proto-royaumes» s'étendent de proche en proche à l'occasion d'alliances, de mariages et, parfois aussi, sans doute de quelques coups de force. L'acculturation est progressive et ne relève pas d'une conquête brutale. Il s'agit peut-être du premier grand phénomène de syncrétisme égyptien entre une idéologie agraire du Nord et l'idéologie de «prédation» du Sud.

À partir de 3200, pendant la période Nagada III, l'évolution sociale

s'accélère. Plusieurs types d'objets caractéristiques de la Préhistoire disparaissent (la poterie décorée, les techniques de taille des couteaux de silex...), tandis que d'autres connaissent un plus grand essor (vases de pierre, faïence) et que des objets nouveaux apparaissent, notamment grâce aux relations avec l'Orient (des sceaux-cylindres, l'architecture à redans où des éléments verticaux font saillie, faits de briques).

La découverte de signes d'écriture dans la tombe Uj à Abydos fait remonter à 3200 environ avant notre ère les débuts de l'écriture en Égypte. Une série de noms royaux, peints sur des poteries, révèle l'existence de dynasties avant Ménès, le premier roi attesté par les sources égyptiennes, et précise la question de la naissance de l'État.

L'émergence de l'État

L'unification culturelle dès -3500, le faste des tombes, tant par l'architecture que par les offrandes et l'existence de noms que l'on peut interpréter comme des noms royaux, plaident en faveur d'une unification politique de toute la vallée, du delta, au Nord, jusqu'à la première cataracte, au Sud.

Le prodigieux développement des tombes, l'abandon des formes anciennes de prestige (palettes, lames de couteaux, poteries décorées...), ainsi que l'irruption du thème de la violence dans l'iconographie, marquent une accélération de la compétition : en Égypte unifiée, le pouvoir devait échoir, un jour ou l'autre, à celui qui saurait affirmer sa supériorité, non seulement par la force (le pouvoir militaire), l'organisation (le pouvoir administratif), mais également par l'idéologie, c'est-à-dire l'art d'intégrer à sa personne les phénomènes symboliques et religieux. Sa relation au surnaturel le sacralise et le légitime.

Les symboles deviennent un support du pouvoir politique, un signe qui contribue, selon certains archéologues, à l'oppression de la majorité par une minorité. Cependant, la part du symbolique et du politique dans ces processus complexes demeure objet de débat.

Nous avons localisé les premiers frémissements du pouvoir en Haute-Égypte, aux origines de cette culture nagadienne que l'on peut définir

comme «féodale», terrienne, expansionniste, valorisant la force, l'exploit individuel et la bravoure. C'est là que se développeront les premières «chefferies». Au Nord, des sociétés d'agriculteurs-pasteurs à caractère plus «égalitaire» sont en prise avec les développements socio-économiques du Proche- et Moyen-Orient voisins. Dès le milieu du IV^e millénaire, la culture nagadienne s'impose au Nord. Cependant, la Basse-Égypte a probablement influencé la civilisation «conquérante» par des modes de pensée, telle l'idéologie agraire, qui constitueront les fondements de la civilisation égyptienne.

Au III^e millénaire, l'image du pharaon alliera ces formes de pensée issues de deux types de société : il veille à la régularité des crues, au retour du cycle, il est intercesseur entre les hommes et les dieux, mais n'en demeure pas moins le chef de chasse et de guerre.

Le passage de la «royauté sacrée», qui tire d'elle-même son efficacité mystique, à la «royauté divine», où le roi est un grand prêtre, un intercesseur entre les hommes et les dieux, constitue un bon marqueur, en Égypte, du passage vers l'État. Bien que l'unification culturelle du pays remonte à 3500 avant notre ère, bien que des alliances politiques plus ou moins durables aient eu lieu dès 3300 avant notre ère, la «royauté» égyptienne ne s'extrait des temps nagadiens que vers 2 800 ans avant notre ère. Elle devient alors un système politique stable, uni, s'exprimant par un art canonique achevé, un système d'écriture accompli et un type spécifique de souveraineté divine.

Béatrix MIDANT-REYNES est chargée de recherches au Centre d'anthropologie de Toulouse et dirige les fouilles du site El Adaïma dans le cadre de l'Institut français d'archéologie orientale du Caire.

Michael HOFFMAN, *Egypt before the Pharaohs*, Routledge & Kegan Paul, 1980.

Béatrix MIDANT-REYNES, *Préhistoire de l'Égypte. Des premiers hommes aux premiers pharaons*, Armand Colin, 1992.

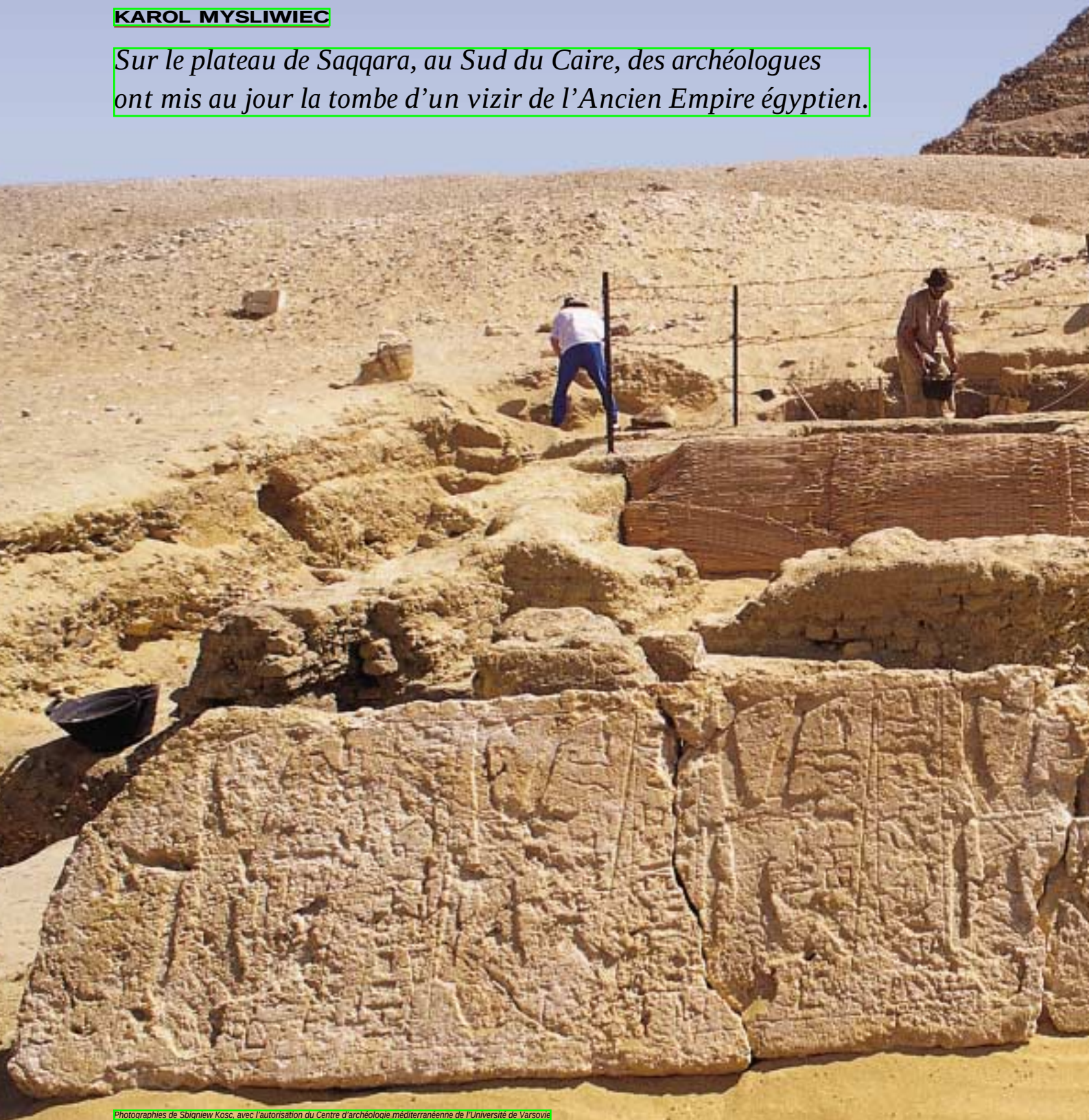
Jean VERCOUTTER, *L'Égypte et la vallée du Nil. Tome 1. Des origines à la fin de l'Ancien Empire*, PUF, 1992.

Toby WILKINSON, *Early Dynastic Egypt*, Routledge, 1999.

La découverte d'un vizir

KAROL MYSLIWIEC

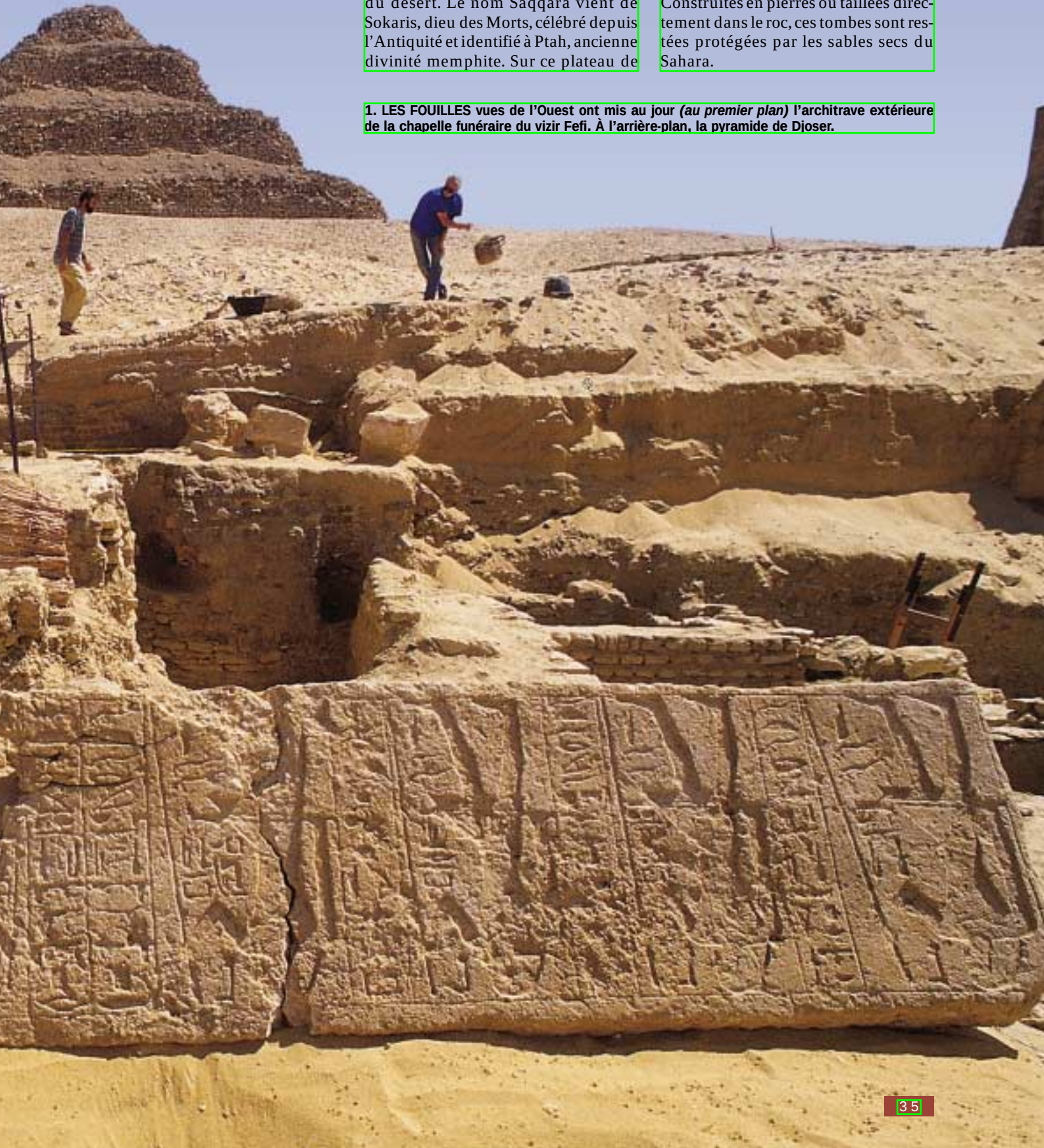
Sur le plateau de Saqqara, au Sud du Caire, des archéologues ont mis au jour la tombe d'un vizir de l'Ancien Empire égyptien.



Il y a 4 500 ans, Men-nefer (Memphis, en grec) était la capitale de l'Ancien Empire égyptien (–2686/–2181). Cette métropole culturelle s'étendait sur la rive gauche du Nil, à 30 kilomètres au Sud du Caire. Il n'en reste que des ruines éparses au pied du plateau de Saqqara, qui marque le début du désert. Le nom Saqqara vient de Sokaris, dieu des Morts, célébré depuis l'Antiquité et identifié à Ptah, ancienne divinité memphite. Sur ce plateau de

sable et de rocher, la pyramide à degrés, qui fut érigée vers 2650 avant notre ère pour Djoser, le deuxième roi de la III^e dynastie, est la plus ancienne pyramide du monde. Autour d'elle, le cimetière de Memphis – le plus grand cimetière royal d'ancienne Égypte – abrite les tombes des grands dignitaires. Construites en pierres ou taillées directement dans le roc, ces tombes sont restées protégées par les sables secs du Sahara.

1. LES FOUILLES vues de l'Ouest ont mis au jour (au premier plan) l'architrave extérieure de la chapelle funéraire du vizir Fefi. À l'arrière-plan, la pyramide de Djoser.



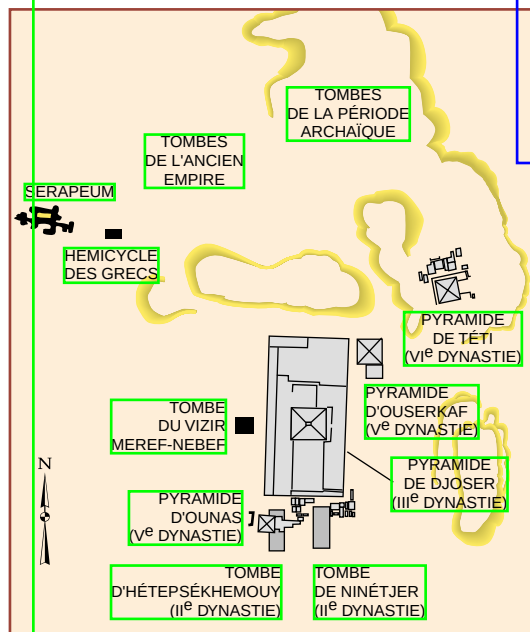
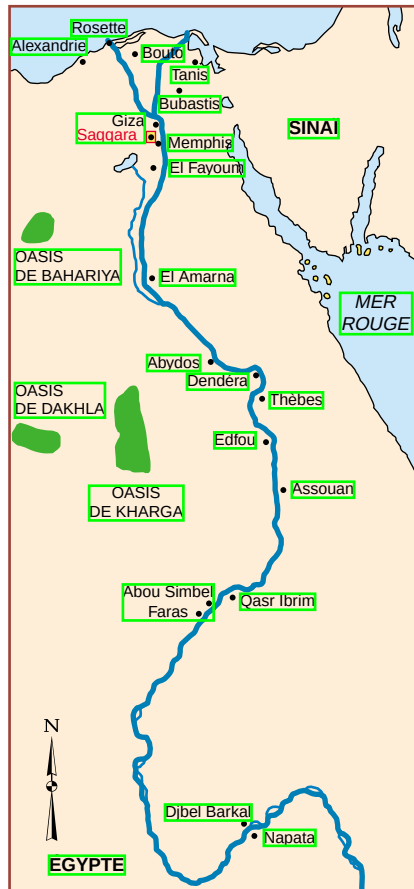
Au début du III^e millénaire avant notre ère, lors de la naissance de l'État égyptien, les rois ont été enterrés ici, avant que la première pyramide soit construite. Selon des sources égyptiennes, les tombes des cinq premiers pharaons de la II^e dynastie ont été creusées dans la roche près du site de la pyramide de Djoser.

Les archéologues ont découvert les sépultures du premier et du troisième pharaon de cette dynastie, respectivement nommés Hétépsékhemouy et Ninétyer. Ces deux tombes, des dédales souterrains taillés dans le roc, sont très proches de la pyramide de Djoser, au Sud de son enceinte. Où les autres rois de la II^e dynastie sont-ils inhumés?

Depuis le milieu du XIX^e siècle, de nombreuses équipes d'archéologues ont exploré les environs de la pyramide de Djoser, à l'Est, au Sud et au Nord. Elles ont mis au jour des tombes des hauts dignitaires égyptiens de différentes périodes de l'histoire de l'Égypte pharaonique, des pyramides inachevées, le monastère paléochrétien de Saint-Jérémie, ainsi que des labyrinthes souterrains qui renfermaient les restes momifiés d'animaux sacrés. Ainsi, près de la pyramide de Djoser, le sérapéum contient les restes momifiés de taureaux sacrés dédiés à Apis, le dieu adoré à Memphis et représenté par un taureau.

Entre le sérapéum et la pyramide de Djoser, de grandes statues de pierre des plus célèbres poètes et philosophes grecs (Platon, Héraclite, Homère, Hésiode...) ont été érigées sur un podium hémicyclique, à l'époque des Ptolémées, qui ont régné en Égypte de -305 à -30. Certains archéologues supposent qu'elles entouraient le premier tombeau d'Alexandre le Grand (-356/-323), qui conquiert l'Égypte en 332 avant notre ère. Selon Pausanias, géographe et explorateur grec du II^e siècle, le roi Ptolémée I^{er}, fondateur de la dynastie des Lagides, a rapporté la dépouille du monarque en Égypte pour l'inhumer d'abord à Memphis, puis à Alexandrie quand la construction de celle-ci fut terminée. Aucune des tombes d'Alexandre le Grand n'a été retrouvée, mais l'orientation des statues du podium hémicycle nous a incités à chercher à l'Ouest de la pyramide de Djoser. Nous n'y avons pas trouvé Alexandre, mais la tombe d'un vizir de l'Ancien Empire.

En 1987, notre équipe du Centre polonais d'archéologie a entrepris de fouiller cette zone délaissée par les archéologues, qui n'y voyaient qu'une «décharge» ou une carrière du cimetière royal.



2. SUR LE PLATEAU DE SAQQARA, autour de la pyramide de Djoser, (en bas) s'étend une partie du cimetière royal de l'État pharaonique (carte en haut).

Nos premières campagnes

La zone occidentale de la pyramide de Djoser était intéressante parce qu'elle n'avait jamais été explorée de façon systématique. En outre, la religion égyptienne réservait l'«Ouest» aux «vivants», c'est-à-dire aux habitants de l'éternité. Certains personnages importants de l'Ancien Empire y étaient-ils enterrés?

En enregistrant les variations d'intensité du champ magnétique terrestre, nous avons d'abord établi une carte géophysique de la zone : nous avons ainsi détecté la présence de grandes structures sous le sable. Puis des sondages de trois zones carrées de cinq mètres de côté ont révélé qu'une importante partie du cimetière de Memphis s'étendait autrefois à l'Ouest de la plus ancienne pyramide du monde : des tombes y avaient été creusées, du début du troisième millénaire avant notre ère jusqu'à l'époque byzantine (451-629). De nombreux puits creusés dans la roche ouvraient sur des chambres souterraines ou contenaient des restes humains momifiés, posés sur le sable. Les momies des défunts les plus fortunés étaient placées dans des enveloppes de gypse, nommées cartonnages, très minutieusement peintes.

Lors de la première campagne de fouilles, dans la tranchée la plus proche de la pyramide de Djoser, environ 100 mètres à l'Ouest, nous avons découvert un mur épais, parallèle au côté de la pyramide et orienté selon un axe Nord-Sud. Le mur était constitué de blocs de roche irréguliers, liés par de la boue et couverts d'une couche de briques crues. Son démantèlement avait commencé dans l'Antiquité.

On a daté les poteries trouvées dans les couches de sable et de fragments rocheux entassés contre le mur, ainsi que de petites tuiles de faïence émaillées de bleu, identiques à celles utilisées dans des chambres souterraines du complexe funéraire de Djoser : le mur aurait été construit à l'époque des premières dynasties.

Après cette découverte, nous avons interrompu nos fouilles pendant neuf ans : faute de financement, nous ne pouvions construire de local pour entreposer les pièces découvertes. Les fouilles ont repris en 1996, grâce au soutien du quotidien polonais *Rzeczpospolita* et à nos collègues égyptiens, qui ont

proposé d'entreposer nos découvertes dans leurs réserves. Nous avons alors élargi la tranchée vers le Sud : le mur tournait à angle droit vers la pyramide. Ce mur n'appartenait pas au complexe funéraire de Djoser, sinon il aurait été plus long et aurait contourné la pyramide. En revanche, il semblait entourer la cour d'une tombe de grande taille. Qui avait été enterré ici ?

Une tombe mystérieuse

Pour étudier cette question, nous devions élargir la tranchée vers l'Est, en direction de la pyramide de Djoser. Le sable et les débris de roche couvraient les structures des premières dynasties en couches d'épaisseur croissante. Une fouille mécanique était impossible, car de nombreuses sépultures ptolémaïques et romaines devaient être minutieusement explorées, avant d'être enlevées. Nous avons ainsi trouvé des momies posées dans le sable ou des squelettes enveloppés dans des nattes, dans des cartonnages finement décorés, peints et parfois dorés, ou dans des cercueils. L'un de ces cercueils, en terre cuite, avait une forme humaine, avec un visage humain modelé ; d'autres, en bois, portaient des fragments de prières, en hiéroglyphes, adressées à diverses divinités.

Au fond de la tranchée, la surface nivelée de la roche était couverte d'une épaisse couche de boue qui contenait les restes de squelettes d'animaux. Dans cette boue également, nous avons retrouvé la trace de nombreux foyers rituels, des taches rondes, rouges avec un centre noir. Des feux avaient été allumés pendant des cérémonies dédiées aux défunts.

La structure ressemblait beaucoup à celle de la tombe de Ninétjer, située à environ 300 mètres au Sud-Est des fouilles actuelles. Nous espérions trouver des indices pour dater la tombe dans d'éventuelles inscriptions que nous n'atteindrions qu'en prolongeant encore la tranchée vers la pyramide de Djoser. Toutefois, alors que nous explorions les sépultures ptolémaïques et romaines des couches supérieures, nous avons découvert un monticule de briques crues qui constituait la partie supérieure d'une immense voûte à plusieurs arches. Cette voûte cachait une couche de blocs de pierre de différentes tailles, soigneusement empilés et issus du creusement de chambres souterraines dans la roche. Ces blocs dissimulaient sans doute un

site. Ils étaient au fond de deux puits d'environ 1,4 mètre de profondeur taillés dans le roc et séparés par une plate-forme rocheuse.

Le reste de cette structure était couvert de sable et de fragments de roches plus récents. La partie orientale de la cour d'une tombe plus ancienne avait donc été détruite lors de la construction d'une nouvelle tombe, probablement destinée à un autre personnage important. Le parement irrégulier et très primitif de la roche qui sépare la cour et

les puits peu profonds indique la précipitation des ouvriers, qui n'ont pas respecté des structures plus anciennes.

Les tessons de poteries trouvés dans la couche qui couvrait cette structure attestaient la destruction partielle de l'ancienne tombe au cours de l'Ancien Empire. La tombe de l'usurpateur a été bloquée peu après avoir été taillée dans la roche, car on ne trouve aucun objet postérieur à l'Ancien Empire. À l'inverse de nombreuses chapelles funéraires de dignitaires, elle n'a donc pas



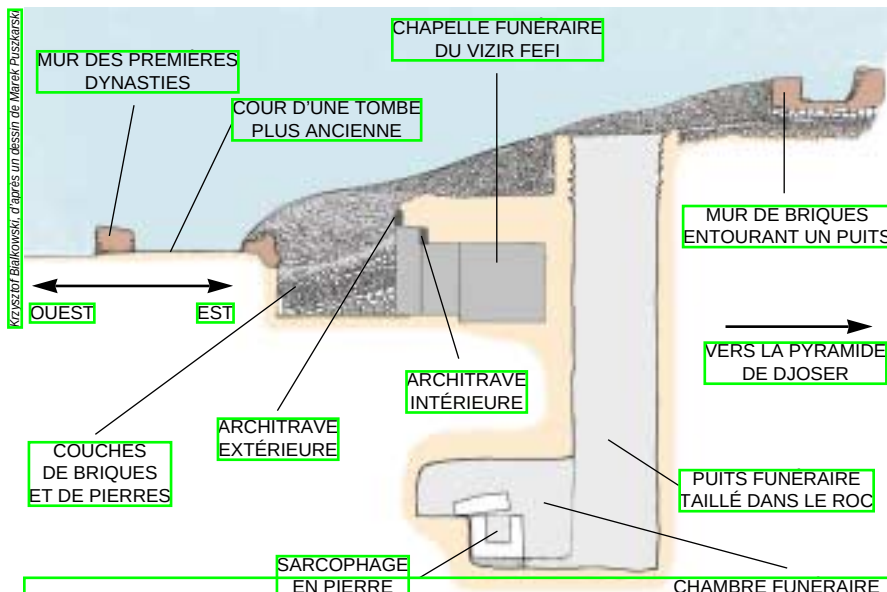
3. UNE MÈRE ET SON ENFANT MOMIFIÉS ont été trouvés dans une sépulture de la période romaine. Cette structure était faite de blocs de calcaire qui avaient été prélevés sur des constructions antérieures.



4. AU FOND D'UN Puits de 15 mètres de profondeur, une chambre funéraire est taillée dans le roc. À droite, l'entrée du puits est au premier plan, tandis qu'une partie de la fausse porte de la tombe du vizir est visible à l'arrière-plan.



5. L'ARCHITRAVE INTÉRIEURE (une pierre horizontale posée sur les éléments verticaux d'une construction) de la chapelle funéraire du vizir s'étend sur toute la longueur de la façade. Elle est gravée de quatre lignes de hiéroglyphes, dont chacune se termine par l'un des trois noms du défunt. Sous l'architrave, la façade est ornée de 51 colonnes de textes testamentaires et de huit représentations du vizir (une seule est visible sur la photographie).



6. TAILLÉE DANS LE ROC, la chapelle funéraire du vizir Fefi est une petite pièce richement décorée. Elle mesure 6,46 mètres de longueur du Nord au Sud et 2,43 mètres de large d'Est en Ouest. On y pénètre par une petite cour située à 1,4 mètre sous le sol d'une autre cour, où figurait une tombe plus ancienne. L'entrée étroite de la chapelle (0,6 mètre de largeur) est au milieu d'une façade majestueuse, au fond d'une niche taillée dans le roc, de 5,86 mètres de longueur, de 0,7 mètre de profondeur et 2,50 mètres de hauteur. L'avant est surmonté d'une architrave gravée de quatre lignes de hiéroglyphes indiquant les titres du défunt. Entre cette architrave et le mur de la chapelle, le plafond est peint en rouge pour imiter le granit, une roche beaucoup plus dure que le calcaire tendre et friable dans lequel la tombe du vizir a été taillée.

abrité de culte funéraire. La plupart des briques utilisées pour la dissimuler provenaient du démantèlement de la partie supérieure du mur entourant la cour plus ancienne.

En 1997, lors de la saison de fouilles suivante, nous avons poursuivi les fouilles dix mètres plus loin, vers la pyramide de Djoser. Nous avons alors trouvé de gros blocs de calcaire blanc, posés sur une couche de sable. L'orientation Nord-Sud de cette nouvelle structure, parallèle au côté de la pyramide, montrait que ces blocs appartenaient à l'enceinte d'un grand complexe architectural. Contre cette enceinte, à l'Ouest, un mur de briques crues limitait une cour rectangulaire.

Au Sud, des momies et des squelettes reposaient sur les pierres du bord supérieur d'un grand puits funéraire de 2,3 mètres de côté. Les parois du puits étaient en pierres sur environ 2,5 mètres de hauteur, puis étaient taillées directement dans la roche jusqu'à 15 mètres de profondeur, où une chambre funéraire, à l'Ouest du puits, abritait un sarcophage. Celui-ci, ainsi que les murs de la chambre funéraire, était nu. Les tailleurs de pierres avaient travaillé en vain, car le sarcophage inachevé n'a jamais été utilisé. Seul un squelette, accompagné des restes d'une harpe en bois, était à la surface des débris, au-dessus du sarcophage.

Le vizir et ses fils

À l'Ouest du puits, dans les débris et dans le sable qui obstruaient l'entrée d'une tombe de l'Ancien Empire, taillée dans la roche, nous avons découvert une façade décorée de hiéroglyphes, qui révélait enfin l'identité du défunt. Alors que nous dégagions cette façade, la plus terrible tempête de sable qu'aient connue les membres de l'expédition a dévasté notre campement. Dans ce climat propice à la superstition, nous avons découvert que la toute première tombe avait été détruite par Meref-nebef, également nommé le «beau nom» de Fefi et le «grand nom» d'Ounas. De ces deux noms, nous avons déduit la date de la tombe : Ounas était le dernier souverain de la V^e dynastie, et Fefi, selon les hiéroglyphes gravés au-dessus de la façade, était vizir et prêtre du culte funéraire dans la pyramide de Têti, le premier pharaon de la VI^e dynastie. Construite au Nord-Est de la pyramide de Djoser, cette pyramide existe

toujours. La pyramide d'Ounas est située à l'opposé, au Sud-Ouest de la pyramide de Djoser. La présence de la tombe entre les monuments funéraires des deux pharaons confirme l'identité du vizir. La zone que nous avons fouillée est sans doute une partie du cimetière destinée aux notables des débuts de l'État pharaonique.

Les décorations sculptées des murs de la chapelle funéraire du vizir Fefi montrent plusieurs scènes également représentées sur les tombes des dignitaires du Memphis de l'Ancien Empire. Certaines d'entre elles, sous forme de miniatures, s'ornent de couleurs vives (elles ont souvent disparu dans les autres tombes). L'artiste semble avoir voulu réunir le plus grand nombre de motifs possible sur les murs de la chapelle, alors que, dans d'autres tombes, ce répertoire s'étale sur les murs de nombreuses pièces.

Les décorations des murs Nord et Ouest de la chapelle étaient les plus importants pour la vie du vizir dans l'au-delà. Sur le mur Ouest, de chaque côté de l'entrée, de fausses portes ont été sculptées : elles permettaient au défunt de « rester » en relation avec le monde des vivants, notamment pour consommer les offrandes apportées par les prêtres. Près des fausses portes, des peintures représentent de riches offrandes animales et végétales, ainsi que de la vaisselle variée. Une procession de personnages offrant des oiseaux, des cuisses de bœuf, des légumes et des fleurs est surmontée de deux immenses listes qui énumèrent ces offrandes. Près des murs décorés, une banquette taillée dans le roc recevait probablement ces offrandes. Les tessons trouvés parmi les débris qui remplissaient la chapelle jusqu'au tiers de sa hauteur indiquent que des offrandes étaient déposées devant la chapelle et à l'intérieur.

Certaines des représentations des fils du vizir ont été dégradées intentionnellement, après la mort du roi. Des personnages ont été martelés avec beaucoup d'application, et seules les représentations de l'un des fils, nommé également Fefi, sont restées intactes. Des indices indéniables d'outrages à la mémoire des défunts s'observent quand on pénètre dans la tombe : seul le portrait du fils de Fefi a échappé au martelage. Celui-ci tourne amicalement la tête vers son frère, dont il ne reste qu'une impression en négatif. Nous pensons qu'ils étaient tous deux les fils de l'épouse qui accompagne le vizir dans cette scène.

Évidemment, ces martelages de plusieurs personnages révèlent que les enfants du vizir, de mères différentes, se sont affrontés après la mort du père. Ces conflits expliquent peut-être la tentative d'un membre de la famille ou d'un prêtre du culte funéraire qui, pour sauvegarder la sépulture, a ordonné de dissimuler la tombe.

Toutefois, la fragilité de la roche en cet endroit a peut-être également obligé les bâtisseurs de la tombe à la fermer rapidement : sur chaque mur, des traces montrent que les tailleurs de pierres et

les artistes travaillaient un matériau de mauvaise qualité. Notamment, des parties de la grande inscription hiéroglyphique du linteau extérieur sont modelées dans du gypse qui bouche les parties manquantes d'un calcaire friable.

Dans la partie méridionale de la façade, au Sud de la niche d'entrée, une fausse porte monumentale sculptée n'a jamais été achevée : sur un tiers de la hauteur, la pierre était trop friable pour que l'on parvienne à tailler un bord rectiligne. De chaque côté de la stèle, la surface de la roche



7. SUR LES BAS-RELIEFS des murs latéraux, à l'entrée de la chapelle funéraire, le vizir défunt est sculpté en compagnie de plusieurs femmes différentes, dont une seule est l'une de ses épouses. Parmi les autres épouses gravées sur les murs intérieurs de la chapelle funéraire, nous avons identifié Iret, Sesheshet, Nebet, Metjetu et Hemi.



8. SUR LE MUR SUD, des peintures illustrent la vie terrestre du défunt. Sur celle-ci, le vizir et l'une de ses femmes assistent à une cérémonie.



9. AU SUD DU MUR ORIENTAL, des images aux couleurs pastel décrivent la pêche, le transport et les offrandes du Nil au défunt. Hemi, l'une des épouses du vizir, est assise seule. Cette décoration, sans doute réalisée après les autres, indique qu'Hemi était peut-être la dernière des épouses de Fefi.

a été provisoirement aplanie, mais aucun hiéroglyphe n'y a été tracé. À côté de la fausse porte inachevée, nous avons dégagé un gros morceau de dalle de pierre, modelée seulement sur une partie, qui devait être un élément de la décoration architecturale de la façade. Entre la niche et la fausse porte inachevée, les constructeurs ont voulu intercaler une architrave (une pierre horizontale qui repose directement sur les éléments verticaux d'une construction) dont le bord oriental devait s'insérer dans la roche et dont le bord occidental devait être posé sur un pilier. Cette partie également est restée inachevée.

En revanche, au-dessus de l'entrée de la chapelle funéraire, une seconde architrave est gravée de quatre lignes de hiéroglyphes, terminées chacune par l'un des noms du vizir. Au Nord, dans un rectangle, le portrait du vizir et ses plus importantes fonctions sont gravés. Les inscriptions de cette architrave intérieure diffèrent de celles de l'architrave extérieure. Elles rappellent celles qui sont sculptées dans les tombes royales de la même époque. La surface de la roche est couverte d'une mince couche de gypse dont la texture imite le calcaire. Les signes colorés en bleu sont aussi typiques des tombes royales contemporaines, notamment de celle d'Ounas. Sur la partie inférieure de la façade, une mosaïque de signes sculptés en bas-reliefs forme des colonnes verticales.

L'ensemble des reliefs est couvert d'un enduit de gypse, et les signes sont rehaussés de peinture. Ces hiéroglyphes très colorés, aux détails finement modelés, se détachent sur un fond gris bleu uniforme. Le texte ainsi écrit en 51 colonnes décrit le culte du défunt. Sous ce testament, dans la partie inférieure de cette décoration, le vizir est représenté huit fois, marchant en direction de sa propre tombe.

Au Nord de la cour de la tombe plus ancienne, le mur construit pour fermer le nouveau complexe n'a pas non plus été terminé. La structure de ce mur et les sédiments indiquent que le travail a été interrompu, alors que seules les premières assises étaient en place.

Si l'on ignore pourquoi la tombe fut obstruée, on sait que la couche de pierre et la voûte en briques crues ont évité les intrusions. Si la tombe d'Alexandre le Grand est effectivement proche du sérapéum de Memphis et de l'hémicycle des Grecs célèbres, on comprend pourquoi le site est redevenu un cimetière, au début du règne des Ptolémées, après 2 000 ans d'abandon : la proximité du roi macédonien déifié, qui a libéré l'Égypte du joug perse, était certainement idéale pour un repos éternel. De surcroît, la voûte de briques était un terrain parfait pour les sépultures, car les briques sont un excellent matériau réutilisable pour le revêtement des tombes ordinaires. Notre expédition n'a pas dérogé à la règle : les informations arrachées au sol soulèvent plus de nouveaux mystères qu'elles n'en éclaircissent. Ce faisant, les Anciens se vengent peut-être de la profanation de leurs tombes.

Karol MYSLIWIEC est directrice de recherches au Centre d'archéologie méditerranéenne de l'Académie des sciences polonaise.

K. MYSLIWIEC, *A New Mastaba, A New Vizier*, in *Egyptian Archaeology. The Bulletin of the Egypt Exploration Society*, n° 13, pp. 37-39, 1998.

J.-Ph. LAUER, *Les pyramides de Saqqara*, Le Caire, 1991.

N. KANAWATI et A. HASSAN, *The Teti Cemetery at Saqqara, vol. II : The Tomb of Ankhmahor*, in *The Australian Center for Egyptology Reports*, vol. 9, Warminster, 1997.

H. ALTENMÜLLER, *Die Wanddarstellungen im Grab des Mehu in Saqqara*, in *Archäologische Veröffentlichungen 42*, Deutsches Archäologisches Institut Abteilung Kairo, Mainz, 1998.

La conservation de la tombe de Néfertari

NEVILLE AGNEW • SHIN MAEKAWA

Ramsès II construisit pour son épouse favorite une tombe remarquable que les archéologues s'attachent à conserver.

On connaît mal Néfertari, l'épouse favorite du pharaon Ramsès II, qui régna de 1290 à 1224 avant notre ère. Cependant on sait que Ramsès II en était très amoureux : il a voulu que la statue dédiée à sa compagne et à la déesse Hathor, à Abou Simbel, soit aussi grande que sa propre statue, honneur qui ne fut accordé à aucune autre reine d'Égypte. Il la nommait « femme de charme », « délice de l'amour », « visage de toute beauté », « pour qui se lève le dieu soleil ». Quand elle mourut, il l'enterra dans une tombe décorée de la vallée des Reines, alors qu'elle n'était pas de lignée royale.

Les peintures murales de cette tombe sont parmi les plus belles de tout l'art funéraire des pharaons. Elles ne montrent pas la vie quotidienne de la défunte avec Ramsès II ou avec ses six ou sept enfants. Seul est représenté le voyage de la reine vers l'au-delà et sa rencontre avec Osiris, Isis et d'autres divinités. Ce voyage est codifié par les normes classiques, qui figurent dans les 174 chapitres du *Livre des Morts*, mais les images ont ici des couleurs, une finesse et une richesse remarquables.

La dévotion de Ramsès II à sa reine l'a peut-être protégée, lors de son voyage vers l'au-delà, mais l'amour du pharaon n'a pas empêché la dégradation de la tombe. Quand l'archéologue italien Ernesto Schiaparelli découvrit la sépulture, en 1904, celle-ci avait déjà été fracturée et pillée. Les trésors qui devaient accompagner Néfertari au cours de son voyage dans l'au-delà avaient été volés,

son sarcophage avait été fracassé et sa momie avait disparu.

Les peintures murales étaient également très endommagées : du sel avait suinté du calcaire où la tombe était creusée et avait cristallisé sous l'enduit, détruisant près de 20 pour cent des peintures. Puis, au cours des décennies qui suivirent la découverte de cette tombe spectaculaire, les visiteurs ont accéléré la dégradation : en touchant les surfaces peintes et, aussi, en dégageant de la vapeur d'eau, lorsqu'ils res-

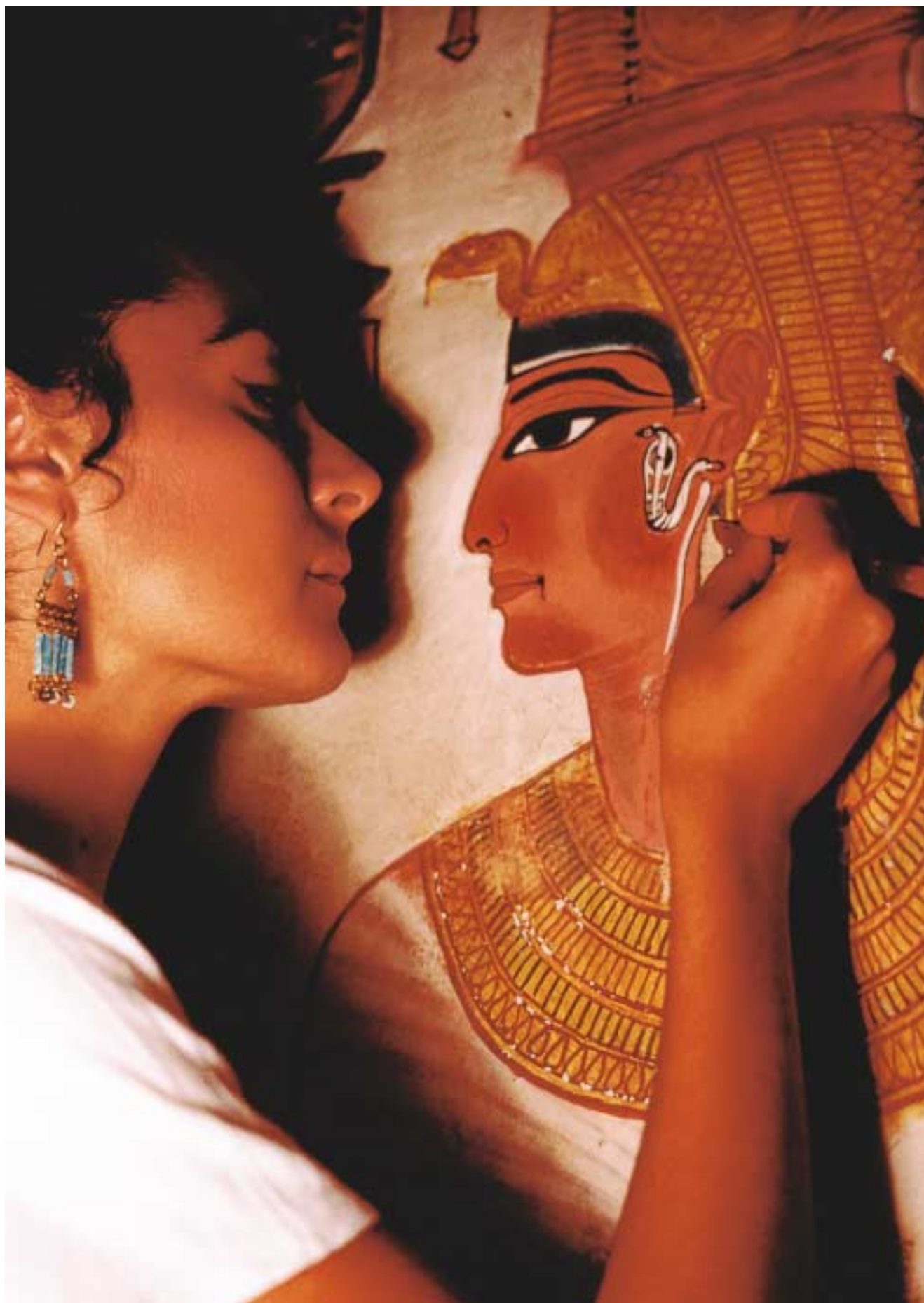
piraient ou transpiraient. Quand les archéologues et les historiens se sont inquiétés des dégradations, à la fin des années 1920, le Metropolitan Museum of Art de New York finança un relevé photographique complet des peintures murales ; ce relevé compléta les 132 images réalisées sur des plaques photographiques par le photographe de Schiaparelli, en 1904 et en 1905, ainsi que d'autres photographies prises ultérieurement. Toutefois les dégradations se poursuivaient, et le gouvernement égyptien dut fermer la tombe au public, à la fin des années 1930.

La tombe de Néfertari resta alors dans le silence et la poussière, visitée seulement par quelques archéologues. Vers la fin des années 1970, plusieurs organisations, dont l'UNESCO, le Centre international d'études pour la conservation et la restauration des biens culturels et l'Université du Caire, ont entrepris une série d'études sur l'état de quelques tombes importantes. Ces recherches révélèrent, une fois de plus, l'état déplorable des peintures murales de la tombe de Néfertari. Elles conduisirent les conservateurs de l'Institut Paul Getty et du Service des antiquités de l'Égypte à proposer une sauvegarde des peintures restantes, afin de rouvrir ensuite la tombe au public.

Entre 1986 et 1992, les équipes de conservation ont utilisé des outils et des techniques de pointe pour remettre les peintures en état. Ces équipes rassemblaient des historiens de l'art, des conservateurs, des égyptologues, des écologistes, des géographes, des chimistes, des techniciens et



1. LA TOMBE DE LA REINE NÉFERTARI est aujourd'hui ouverte au public, parce que l'équipe de conservation a réussi à éviter les dégradations que causent les visites. Sur la page ci-contre, on voit le conservateur Lorenza D'Alessandro qui entretient un portrait de la reine défunte. Située dans la vallée des Reines, la tombe de Néfertari, dont on voit ci-dessus l'entrée richement colorée, contient des peintures remarquablement travaillées.



© 2000 L'ESPRIT

quelques autres spécialistes. Elles voulaient non seulement protéger les peintures, mais aussi comprendre les mécanismes de dégradation et stabiliser l'air de la tombe. Aujourd'hui, sept ans après la fin des travaux, les peintures sont stabilisées, et les visiteurs peuvent à nouveau admirer les représentations originales de la reine Néfertari.

L'équipe chargée du chantier a choisi d'emblée de faire seulement de la conservation, et non de la restaura-

tion : aucune peinture n'a été appliquée là où elle avait disparu, même quand les relevés photographiques permettaient de le faire. Les œuvres d'art subissent parfois des restaurations qui en restituent l'harmonie initiale. Toutefois, ce procédé compromet inévitablement l'intégrité des objets archéologiques. Dans le cas de la tombe de Néfertari, toutes les personnes qui ont participé à la conservation ont convenu que l'ancien ne devait pas être mélangé au moderne.

Évaluer des dégâts

Le travail commença par une évaluation de l'état général des peintures. Chaque centimètre d'enduit fut étudié : la surface était-elle tombée, s'était-elle décollée de la paroi, y adhéraient-elle toujours, s'était-elle fissurée ? L'équipe chercha également les endroits où des fragments de roche traversaient l'enduit, et elle analysa les peintures : s'écaillaient-elles, étaient-elles usées, se désagrégeaient-elles, étaient-elles couvertes de poussière ou de nids d'insectes ? Simultanément les conservateurs cherchèrent les cristallisations salines à la surface des peintures, ainsi qu'entre la surface de la roche et la couche d'enduit. Finalement, ils repèrent les interventions antérieures, les endroits où les peintures avaient été retouchées, où des trous avaient été rebouchés et où l'on avait appliqué des revêtements, tels de la gaze ou du ruban adhésif.

Une fois la tombe minutieusement examinée, les archéologues italiens Paolo Mora et Laura Mora ont abordé la difficile tâche de conservation des peintures. Avec leurs collègues, ils ont commencé par prélever de minuscules échantillons dans les peintures et dans l'enduit de support. Grâce à des appareils de diffraction des rayons X, de fluorescence des rayons X, de microscopie en lumière polarisée et de chromatographie en phase liquide ou gazeuse, on a cherché la composition chimique des minuscules échantillons prélevés. Les analyses ont été utilisées pour la sauvegarde ou la stabilisation des peintures antiques. En attendant, on a bloqué la dégradation en appliquant sur l'enduit des bandes de papier Japon (fabriqué à partir d'écorces de mûriers) : on empêchait ainsi que l'enduit ne se détache du mur, et l'on a ensuite enlevé le papier quand le travail de conservation a commencé.

Les archéologues n'ont pas été surpris de découvrir que les pigments dataient de l'époque où vivait Néfertari : vert égyptien ; bleu égyptien ; rouge d'oxyde de fer, avec une trace de manganèse et d'arsenic ; ocre pour le jaune ; calcite (un carbonate de calcium), anhydrite (un sulfate de calcium) et huntite (un carbonate de calcium et de magnésium) pour le blanc, et charbon pour le noir. Les pigments étaient principalement liés par de la gomme arabique, résine naturelle d'un acacia local. Certaines peintures avaient été vernies avec de la résine et du blanc d'œuf, mais deux

À l'extérieur de la tombe

Les travaux de restauration effectués dans la tombe de Néfertari s'intègrent dans un programme plus vaste de sauvegarde des sites thébains, qui sont parmi les plus visités d'Égypte.

La protection de cette tombe a demandé des aménagements extérieurs tout aussi importants que les restaurations internes. En effet, à la suite de pluies torrentielles qui ont inondé de nombreuses tombes de la région, à l'automne 1994, un programme de protection spécifique s'est imposé. On a tiré les leçons de ces dégâts et entrepris des travaux préventifs qui, depuis, ont démontré leur efficacité. Il était avant tout indispensable d'empêcher le retour de l'eau lors des pluies. Les tombeaux de la vallée des Reines ont été creusés dans un «ouadi» qui reçoit, lors des pluies, des quantités très importantes de ruissellements. Or, les précautions prises dans l'Antiquité pour éviter l'inondation des tombes, comme la création de petits barrages, le creusement de bassins de retenue, etc. ont disparu au fil des siècles. D'autre part, le chemin menant aux différentes tombes a été modifié et plusieurs fois asphalté, ce qui a eu pour conséquence de le surélever, de sorte que l'ouverture de plusieurs tombes se trouvait en contrebas, au début des années 1990.

Une mission de l'Unité de recherche 1064 Louvre-CNRS est intervenue en urgence en 1994. Conduite par Christian Leblanc, associée au Centre d'étude et de documentation sur l'Ancienne Égypte, cette mission avait nettoyé, fouillé et effectué de multiples relevés de toutes sortes dans la vallée depuis de nombreuses années. Elle a alors démontré la nécessité de

retrouver le niveau du sol antique et de construire des murets protecteurs autour des entrées des tombes afin de détourner le cours de l'eau. En partenariat avec le Conseil suprême des antiquités de l'Égypte, elle a également fait reculer la barrière d'accès à la vallée de plusieurs dizaines de mètres, afin d'éloigner le stationnement des bus de touristes : ces véhicules ont la fâcheuse habitude de rester en marche durant la visite pour demeurer climatisés ; or, les trépidations dues au fonctionnement des moteurs sont tout à fait nocives.

Des mesures de protection similaires ont été prises dans les autres sites de la rive gauche de Thèbes : vallée des Rois, temple de la reine Hatchepsout à Deir el-Bahari et nécropoles civiles. En outre, des barrières de mises à distance et des parois vitrées ont été mises en place afin d'éviter toutes les dégradations dues aux contacts, volontaires ou non, de milliers de mains ou de sacs à dos des touristes. Les parois vitrées sont le plus souvent posées aux endroits les plus exposés seulement, de façon à permettre la libre circulation de l'air. Enfin, des parquets sont posés, peu à peu, pour éviter que la poussière se soulève et se dépose sur les peintures murales.

La tombe de Séthi I^{er} (père de Ramsès II), la plus profonde de la vallée des Rois, devrait faire bientôt l'objet d'une restauration proche de celle de la tombe de sa bru Néfertari.

Toutes les mesures de sauvegarde devront se perpétuer si nous voulons conserver ce patrimoine pictural.

Sophie LABBÉ-TOUTÉE, Attachée au Département des Antiquités égyptiennes, Musée du Louvre

résines identifiées étaient des composés de synthèse modernes : les peintures avaient été restaurées. L'enduit qui couvrait les murs était composé de gypse, d'anhydrite, de vase du Nil et de calcaire broyé. Il avait été renforcé par de la paille de blé, qui avait également évité les fissures, lors du séchage.

Connaissant les matériaux utilisés, les membres de l'équipe se mirent au travail. Pendant 469 jours (répartis sur cinq ans), ils nettoyèrent les peintures, enlevèrent les cristaux de sel qui cou-

vraient les parois ou qui s'étaient formés sous l'enduit en certains endroits, puis ils recollèrent l'enduit sur la roche à l'aide d'une colle acrylique mélangée à du sable local et à du gypse. Les écailles de peintures furent remplacées et, aux endroits abîmés, une résine acrylique fut déposée : elle bloquera les dégradations ultérieures. Les trous ont été comblés au mortier de chaux, et les anciennes réparations mal faites ont été éliminées.

Comment éviter d'abîmer les couleurs ? Avant de commencer le travail

de conservation, Michael Schilling a réalisé 1 500 mesures de couleurs en 160 points de la tombe, à l'aide d'un chromomètre. Ces relevés ont guidé les travaux ultérieurs ; ils aideront ultérieurement à surveiller les peintures.

Se protéger du sel

Après le travail de conservation, le sel restait la principale menace. Quand le travail a commencé, l'enduit était parfois soulevé de la roche



2. DES CRISTAUX DE SEL (*en haut à gauche*) se sont formés lorsque l'eau s'est infiltrée dans le calcaire de la tombe de Néfertari. Ils ont détaché l'enduit de la surface rocheuse et détruit près de 20 pour cent des peintures avant que les conservateurs ne commencent leur travail. Des essais précédents de restauration avaient

tenté, sans succès, d'enrayer les dégâts en maintenant l'enduit en place avec de la gaze (*en haut à droite*). Depuis 1986, l'approche a été globale : les conservateurs ont enlevé les cristaux de sel, recollé le plâtre contre les murs et nettoyé les peintures (*en bas*).



par 15 millimètres de sel. Il provient du calcaire thébain, un sédiment marin où la tombe est creusée. Généralement le sel ne dégrade pas les tombes, car le climat égyptien est extrêmement sec. Toutefois la tombe de Néfertari est creusée dans un site où une source dissout le sel et le fait migrer.

L'origine exacte de l'eau reste débattue, malgré plusieurs années d'études. Une partie de l'eau fut sans doute apportée par ceux qui réalisèrent la tombe : l'enduit contenait de l'eau, qui n'a pas été éliminée de la tombe. Toutefois cette humidité n'est pas la cause de la formation des épaisses couches de cristaux de sel. On soupçonne plutôt les pluies diluviennes qui surviennent tous les 50 ans environ. Nombre de tombes de la région, dont celles de la vallée des Rois, ont été périodiquement inondées depuis l'Antiquité. Les infiltrations d'eau sont évidentes dans la tombe de Néfertari, surtout à l'entrée. L'eau a certainement suinté lentement à travers les fissures, lessivant au passage le sel de la roche. Puis, s'évaporant des murs, elle a déposé le sel à la surface de la roche, juste sous les peintures.

Pour surveiller l'humidité et la température, nous avons enregistré, pendant plusieurs années, le climat extérieur et le microclimat régnant à l'intérieur de la tombe : la température extérieure varie entre 40 °C, pendant l'été, et 10 °C, les matins d'hiver. L'humidité extérieure fluctue également beaucoup, passant de 80 pour cent en hiver à seulement 10 pour cent le reste de l'année. Ces variations de l'environnement extérieur ont un peu modifié l'air dans la tombe, en raison des fuites à l'entrée, mais la température à l'intérieur est restée proche de 29 °C, avec une humidité stable de 50 pour cent. Nous avons également détecté une ventilation naturelle pendant l'hiver : de l'air frais pénètre dans la tombe, au niveau du sol, forçant l'air plus chaud à sortir par l'escalier d'entrée. Ce mouvement d'air a préservé les peintures et les plâtres, qui sont restés secs pendant des siècles, mais, lorsque la tombe a été ouverte aux visiteurs, l'humidité a fortement augmenté.

3. LES PEINTURES MURALES de la tombe de Néfertari sont aujourd'hui préservées. Un juste compromis entre l'accès au public, qui peut admirer les représentations du voyage de la reine dans l'au-delà, et la protection des peintures a été trouvé.



4. ON SURVEILLE L'ENVIRONNEMENT DES TOMBES afin de protéger leurs peintures. S. Maekawa a utilisé un système alimenté par des cellules photovoltaïques pour étudier l'air de la tombe (*en haut*). Il a constaté que le nombre de visiteurs devait être limité pour éviter que la température et l'humidité dans la tombe ne provoquent de nouveau la croissance de cristaux de sel. Seuls 150 touristes par jour sont admis à l'intérieur (*en bas*).

La pleine saison touristique est la saison chaude, quand l'humidité augmente dans la tombe et quand la circulation d'air vers l'extérieur est interrompue. Les visites de personnes qui transpirent ou, simplement, qui respirent augmentent l'humidité dans la tombe, ce qui accroît le risque de développement des micro-organismes (moisissures ou bactéries) à la surface des peintures, ainsi que de réapparition des cristaux de sel.

De plus, nous avons soigneusement enregistré les concentrations en dioxyde de carbone dans l'air de la tombe. Comme la ventilation naturelle de la tombe est faible et que ce gaz est plus

dense que l'air, les touristes pourraient être incommodés. De surcroît, le dioxyde de carbone réagit avec l'humidité de l'air, produisant de l'acide carbonique qui risque de décolorer les peintures murales. S. Maekawa a mesuré que la concentration habituelle en dioxyde de carbone, de 340 parties par million, atteint 2 500 parties par million quand les touristes visitent la tombe (les autorités sanitaires admettent une concentration maximale de 1 000 parties par million).

Fort de ces observations, le Service des antiquités de l'Égypte (qui est aujourd'hui le Conseil suprême des Antiquités) a conçu un système qui autorise les visites tout en protégeant la tombe. D'abord, l'éclairage est assuré par des lampes qui dégagent très peu de chaleur. Puis un système de ventilation extrait l'air de la tombe, de sorte que de l'air extérieur sec remplace l'air humide engendré par les touristes. Depuis 1995, jusqu'à 150 personnes par jour, par groupes de 10 à 15, ont visité la tombe, au cours de visites organisées qui durent 15 minutes. Aujourd'hui, le système de préservation semble bien fonctionner ; seule un peu de poussière s'est déposée sur les peintures (et les a légèrement obscurcies).

Malgré la surveillance constante, les visiteurs risquent d'endommager la tombe, de sorte que des inspections minutieuses et régulières sont organisées. Les conservateurs auraient une lourde responsabilité s'ils laissaient se détruire en quelques décennies un trésor archéologique qui a survécu aux millénaires. D'autre part, la fermeture de la tombe serait plus conforme au vœu de Ramsès II, qui voulait une vie tranquille et retirée pour son épouse défunte.

Neville AGNEW et Shin MAEKAWA sont conservateurs à l'Institut Paul Getty.

Stanley MAYES, *The Great Belzoni : Archaeologist Extraordinary*, Walker, 1961.

Art and Eternity : The Nefertari Wall Paintings Conservation Project 1986-1992, sous la direction de M.A. Corzo et M. Afshar,

Getty Conservation Institute, Los Angeles, 1993.

Andrea MCDOWELL, *La vie quotidienne dans l'Égypte ancienne*, in *Pour la Science* n° 232, février 1997.

John K. MCDONALD, *House of Eternity, the Tomb of Nefertari*, J. Paul Getty Museum, Los Angeles, 1996.

Les momies

JACQUES CONNAN • ANDRÉ MACKE • CHRISTIANE MACKE-RIBET

Pour conserver les corps, les embaumeurs égyptiens les traitaient avec des baumes qu'ils préparaient à partir de substances naturelles. On découvre aujourd'hui les méthodes d'application des baumes et leur composition.

Comment les Égyptiens conservaient-ils les corps des momies ? Au V^e siècle avant notre ère, l'historien grec Hérodote nous a laissé une description des méthodes employées par les embaumeurs : l'extraction du cerveau par voie nasale, l'ablation des viscères thoraco-abdominaux, le traitement du cadavre par un produit desséchant et par des baumes (voir l'encadré de la page 52). Cependant, la description d'Hérodote est-elle fiable ? Elle est en tous cas sommaire et datée. Comment l'embaumeur procédait-il pour momifier le corps avant de l'envelopper dans des bandelettes ? Comment préparait-il ses baumes et avec quels ingrédients ? Ces méthodes ont évolué au cours du temps, ce qui rend leur reconstitution

d'autant plus difficile. Aujourd'hui, grâce à une étude systématique d'un grand nombre de momies de différentes époques, nous avons élucidé plusieurs mystères.

Nous avons principalement analysé 341 momies complètes ou fragmentaires qui proviennent de la nécropole de la Vallée des Reines, sur la rive Ouest du Nil, face à la ville de Louxor. Là, les archéologues ont retrouvé les restes de 1 100 personnes : les Égyptiens ont utilisé cette nécropole pendant trois périodes. Dans notre série, quatre momies fragmentaires de membres de la famille royale datent du Nouvel Empire (de 1508 à 1085 avant notre ère), 30 momies du personnel des temples (prêtres, jardiniers, parfumeurs, chanteuses...) datent de la Troisième Période

intermédiaire et de la Basse Époque (de 1085 à 332 avant notre ère) et 307 momies datent de la période romaine (de 30 avant notre ère à 325), quand le site servait de nécropole publique, où les momies étaient regroupées par village. Christian Leblanc, de la Mission archéologique française de Thèbes Ouest, a dirigé les fouilles. Nous avons également fait des prélèvements sur des collections de musées, pour les analyses chimiques.

L'extraction du cerveau

Nous examinerons ici les étapes successives de la momification, dans l'ordre selon lequel l'embaumeur les réalisait, qui correspond à la description d'Hérodote.



1. LE PAPYRUS DE BENKENNOUT (trouvé dans la tombe de Benkennout) est un exemplaire du *Livre des morts*, que les Égyptiens plaçaient dans les tombes. À gauche, quatre corps noirs dans un

rectangle seraient des cadavres en cours de momification. Ils baigneraient dans une cuve remplie de baume noir : l'embaumeur, après avoir enlevé les viscères et desséché la peau, laissait trem-

L'extraction du cerveau était le premier travail de l'embaumeur. Elle n'avait pas toujours lieu, car le corps de la momie se conservait aussi bien si le cerveau restait en place : il s'asséchait alors sans pourrir. Toutefois, l'extraction faisait probablement partie du rituel de la momification, de sorte qu'elle devint progressivement de plus en plus fréquente : on l'a constatée sur 7 pour cent des momies du Moyen Empire, 40 pour cent des momies du Nouvel Empire et 70 pour cent des momies de la période romaine.

D'après les destructions osseuses observées sur les crânes des momies, nous savons comment l'embaumeur procédait. Généralement, il introduisait un couteau ou une sonde dans la narine, qu'il agrandissait par des mouvements de cisaillement et de rotation. Il atteignait ainsi l'os ethmoïde (entre la cavité nasale et l'orbite), qu'il perforait (voir la figure 2). Contrairement à ce qu'indique le texte d'Hérodote, l'ouverture ainsi formée était trop petite pour que l'embaumeur extraie le cerveau par fragments, en s'aidant d'un crochet. En réalité, le cerveau se liquéfiait rapidement après la mort, et l'embaumeur l'évacuait par lavage. Dans les crânes sans orifice d'évacuation, nous n'avons d'ailleurs pas retrouvé de fragment de cerveau. Dans quelques rares cas,

celui-ci avait séché et formait une galette ratatinée à l'arrière du crâne, dans la fosse occipitale (voir la figure 2). Exceptionnellement, l'embaumeur utilisait l'orbite gauche ou le trou occipital pour retirer le cerveau.

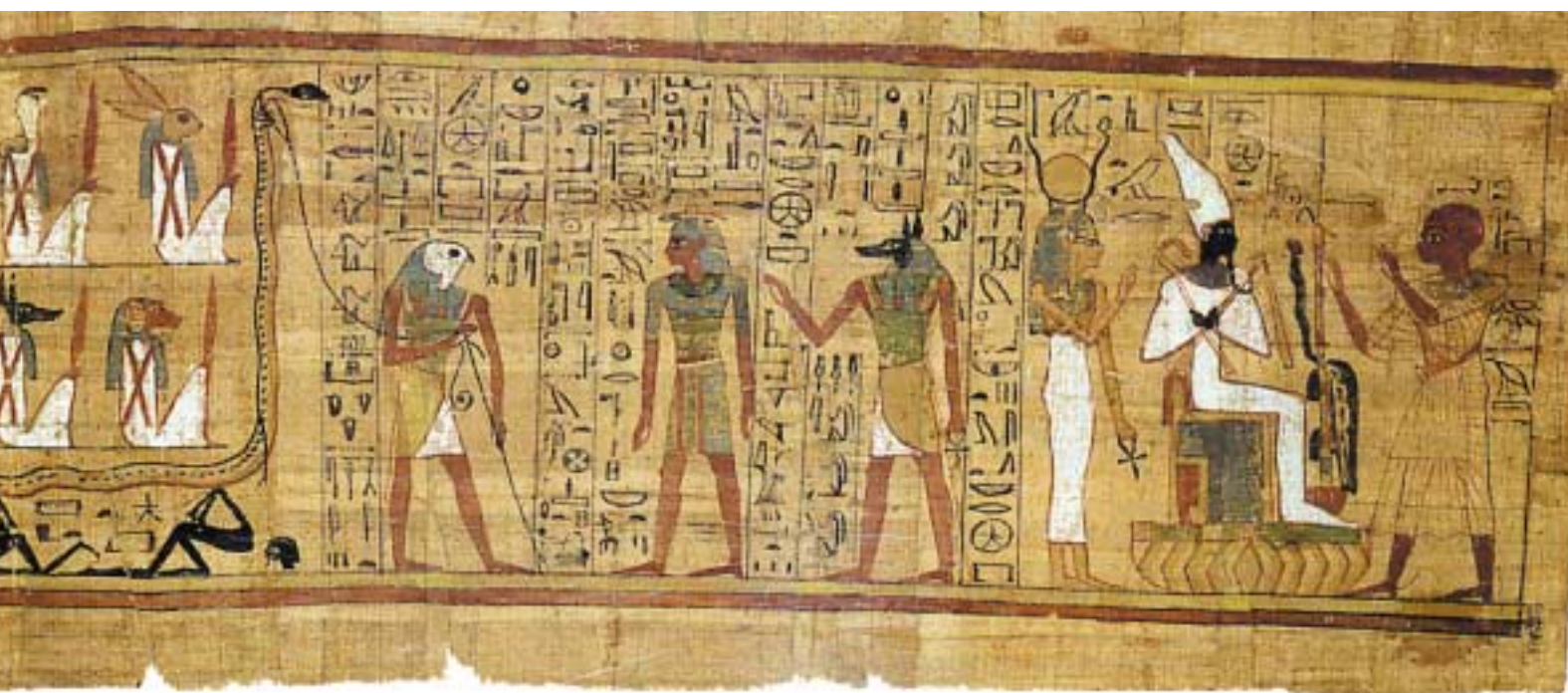
Les crânes de certaines momies contiennent du baume, qui forme une couche épaisse se prolongeant dans la nuque et le thorax. On pensait naguère qu'il servait à maintenir la tête attachée au reste du corps, mais l'observation des 13 crânes qui contenaient du baume (sur les 289 crânes dont l'état permettait une interprétation, parmi les restes des 1 100 personnes retrouvés dans la Vallée des Reines), montre que ce n'est pas toujours le cas. Seuls deux crânes présentaient des traces de baume autour du trou fait par l'embaumeur dans l'os ethmoïde, indiquant que celui-ci les avait peut-être remplis volontairement, à l'aide d'un entonnoir glissé dans la narine. Dans les onze autres, le baume n'était présent qu'au fond du crâne, dans la fosse occipitale. Sa surface formait un plan horizontal quand le corps reposait sur le dos. L'absence d'orifice d'extraction nasale dans deux des onze crânes confirme que le baume n'est pas entré par la narine. Après avoir enlevé les viscères du thorax, l'embaumeur y versait du baume qui coulait dans le cou, puis dans le crâne par le trou occipital.

Parfois, il s'infiltrait dans le tissu sous-cutané de la nuque.

Sur les radiographies des crânes des momies, on distingue parfois une masse opaque dans la fosse occipitale, souvent attribuée à une attache qui aurait maintenu la tête solidaire du tronc. Toutefois, chez les momies que nous avons étudiées, nous n'avons trouvé aucune attache : l'opacité éventuelle résulte de la présence de baume dans le crâne, en provenance du thorax, ou du cerveau desséché, que nous avons retrouvé dans la moitié des crânes non éviscérés de Basse Époque.

L'ablation des viscères du thorax et de l'abdomen

La deuxième étape du travail de l'embaumeur consistait à retirer les organes du thorax et de l'abdomen. Sur les 224 troncs de momies étudiés (les momies interprétables parmi les 341 momies précédemment évoquées), les trois quarts étaient éviscérés. Pour retirer les viscères digestifs, l'embaumeur ouvrait la cavité abdominale en pratiquant une incision, soit en biais dans la fosse iliaque gauche, c'est-à-dire dans le creux du bassin, soit verticalement, au-dessus de l'emplacement précédent, soit sur le côté gauche de l'abdomen (l'incision n'était alors visible que si l'on soulevait le



per les cadavres dans ce baume, qui assurait leur conservation. Le noir était la couleur d'Osiris, dieu des morts et du recommencement, représenté à l'extrémité droite du papyrus, avec une mitre

blanche. Lorsque la momie baignait dans le baume, elle se colorait en noir. Ce faisant, elle se métamorphosait symboliquement en Osiris et atteignait comme lui la vie éternelle.



MUSEE MACGREGOR

2. LES CRANES DES MOMIES n'ont pas toujours été vidés. À gauche, le schéma indique l'emplacement de l'os ethmoïde (en vert), que l'embaumeur perforait parfois en introduisant un couteau dans la narine, pour pratiquer une ouverture dans la boîte crânienne et en retirer le cerveau liquéfié par lavage. Quand l'embaumeur laissait le cerveau en place, celui-ci se desséchait et formait une galette ratatinée dans

la fosse occipitale (en rouge) ou tombait en poussière. Au centre, la fosse occipitale de ce crâne de momie décalotté, vu du dessus, contient du baume noir. L'embaumeur remplissait le thorax de ce baume, qui coulait dans le cou, puis dans le crâne par le trou occipital. À droite, cette radio d'un crâne de momie présente une masse sombre dans la fosse occipitale : elle correspond à du baume.

bras du cadavre). Dans les deux premiers cas, l'embaumeur devait placer le cadavre sur une table basse et soulever la paroi abdominale à l'aide d'un outil écarteur pour introduire son bras dans le thorax, après l'effondrement du diaphragme. Dans le dernier cas, l'opération était plus facile. En plaçant le cadavre sur une table haute, l'embaumeur pouvait plonger son bras dans l'abdomen et le thorax jusqu'en haut des poumons, sans plier le coude. La position de l'incision devait dépendre de la hauteur de la table et des habitudes de l'embaumeur. Elle ne dépend pas de l'époque, car on retrouve les trois emplacements de l'incision à chaque période.

Hérodote avait distingué trois classes de momies en fonction du traitement réservé aux viscères : les momies éviscérées, les momies non éviscérées et les momies non éviscérées contenant des substances caustiques injectées par l'anus à l'aide d'une seringue. Nos observations confirment partiellement cette classification.

Parmi les momies étudiées, 80 pour cent étaient éviscérées ; dans certains cas, l'embaumeur avait partiellement extrait les viscères digestifs et, dans d'autres, il avait éliminé l'ensemble des organes du thorax et de l'abdomen. Au Nouvel Empire, l'embaumeur laissait le cœur en place, mais il le retirait souvent à la Basse Époque et durant la période romaine. Il remplissait les cavités du corps de sachets qui contenaient un mélange de substances miné-

rales, que nous avons analysées dans des échantillons prélevés sur une momie de Basse Époque et deux momies de la période romaine. L'embaumeur retirait ces sachets avant de passer à l'étape suivante de la momification, et il avait probablement oublié ceux d'où proviennent nos échantillons, qui étaient cachés dans des endroits peu accessibles du corps. Le mélange contenait trois substances : du sable (plus de 30 pour cent), de l'albâtre gypseux (contenant du sulfate de calcium) et du natron : des sédiments composés de chlorure de sodium, de carbonate de sodium, de bicarbonate de sodium et de sulfate de sodium, qui se déposent sur les rives des lacs, lorsque leur niveau a baissé, ou au fond, quand ils sont asséchés. Le natron a une composition qui dépend de sa provenance, mais, dans tous les cas, il desséchait les organes, jusqu'à les réduire parfois en poussière. Le cadavre perdait aussi ses graisses, parce que celles-ci, en réagissant avec le natron, se transformaient en savon. Celui-ci était ensuite éliminé par lavage.

Quand l'embaumeur ne retirait pas les viscères, il éliminait les liquides engendrés par la décomposition du cadavre en plaçant une masse de baume de plusieurs kilogrammes sur l'abdomen. Nous avons retrouvé celle-ci à même la peau, sous les linceuls.

Enfin, la méthode qui faisait usage des substances caustiques est absente du groupe de momies que nous avons étudiées.

Insectes et momies

Combien de temps la préparation de la momie durait-elle ? Les textes anciens ne s'accordent pas. Hérodote parle de 70 jours : «Après quoi, ils salent le corps en le couvrant de natron pendant 70 jours ; ce temps ne doit pas être dépassé. Les 70 jours écoulés, ils lavent le corps et l'enveloppent tout entier de bandes découpées...» L'historien grec Diodore de Sicile, du I^{er} siècle avant notre ère, parle de «30 jours pour la durée des soins à donner à tout le corps». Dans la Genèse, «Joseph ensevelit son père en le préparant en 40 jours et il le pleura pendant 70 jours».

Nous avons estimé la durée de préparation des momies à l'aide de résultats obtenus par la médecine légale, qui distingue huit vagues successives d'insectes envahisseurs de cadavres après la mort. En effet, nous avons retrouvé les traces de deux sortes d'insectes englués dans les baumes des momies : des enveloppes chitineuses (ou pupes) vides de larves de diptères (sortes de mouches) du genre *Calliphora* et des dermestes (des petits coléoptères) du genre *Frischi Kugelman*.

Les diptères *Calliphora* constituent la première escouade d'insectes. Ils envahissent le cadavre dans les 24 premières heures après la mort. Toutes les pupes découvertes étant vides, ils ont eu le temps d'envahir le cadavre et de pondre des œufs qui sont devenus adultes. La deuxième escouade de diptères était absente à cause de

l'ablation ou de l'assèchement des viscères, dont seule la putréfaction attire ces insectes. En revanche, nous avons retrouvé des traces de la troisième escouade : des dermestes nécrophages qui avaient été attirés par la peau et par les muscles desséchés. Dès leur apparition, l'embaumeur savait qu'il devait passer à l'étape suivante de la momification : il retirait le natron et lavait le corps, évacuant ainsi les dermestes et les pupes vides (nos prélèvements correspondent aux pupes et aux dermestes qui n'avaient pas été enlevés par lavage), puis il enduisait le corps de baume.

D'après ces observations, le corps restait dans le natron pendant toute la durée du cycle de croissance des diptères *Calliphora*, c'est-à-dire en moyenne 40 jours. Les dermestes indiquent seulement que le corps était desséché, mais ils ne révèlent pas combien de temps il avait mis pour atteindre cet état. Les 70 jours mentionnés par Hérodote représentent probablement le temps nécessaire à l'ensemble des opérations de préparation de la momie jusqu'à son inhumation, 70 jours après la mort. Cette période correspond aux sept décans du calendrier égyptien liés à la mort et à la renaissance d'Osiris.

Préparation des cavités et de la peau

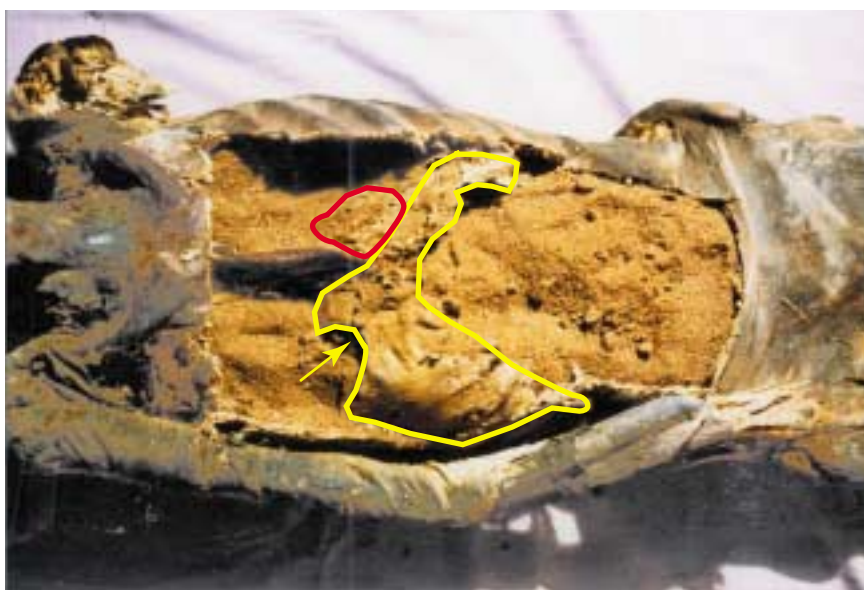
Après avoir retiré le natron du cadavre, l'embaumeur traitait les cavités et la peau avec un même baume, selon des méthodes qui ont évolué au cours du temps. Au Nouvel Empire, il employait un baume qui donnait à la peau une teinte rougeâtre. Il bourrait les cavités d'une masse compacte de tissus de lin, pour que la momie conserve sa forme humaine, et plaçait les viscères dans des vases qui accompagnaient le défunt. À la Basse Époque, la peau des momies allait du blanc orangé au rouge noirâtre, selon la composition des baumes. L'embaumeur remplissait les cavités de morceaux de tissu lâches et de sciure de bois (voir la figure 3). Il déposait les paquets de viscères enveloppés de linges sur le ventre ou entre les jambes. À la période romaine, le baume le plus utilisé (présent dans 94 pour cent des momies étudiées) était noir (voir la figure 4). Il servait à remplir la cavité thoraco-abdominale et à protéger la peau, même en l'absence d'éviscération.

D'après nos observations, chaque repli de peau est recouvert de baume :

l'embaumeur immergeait probablement le corps dans un bain de baume plutôt qu'il ne le badigeonnait avec des brosses ou ne l'aspergeait, ce qui n'aurait pas donné un tel résultat. En outre, deux illustrations antiques soutiennent notre hypothèse : une scène iconographique du chapitre 126 du *Livre des morts* (le livre avec lequel les Égyptiens enterraient leurs morts), où le «Lac de Feu» apparaît comme une cuve chauffée par le dessous, et le papyrus de Benkemnout, où quatre cadavres noirs baignent dans une cuve (voir la figure 1).

Le corps était ensuite égoutté et déposé sur un lit en bois, dont les

traces sont parfois visibles sur le dos de la momie. L'embaumeur plaçait le corps sur le côté droit et versait du baume dans l'abdomen. Il devait maîtriser la température du baume : quand celui-ci n'était pas assez chaud, il n'était pas suffisamment fluide pour pénétrer dans la totalité des cavités ; quand il l'était trop, il risquait de carboniser les tissus. Entre ces deux extrêmes, nous avons observé les indices de différentes températures du baume : une couche épaisse semblable à de la pierre ponce (baume très chaud), une masse vitrifiée (baume moins chaud), une masse pâteuse (baume encore moins chaud).



3. DU BAUME NOIR contenant quelques fragments de viscères remplit l'abdomen de cette momie de la période romaine (*en haut*). Une boule de tissu obstrue l'ouverture que l'embaumeur avait pratiquée dans le flan pour retirer les viscères. Le cœur, toujours en place, est la masse triangulaire grise entre les côtes. En bas, de la sciure de bois et du tissu remplissent l'abdomen de cette momie de la Basse Époque. L'embaumeur avait perforé (*flèche jaune*) le diaphragme, délimité par le trait jaune, pour enlever les viscères du thorax. Le cœur, délimité par le trait rouge, est toujours en place.

Avant d'obturer l'orifice abdominal avec un linge roulé en boule (voir la figure 3), l'embaumeur y plaçait des fragments de viscères trempés dans le baume et malaxés pour former un ou plusieurs cylindres de dix centimètres de longueur. Nous en avons retrouvé un à six dans 74 pour cent des momies étudiées. Les momies qui renfermaient quatre cylindres ne représentaient que 29 pour cent des cas. Pourtant, le nombre 4 intervient souvent dans les rituels liés à la mort : il correspond notamment aux quatre paquets de viscères, déposés dans les quatre vases canopes à l'effigie des fils d'Horus, au Moyen Empire.

L'étude chimique des baumes

Quelle était la nature des baumes ? Encore aujourd'hui, les revues et les livres qui les mentionnent sont imprécis. Par exemple : «On prend l'habitude d'enduire le corps d'une substance noirâtre, luisante comme de la poix [...] désignée sous le vocable de "bitume", bien

que ce produit puisse avoir une composition chimique variable» ; «Certains sarcophages sont également badigeonnés de noir, mais il n'est pas sûr qu'il s'agisse de la même substance [...] Peut-être s'agit-il d'un vernis ne noircissant qu'avec le temps» ; «Le produit responsable de la couleur noire dont la nature chimique et la provenance sont encore discutées [...]. Certains auteurs considèrent qu'il s'agit de bitume que l'on ferait venir de la mer Morte, alors que d'autres pensent qu'il s'agit de produits végétaux dont la couleur noire serait due à des transformations chimiques survenant au cours du temps» (*Les momies et la mort en Égypte*, par Françoise Dunand et Roger Lichtenberg, Éditions Errance, 1998) ; «Les cavités sont embaumées avec des toiles imbibées de résines aromatiques comme la myrrhe et la cinnamome» (numéro hors série d'*Historia*, avril 1999).

Ces citations révèlent les doutes des égyptologues sur la composition chimique des baumes. Nombre de spécialistes se réfèrent encore à *Ancient Egyptian Materials and Industries* («Matériaux et industries de l'Égypte ancienne») de John Harris et Alfred Lucas, publié en 1926 (remis à jour pour la dernière fois en 1962 et réédité en 1989). Toutefois, Harris et Lucas ne disposaient pas de méthodes d'analyses chimiques fines pour identifier les baumes. Depuis plus de dix ans, nous analysons la composition chimique des baumes. Ce travail a débouché sur l'identification des ingrédients employés pour les préparer.

Nous avons prélevé des échantillons sur de nombreuses momies de plusieurs musées (musée Guimet de Lyon, musée d'Hildesheim et vases canopes du musée Kestner en Allemagne, Musée d'anthropologie et d'ethnographie de Turin, Musée national de Varsovie) avant de travailler sur 12 momies de la Vallée des Reines, parmi celles décrites précédemment. Les résultats qui suivent représentent la synthèse des connaissances acquises sur ce vaste ensemble de momies datant de la troisième période intermédiaire, de la Basse Époque et de la période romaine (de 1000 avant notre ère à 400 de notre ère). À des époques plus anciennes, les recettes des baumes n'étaient probablement pas les mêmes.

Pour analyser les baumes, nous avons employé des techniques qui n'existaient pas il y a 30 ans, quand on a voulu déterminer leur composition chimique. Aujourd'hui, elles sont utilisées dans la géochimie organique pétrolière, notre domaine d'expertise. Nous avons trié par familles les molécules présentes dans les baumes, grâce à des méthodes variées, telles l'extraction et la précipitation par des solvants, la chromatographie en phase liquide ou gazeuse. Dans cette dernière technique, on injecte le mélange de molécules à séparer (sous forme liquide ou gazeuse) dans une colonne emplie de «billes» qui ralentissent l'écoulement ; les billes sont recouvertes de molécules qui se lient à certains composants des mélanges à séparer. Ainsi, les billes freinent plus ou moins le passage des divers composants des mélanges dans la colonne, si bien qu'ils sortent à des temps différents, ce qui les sépare les uns des autres. Nous analysons les fractions ainsi obtenues par spectrométrie de masse, afin de déterminer la nature exacte des molécules qu'elles contiennent : les composés chimiques sont bombardés par des électrons qui les dissocient en fragments en les ionisant. Puis les ions formés passent dans un

La momification selon Hérodote

Au ^{ve} siècle avant notre ère, l'historien grec Hérodote avait décrit les étapes de la momification : «Voici leurs deuil et leurs cérémonies funébres [...]. Cela fait, on emporte le corps pour le faire embaumer. Il y a des gens spécialement chargés de ce travail et dont c'est le métier. Quand on leur apporte un mort, ils montrent à leurs clients des maquettes de cadavres, en bois, peintes avec une exactitude minutieuse. Le modèle le plus soigné représentent, disent-ils, celui dont je croirais sacrilège de prononcer le nom en pareille matière ; ils montrent ensuite le second modèle, moins cher et moins soigné, puis le troisième, qui est le moins cher de tous. Après quoi, ils demandent à leurs clients de choisir le procédé qu'ils désirent voir employer pour leur mort. La famille convient du prix et se retire ; les embaumeurs restent seuls dans leur atelier et voici comment ils procèdent à l'embaumement le plus soigné : tout d'abord, à l'aide d'un crochet de fer, ils retirent le cerveau par les narines ; ils en extraient une partie par ce moyen et le reste en injectant certaines drogues dans le crâne. Puis avec une lame tranchante en pierre d'Éthiopie, ils font une incision le long du flan, retirent tous les viscères, nettoient l'abdomen et le purifient avec du vin de palmier et, de nouveau, avec des aromates broyés. Ensuite, ils remplissent le ventre de myrrhe pure broyée, de cannelle et de toutes substances aromatiques qu'ils connaissent, sauf l'encens, et le recousent. Après quoi, ils salent le corps en le couvrant de natron pendant 70 jours ; ce temps ne doit pas être dépassé. Les 70 jours écoulés, ils lavent le corps et l'enveloppent tout entier de bandes découpées dans un tissu de lin très fin et enduites de la gomme dont les Égyptiens se servent d'ordinaire au lieu de colle [...].

Pour qui demande l'embaumement à prix moyen et ne veut pas trop dépenser, voici leur méthode : les embaumeurs chargent leur seringue d'une huile extraite du cèdre et emplissent de ce liquide le ventre du mort, sans l'inciser et sans retirer les viscères ; après avoir injecté le liquide par l'anus, en l'empêchant de ressortir, ils salent le corps pendant le nombre de jours voulu. Le dernier jour, ils laissent sortir de l'abdomen l'huile qu'ils avaient introduite ; ce liquide a tant de force qu'il dissout les intestins et les viscères et les entraîne avec lui. De son côté le natron dissout les chairs et il ne reste que la peau et les os du cadavre. Après quoi, les embaumeurs rendent le corps sans lui consacrer plus de soins.

Voici la troisième méthode d'embaumement, pour les plus pauvres : on nettoie les intestins avec de la syrmia, on sale le corps pendant les 70 jours prescrits, puis on le rend aux parents qui l'emportent.»

Euterpe (traduction par Barguet)



YOUTUBE MUSEE

4. CES MOMIES D'EPOQUE ROMAINE sont respectivement colorées en noir et en rouge par deux baumes de compositions différentes : elles montrent la diversité des recettes employées par les embaumeurs égyptiens.

champ magnétique qui les dévie plus ou moins en fonction de leur masse. Les spectres de masse sont caractéristiques des molécules de départ.

Cependant, à l'échelle moléculaire, les baumes sont des mélanges complexes. Afin d'interpréter les spectres et de reconnaître la signature chimique des différents ingrédients des baumes, nous avons d'abord analysé un ensemble assez large de produits naturels susceptibles d'avoir servi à les fabriquer, notamment des résines de conifères (cèdre, pin parasol, pin maritime, pin d'Alep, sapin, mélèze), des goudrons de pins et de bouleau (obtenus par pyrolyse du bois ou de son écorce), des résines de térébinthe (un pistachier), de la myrrhe, de l'encens, de la cire d'abeille, des bitumes provenant de plusieurs sources.

En comparant les spectres des baumes anciens et des produits naturels, nous avons découvert que les baumes contiennent des molécules d'acide abiétique, de rétène et de longifolène, présentes dans les résines et les goudrons de conifères. Ces deux types de produits sont les principaux constituants de la plupart des baumes.

Quels ingrédients ?

Nous n'avons pas identifié de résine de térébinthe (telle la résine de Chio, une île grecque), fréquemment citée dans les traductions de textes égyptiens. Les références à cette résine résulteraient d'une erreur de traduction : dans l'Antiquité, le mot romain de «térébinthe» ne désignait pas la résine de Chio, mais la résine de conifère.

Quoi qu'il en soit, la résine de conifères avait deux avantages. Elle assurait la bonne conservation des corps et fut employée pour cette propriété dès l'Ancien Empire. En outre, son prix était inférieur à celui des autres résines et gommes. Par exemple, la résine de Chio était dix fois plus chère que la résine de conifères. Son prix était voisin celui de la myrrhe et de l'encens.

Outre les molécules caractéristiques des résines et des goudrons de conifères, les baumes contenaient aussi des stéranes, du pristane, du phytane et des hopanes. Ce sont des «molécules fossiles» : elles résultent de la modification lente de restes d'organismes vivants dans les sédiments et sont absentes de la biosphère. Par exemple, les hopanoïdes, l'analogue du cholestérol pour

les micro-organismes, se transforment en hopanes. Les proportions des molécules fossiles dans les baumes analysés correspondent à celles du bitume de la mer Morte. Dès 1989, ces analyses ont prouvé que ce bitume était l'un des constituants des baumes. La même année, Jürgen Rullkötter, de l'Université d'Oldenbourg (Allemagne), et Arie Nissenbaum, de l'Institut Weizmann (Israël), avaient déjà publié des analyses chimiques qui prouvaient également la présence de bitume dans les baumes. L'incertitude qui demeurait dans la dernière édition d'*Ancient Egyptian Materials and Industries* était ainsi levée. Les auteurs, qui s'étaient appliqués à détruire toute preuve de la présence de bitume dans les baumes, ne se seraient peut-être pas trompés s'ils avaient consulté les textes antiques : quand Cléopâtre voulut se passer des Nabatéens (ancien peuple de l'Arabie du Nord-Ouest), qui exportaient le bitume de la mer Morte vers l'Égypte, ceux-ci se vengèrent en incendiant la flotte égyptienne dans le port d'Alexandrie.

Le bitume était le deuxième constituant principal des baumes, après les résines et goudrons de conifères. Il représentait en moyenne cinq à dix

pour cent des baumes et exceptionnellement jusqu'à 30 pour cent. En général, ce bitume vient de la mer Morte. Cependant, nous avons trouvé du bitume qui semble venir de Hit, en Irak. Le bitume du Djebel Zeit, près de la mer Rouge (Égypte) et celui du Sinaï (Israël) ou du Yémen ont peut-être aussi servi à la confection des baumes.

Pourquoi les embaumeurs employaient-ils ce bitume coûteux ? Parce qu'il noircissait les momies. Le noir était la couleur d'Osiris, dieu des Morts et du Recommencement (voir la figure 1). Lorsque la momie prenait cette couleur, elle se métamorphosait symboliquement en Osiris et atteignait comme lui la vie éternelle.

D'après la présence dans les baumes de molécules de cérides, des molécules formées à partir d'acides gras qui constituent la cire d'abeille, celle-ci était souvent le troisième constituant principal des baumes. Les

embaumeurs s'en servait peut-être pour abaisser la température de fusion du baume et faciliter ainsi sa pénétration dans des endroits du corps difficiles d'accès, tels le crâne et l'abdomen. Cependant, l'utilisation de cire s'explique peut-être aussi par les croyances des Égyptiens qui lui attribuaient des pouvoirs magiques.

Enfin, les baumes contiennent des molécules de furanones, courantes dans les parfums, et de sesquiterpènes, des lipides présents surtout chez les plantes. Nous ignorons encore de quelles espèces de plantes ils proviennent.

Les baumes contiennent aussi des graisses. Quelques égyptologues ont mentionné la possibilité de contamination des baumes par la graisse de la momie elle-même. Nous avons écarté cette hypothèse, pour deux raisons : les acides gras précédemment mentionnés sont présents dans les baumes des bandelettes qui ne touchent pas

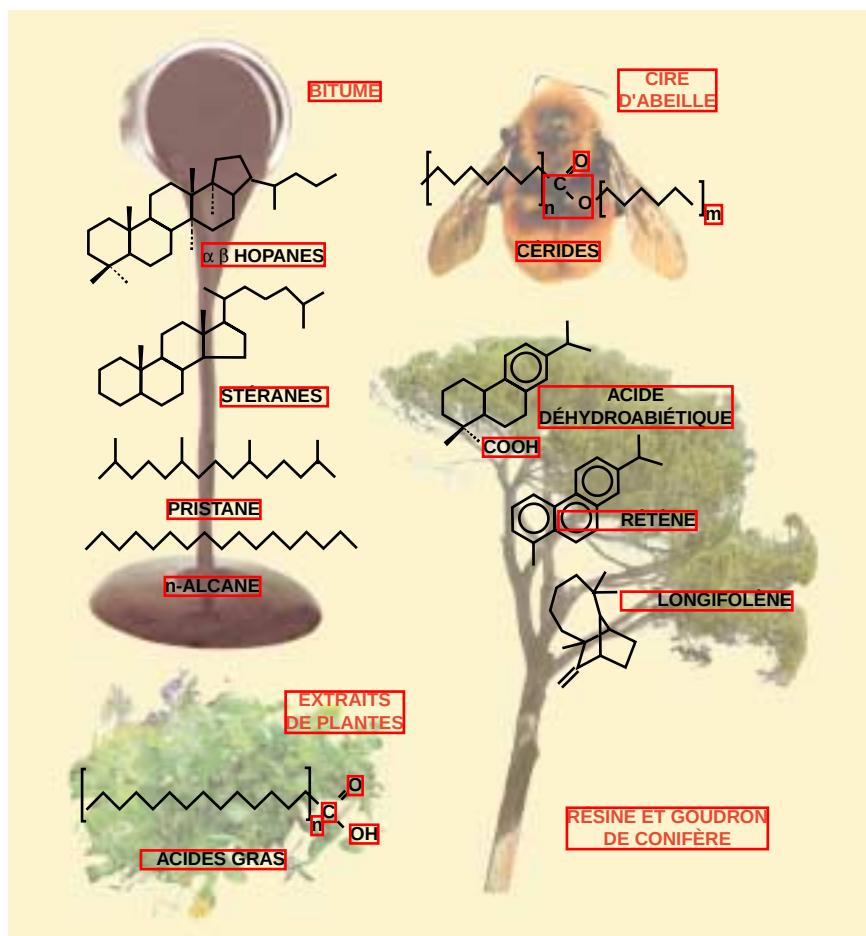
la momie ; en outre, le traitement au natron, qui précède l'application des baumes, transforme les graisses de la momie en savon.

Substances animales ou végétales ?

Les graisses étaient-elles d'origine animale ou végétale ? Les papyrus médicaux de l'Égypte ancienne rapportent que des graisses animales servaient à la confection de nombreux remèdes. Cependant, dans les baumes, nous avons surtout trouvé des acides gras légers (de six à dix atomes de carbone), présents dans les plantes. Étaient également présents des acides gras plus lourds (de 14 à 18 atomes de carbone, notamment l'acide stéarique et l'acide palmitique), mais ceux-ci sont présents dans le règne végétal comme dans le règne animal. Comment savoir leur provenance ? À cette fin, nous avons déterminé les proportions des atomes de carbone 12 et de carbone 13, dont les noyaux comportent respectivement six et sept neutrons, en plus de six protons. Ces analyses « isotopiques » indiquent que les acides gras des baumes seraient plutôt d'origine végétale : selon leur métabolisme, les plantes et les animaux s'enrichissent plus ou moins en carbone 12 ; les proportions mesurées dans les acides gras sont plutôt celles des plantes. En définitive, nous n'avons pas trouvé de preuve de l'emploi de graisses animales dans les baumes : les Égyptiens répugnaient peut-être à les utiliser étant donné qu'ils considéraient de nombreux animaux comme des dieux.

D'après l'ensemble de nos analyses, les proportions des quatre constituants principaux (résine et goudron de conifères, bitume, cire d'abeille et plantes) variaient beaucoup. Chaque constituant n'était pas systématiquement présent dans tous les baumes. Les recettes des embaumeurs n'étaient pas bien définies par les règles religieuses, et chacun faisait probablement avec ce qu'il avait.

D'après R. Evershed et ses collègues de l'Université de Bristol, avant cette Troisième Période intermédiaire, dont datent les plus anciennes momies que nous avons étudiées, au Moyen et au Nouvel Empire, les embaumeurs utilisaient surtout des gommes et résines. D'autres travaux convergents ont montré que les baumes de la momie de Ramsès II (Nouvel Empire) sont à base



5. LES BAUMES étaient composés de résine et de goudron de conifère, de bitume, de cire d'abeille et d'extraits de plantes. Grâce à l'analyse chimique des baumes, notamment par chromatographie et par spectrométrie de masse, on identifie les molécules qu'ils contiennent (on a représenté ici leur squelette carboné, les lettres *m* et *n* indiquant que les longueurs des chaînes sont variables). Par comparaison avec les analyses des substances naturelles susceptibles d'avoir servi à la préparation des baumes, on identifie leurs ingrédients.

de gomme adragante (extraite des tiges de l'astragale, un arbrisseau épineux). Cependant, les embaumeurs utilisaient déjà la résine de conifères du temps de la momie de Idu II, secrétaire général de l'office du commerce du bois de pin vers 2200 avant notre ère.

La préparation des baumes

Grâce aux analyses chimiques, nous avons pu appréhender certaines conditions de préparation et de conservation des baumes. La présence d'esters éthyliques d'acides gras, molécules formées par réaction de l'alcool éthylique avec les acides gras, indique que l'embaumeur devait utiliser du vin pour préparer les baumes. L'absence de craquage thermique intense (dissociation des molécules sous l'action de la chaleur) indique que la température du baume restait modérée (probablement inférieure à 200 °C), lors de sa préparation. L'embaumeur chauffait les ingrédients jusqu'à la température de fusion. En général, le baume des momies est très bien conservé, car il est protégé de tout contact avec l'atmosphère par les bandelettes. Toutefois, la présence de molécules issues de la dégradation thermique des hydrocarbures, sur l'une des momies, indique qu'elle a atteint une température de plusieurs centaines de degrés, confirmant ainsi l'hypothèse d'un incendie, allumé dans la tombe par des pillards.

Aujourd'hui, on connaît les grandes lignes de la composition chimique des baumes, ainsi que leurs principaux ingrédients. Pourtant, certains égyptologues continuent d'employer indifféremment les termes «baume»,

«bitume», «asphalte», «résine», «gomme» pour désigner les produits utilisés par les embaumeurs. Ces termes trop précis ne correspondent pas aux résultats des analyses, qui établissent définitivement que les baumes sont des mélanges de résine et de goudron de conifère, de bitume, de cire d'abeille et d'extraits de plantes. On ne devrait utiliser que le terme «baume», qui évoque le matériau préparé par les embaumeurs, mais ne préjuge en rien de sa composition chimique.

La chimie des baumes ne nous a pas encore livré tous ses secrets. Récemment, nous avons différencié la signature chimique de la résine brute (la gemme) et du goudron de conifère (la poix) en étudiant des calfatages de bateaux de l'époque gallo-romaine (du I^{er} siècle avant notre ère au III^e siècle de notre ère). Nous pourrions utiliser ce résultat pour parfaire notre connaissance des baumes.

Reste également à déterminer les plantes dont les embaumeurs utilisaient les extraits. La chimie des parfums devrait nous y aider.

Enfin, nous projetons de déterminer les proportions des ingrédients déjà identifiés, autres que le bitume, pour lequel nous connaissons les quantités utilisées. Cette tâche requiert l'analyse des étalons de chaque ingrédient, dont la composition varie suivant sa provenance. Au total, le nombre de références à accumuler et à comparer aux analyses des baumes est de plus en plus volumineux au fur et à mesure du progrès des connaissances, ce qui laisse encore beaucoup de travail avant que nous puissions répondre à toutes les questions que posent les baumes.

Jacques CONNAN est directeur de recherche associé au Laboratoire des substances naturelles de Strasbourg (CNRS) et expert international en géochimie organique à *Totalfina Elf* (Pau). André MACKE est médecin, spécialiste en radiologie et en imagerie médicale. Christiane MACKE-RIBET, aujourd'hui décédée, était médecin. A. Macke et Ch. Macke-Ribet ont collaboré avec l'Institut d'égyptologie thébaine du Louvre (CNRS) et le Centre d'études et de documentation sur l'Ancienne Égypte.

F. DUNAND et R. LICHTENBERG, *Les momies et la mort en Égypte*, Éditions Errance, 1998.

A. MACKE, Ch. MACKE-RIBET et J. CONNAN, *Ta Set Neferou. Une nécropole de Thèbes-Ouest : momification, chimie des baumes, anthropologie, paléopathologie*, Nubar Printing House, Le Caire (à paraître).

A. MACKE et Ch. MACKE-RIBET, *Intérêt de l'entomologie pour préciser le déroulement de l'embaumement en Égypte ancienne ou la médecine légale au secours d'Hérodote*, in *Journal de médecine légale, Droit médical*, n° 37, pp. 495-503, 1994.

M. MORCELLET, A. MACKE et Ch. MACKE-RIBET, *Étude des composés utilisés pour «dessécher» les momies*, in *Memnonia*, vol. VIII, pp. 97-210, 1997.

Cytokines et sensibilité aux maladies

DOMINIQUE ÉMILIE • MARC HUMBERT • PIERRE GALANAUD

Lors d'une infection, des molécules libérées par le système immunitaire détruisent l'intrus. Quand la réaction de défense s'emballe et que les cytokines sont trop abondantes, elles créent des lésions. De nouvelles substances les inhibent spécifiquement, soulageant ainsi des maladies chroniques invalidantes.

Le système immunitaire préserve l'intégrité des personnes face à leur environnement : son rôle est primordial dans les mécanismes de défense contre les agents infectieux ou parasitaires. Il prévient aussi certains désordres internes, notamment en détruisant les cellules tumorales. Ces combats permanents sont rigoureusement contrôlés, car ils ne doivent pas se retourner contre la personne elle-même. L'intensité des réactions immunitaires doit être ajustée – intense pour l'élimination de l'intrus, mais pas trop pour que la personne elle-même soit épargnée ; elle doit être spécifique – la réaction est dirigée exclusivement contre les intrus, mais pas contre les molécules propres à l'organisme, et adaptée, car la protection n'est pas assurée de la même façon selon l'agent pathogène.

La première phase de toute réaction immunitaire est celle de la reconnaissance et de la présentation au système immunitaire des antigènes des intrus, dont se chargent les cellules présentatrices d'antigènes. Dès qu'un antigène étranger est reconnu, ces cellules «avalent» les protéines étrangères, les découpent en fragments qu'elles exposent à leur surface. Puis la réaction de défense s'amplifie, les lymphocytes T auxiliaires attirant les différents acteurs de la défense à l'endroit où l'agent pathogène a été localisé. Après la phase de reconnaissance et celle d'amplification, la troisième phase est celle de l'élimination de l'intrus. Plusieurs acteurs interviennent, notamment les lymphocytes B produisant des anticorps

qui se lient aux antigènes étrangers et empêchent, par exemple, les bactéries de se fixer sur de nouvelles cellules et de les infecter ; des lymphocytes T cytotoxiques qui libèrent des enzymes destructrices ; des macrophages qui éliminent les cellules infectées. Les réactions des différents partenaires sont rigoureusement coordonnées. Les cellules échangent des signaux de régulation, soit par contacts intercellulaires directs (des molécules exprimées à la surface d'une cellule interagissent directement avec des récepteurs présents à la surface d'une autre), soit par des médiateurs solubles, libérés par les cellules dans le milieu environnant : ce sont les cytokines.

Des dizaines de fantassins

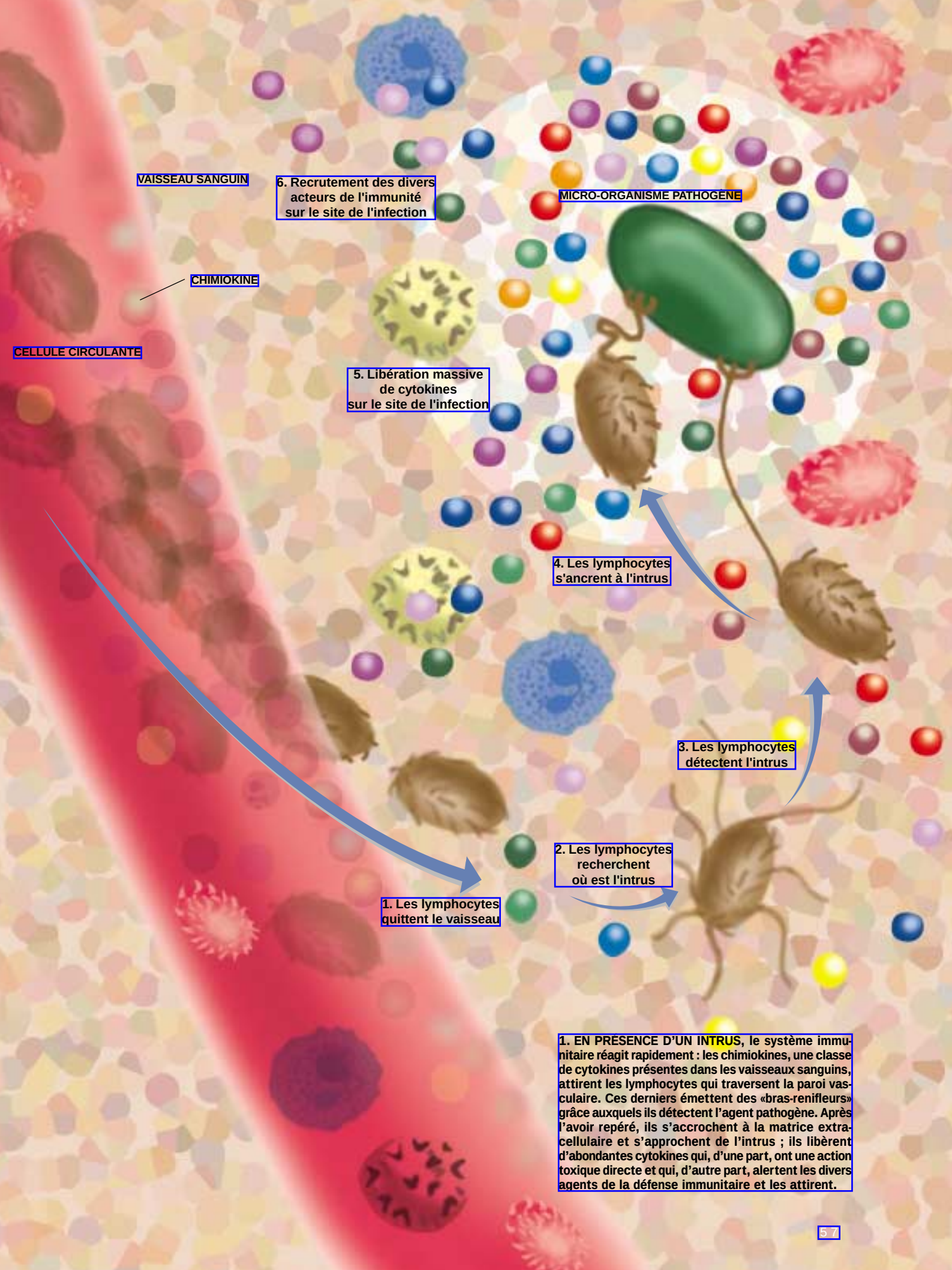
Les cytokines sont des agents essentiels du système immunitaire. La première cytokine, l'interleukine 1, a été découverte en 1981 ; aujourd'hui, on en connaît une cinquantaine, et l'armée des cytokines est répartie en cinq bataillons selon leur fonction biologique : les interférons, dont la principale action est l'inhibition de la réplication virale dans des cellules infectées ; les interleukines, qui assurent les échanges d'informations entre les globules blancs ; les facteurs de croissance hématopoïétiques, qui stimulent la production de cellules du système sanguin. Le quatrième bataillon, celui des facteurs de croissance, contrôle la formation et l'entretien du tissu conjonctif. Enfin, les

chimiokines participent aux phénomènes de migration des leucocytes (les diverses classes de globules blancs, notamment les lymphocytes, les monocytes, les macrophages, les polynucléaires).

Cette classification est imparfaite, car certaines cytokines ont des actions qui les classent dans plusieurs familles ; de plus, certaines cellules étrangères au système immunitaire peuvent aussi produire des interleukines, et certaines interleukines agissent sur des cellules qui n'appartiennent pas au système immunitaire ! Interférons, interleukines et chimiokines sont les principales cytokines des réactions immunitaires.

Les cellules immunitaires au repos ne produisent généralement pas de cytokines ; elles n'en produisent qu'après avoir été activées, en général par l'agent pathogène. Elles agissent seulement dans l'environnement immédiat des cellules qui les produisent. Ainsi, lors d'une réaction immunitaire, seules quelques cellules immunitaires produisent, localement, des cytokines. Cela limite la réaction immunitaire dans le temps et dans l'espace, l'efficacité étant alors optimisée, et les effets délétères pour l'organisme minimisés.

Les cytokines agissent par l'intermédiaire de récepteurs cellulaires constitués de deux sous-unités (des protéines), l'une fixant la cytokine et l'autre assurant la transduction du signal d'activation vers l'intérieur des cellules. Ces récepteurs sont portés par les cellules du système immunitaire. Les interleukines sont regroupées en plusieurs



VAISSEAU SANGUIN

6. Recrutement des divers acteurs de l'immunité sur le site de l'infection

MICRO-ORGANISME PATHOGENE

CHIMIOKINE

CELLULE CIRCULANTE

5. Libération massive de cytokines sur le site de l'infection

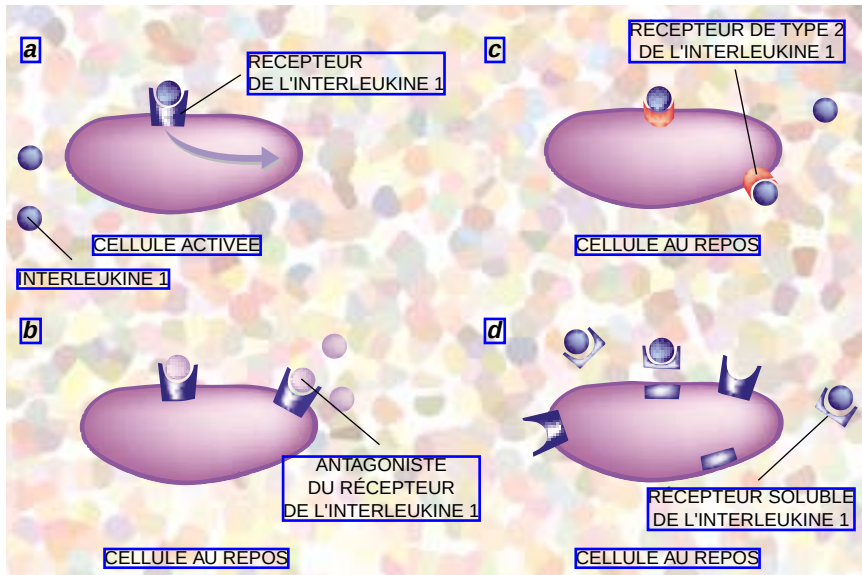
4. Les lymphocytes s'ancrent à l'intrus

3. Les lymphocytes détectent l'intrus

2. Les lymphocytes recherchent où est l'intrus

1. Les lymphocytes quittent le vaisseau

1. EN PRÉSENCE D'UN INTRUS, le système immunitaire réagit rapidement : les chimiokines, une classe de cytokines présentes dans les vaisseaux sanguins, attirent les lymphocytes qui traversent la paroi vasculaire. Ces derniers émettent des « bras-renifleurs » grâce auxquels ils détectent l'agent pathogène. Après l'avoir repéré, ils s'accrochent à la matrice extracellulaire et s'approchent de l'intrus ; ils libèrent d'abondantes cytokines qui, d'une part, ont une action toxique directe et qui, d'autre part, alertent les divers agents de la défense immunitaire et les attirent.



2. PLUSIEURS MECANISMES DE REGULATION contrôlent l'action des cytokines : normalement, l'interleukine 1 se fixe sur son récepteur, qui active une cascade de réactions, aboutissant à la libération de diverses cytokines (a). Un antagoniste de l'interleukine peut prendre la place de l'interleukine sur son récepteur, mais ne transmet aucun signal au cœur de la cellule (b). L'interleukine peut se fixer sur un autre récepteur, nommé le récepteur de type 2 de l'interleukine, qui ne transmet aucun signal d'activation (c). Enfin, l'interleukine peut aussi se lier à un autre type de récepteur qui a la propriété de se détacher de la cellule et de devenir soluble dans le sang : désolidarisé de la cellule qui le portait, il ne transmet plus aucun signal (d).

classes selon la chaîne de transduction qu'elles utilisent, car des signaux transmis par des voies identiques ont des chances d'avoir des conséquences voisines, ce qui explique la redondance des effets de certaines cytokines. Ainsi, l'interleukine 2 et l'interleukine 15 ont des effets proches. Cette organisation engendre parfois des phénomènes de compétition : l'interleukine 4 peut occuper une région du récepteur où l'interleukine 2 peut normalement se fixer, empêchant toute action de cette dernière.

Le monde des cytokines est foisonnant, et leurs récepteurs sont redondants. Toutefois, cette complexité n'est qu'apparente, car il n'existe pas une seule réaction immunitaire, mais plusieurs, qui diffèrent selon l'agent pathogène : dans une situation particulière, toutes les cytokines n'interviennent pas. Certaines de celles qui sont libérées ont une action spécifique et indispensable à la réaction : par exemple, l'interféron gamma est nécessaire à l'activation des macrophages et à la destruction des micro-organismes qui se développent dans les cellules, parce qu'il active la synthèse d'une enzyme qui inhibe la production des ARN messagers viraux, des molécules indispensables à la formation de nouvelles particules virales. Les cytokines doivent être très efficaces localement et

rester concentrées sur le site de l'inflammation. Elles sont contrôlées par d'autres cytokines qui ont un rôle global et modulent les équilibres immunitaires et inflammatoires des réactions en cours.

Les réactions inflammatoires, c'est-à-dire l'accumulation des cytokines qui activent le système immunitaire, sont indispensables aux réactions de défense, parce qu'elles attirent, sur le site agressé, les acteurs de la riposte. Toutefois, l'objectif ne doit pas être dépassé, au risque que la réaction ne devienne délétère et qu'elle n'entraîne des séquelles, telles des nécroses locales, voire globales. Sur le site de la réaction immunitaire, des cytokines inflammatoires sont produites et activent l'endothélium, attirant des cellules immunitaires qui circulent dans le sang. Les principales cytokines inflammatoires sont l'interleukine 1 et le TNF alpha (le facteur nécrosant des tumeurs, qui appartient à la famille des interleukines). Compte tenu des effets délétères potentiels de ces deux substances, ce système qui active l'inflammation est en permanence équilibré par divers systèmes antagonistes.

Parmi les antagonistes de l'interleukine 1 figure une autre cytokine, l'antagoniste du récepteur de l'interleukine 1. Cet antagoniste ressemble à l'interleukine 1 (on dit qu'ils ont

une homologie de séquence élevée), de sorte qu'il se fixe précisément sur le récepteur de l'interleukine 1. Il prend la place de l'interleukine 1 sur son récepteur, mais cet antagoniste n'active pas le récepteur.

Le récepteur de type 2 de l'interleukine 1 est un autre système antagoniste de cette cytokine. Ce récepteur agit comme un leurre, car il peut fixer l'interleukine 1 sans transmettre le signal activateur vers la cellule. Selon la quantité de récepteurs de type 1 et de type 2 qu'elles portent, les cellules sont ou non activées par l'interleukine 1.

Enfin, les récepteurs solubles représentent un troisième système antagoniste. Les cellules exprimant à leur surface des récepteurs de l'interleukine de type 1 peuvent libérer, à la suite d'un clivage enzymatique, la protéine membranaire. Ces récepteurs devenus solubles gardent leur capacité de fixer leur ligand naturel, l'interleukine 1. En revanche, comme ils sont solubles, ils n'activent plus les cellules. Ce sont des antagonistes en compétition avec les récepteurs membranaires. Ainsi, toute circonstance qui entraîne un excès d'antagoniste du récepteur de l'interleukine 1 (par rapport à l'interleukine elle-même), de récepteur de type 2 (par rapport au type 1) et de la forme soluble du récepteur de type 1 (par rapport à la forme membranaire) aboutit à une inactivation de la voie de l'interleukine 1 (voir la figure 2).

Le choc septique : un orage cytokinique

Le cas de l'interleukine 1 reflète la multitude des mécanismes de rétroaction élaborés au cours de l'évolution pour le contrôle de l'efficacité des mécanismes inflammatoires. Contrairement aux cytokines, qui agissent localement, plusieurs des systèmes antagonistes, (par exemple, les récepteurs solubles) diffusent dans tout l'organisme : même lorsque la réaction inflammatoire est intense, elle reste localisée sur le site de production des cytokines inflammatoires, tandis que les composantes anti-inflammatoires l'emportent à distance. Dans certaines situations pathologiques, le choc septique notamment, cet équilibre à distance est rompu, les substances inflammatoires diffusent dans tout l'organisme, ce qui explique la défaillance de nombreux organes.

Dans le cas d'une infection aiguë grave, par exemple lors d'infections

généralisées (les septicémies), de méningites ou de péritonites (des infections graves, localisées dans la cavité abdominale), la quantité de cytokines inflammatoires – notamment d'interleukine 1 et de TNF alpha – qui se déverse brusquement dans le sang est telle que les systèmes de neutralisation de ces cytokines sont saturés. L'effet activateur des cytokines inflammatoires sur l'endothélium, qui devrait normalement se limiter au site de production, diffuse dans tout l'organisme.

Les vaisseaux sanguins se relâchent brusquement, subissant une vasodilatation, car, sous l'action des cytokines inflammatoires TNF alpha et interleukine 1, les parois vasculaires libèrent des substances vasodilatatrices, notamment du monoxyde d'azote, NO ; la perméabilité des vaisseaux augmente, de sorte que le liquide qu'ils contiennent fuit vers l'espace extravasculaire. La vasodilatation aiguë et la fuite liquidienne entraînent une baisse brutale de la pression artérielle ; les tissus, notamment les reins et le cerveau, ne sont plus assez oxygénés, le débit urinaire diminue et des troubles de la conscience apparaissent. L'oxygénation insuffisante des tissus se manifeste également sur la peau, qui devient bleutée dans les zones normalement les moins vascularisées, c'est-à-dire les genoux, les mains, les pieds, les ailes du nez et les lèvres ; les personnes en état de choc septique ont une coloration marbrée caractéristique.

Dans les poumons, le liquide qui quitte les vaisseaux sanguins s'accumule, créant un œdème pulmonaire ; les alvéoles pulmonaires sont envahies par ce liquide, ce qui perturbe les échanges gazeux, aggravant d'autant la mauvaise oxygénation des tissus. L'activation anarchique de l'endothélium déclenche également une coagulation disséminée dans tous les petits vaisseaux de l'organisme (les cellules endothéliales activées par le TNF synthétisent des facteurs de coagulation) ; les capillaires sont obstrués, et les tissus environnants ne sont plus oxygénés.

Enfin, les cytokines inflammatoires ont une toxicité directe sur le cœur, car elles diminuent la force contractile du muscle cardiaque. Le cœur ne parvient pas à compenser la chute de la pression artérielle, et le débit cardiaque diminue, ce qui aggrave la baisse de la tension artérielle et le manque d'oxygénation des tissus. Pourtant, si le TNF est délétère quand il se répand

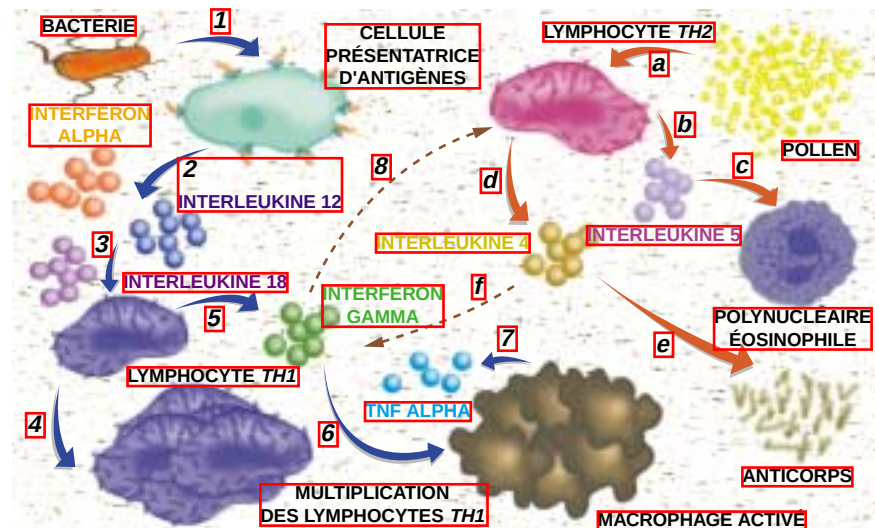
dans l'organisme tout entier, il est indispensable, sur le site de l'attaque, à l'activation du système immunitaire et à la lutte contre l'agent infectieux. Or le premier traitement du choc septique, c'est celui de sa cause : le choc septique illustre la dualité des effets des cytokines inflammatoires au cours des infections graves.

Les cytokines de la tolérance

Le système immunitaire doit être capable de s'activer face à des antigènes étrangers, mais doit tolérer les antigènes du soi, c'est-à-dire les antigènes naturellement présents dans l'organisme. Lorsqu'un antigène est présenté dans un contexte naturel – non agressif –, il n'active pas les cellules immunitaires qui le reconnaissent, mais, au contraire, les désensibilise, les plaçant dans un état de somnolence, d'« anergie ». Deux cytokines favorisent cette inactivation : le TGF bêta et l'interleukine 10. Selon les proportions respectives, sur le site de présentation de l'antigène, des cytokines stimulant les mécanismes immunitaires et favorisant l'inflammation ou, au contraire, des cytokines de la tolérance, le système immunitaire est activé ou mis au repos.

Ainsi, notre organisme tolère les bactéries du tractus digestif, ignorées par le système immunitaire. Klaus Rajewski et Werner Müller, de l'Université de Cologne, ont montré que, chez des souris dont le gène de l'interleukine 10 a été inactivé, une inflammation du tube digestif se développe rapidement. L'absence du facteur de tolérance déclenche une inflammation chronique face aux bactéries du tube digestif ; bien qu'elles ne soient pas pathogènes, le système immunitaire les reconnaît comme étrangères. De même, des souris dont le gène du TGF bêta a été inactivé *in utero* meurent peu après la naissance d'une inflammation diffuse, notamment cardio-pulmonaire.

Outre les mécanismes de rétroaction qui contrôlent l'efficacité des réactions inflammatoires et les cytokines de la tolérance, un troisième mécanisme module les réactions immunitaires, les orientant vers des réactions de défense ou des réactions de type allergique. Dès l'étape de présentation des antigènes de l'agent pathogène, trois cytokines sont produites par les cellules présentatrices d'antigènes, l'interféron alpha, l'interleukine 12 et l'interleukine 18 (voir la figure 3). Les cellules présentatrices d'antigènes stimulent



3. L'ORIENTATION DU SYSTEME IMMUNITAIRE dans la voie de défense, dite voie Th1 (à gauche, flèches bleues) ou dans la voie allergique Th2 (à droite, flèches rouges) dépend du premier contact avec l'agent qui l'active. En présence d'une bactérie, les cellules présentatrices d'antigènes (1) déclenchent la production d'interféron alpha, d'interleukine 12 et d'interleukine 18 (2) et la différenciation (3) des lymphocytes immatures en lymphocytes Th1 et leur prolifération (4). Ces lymphocytes produisent de l'interféron gamma (5), lequel active les macrophages (6). Ces derniers libèrent du TNF alpha (7). Dans la voie Th2, le pollen, par exemple, entraîne la différenciation des lymphocytes en lymphocytes Th2 (a), qui produisent de l'interleukine 5 (b), activant les polynucléaires éosinophiles (c), des acteurs essentiels de l'allergie, et de l'interleukine 4 (d), stimulant la production des anticorps (e). Les deux voies s'inactivent mutuellement : l'interféron gamma inhibe la production des lymphocytes Th2 (8), et l'interleukine 4 inhibe celle des lymphocytes Th1 (f).

les lymphocytes T , et leur ordonnent de devenir des lymphocytes T auxiliaires de type 1, les lymphocytes Th_1 , producteurs d'interféron gamma. Les lymphocytes Th_1 sont au cœur des réactions déclenchées par les virus, notamment. Les lymphocytes peuvent également devenir des lymphocytes Th_2 , qui, eux, produisent de l'interleukine 4, laquelle stimule la production des anticorps, et de l'interleukine 5, activant les polynucléaires éosinophiles. Les lymphocytes Th_2 sont indispensables aux réactions de défense contre les parasites et participent aux réactions allergiques.

Comment le système immunitaire choisit-il entre les lymphocytes Th_1 , la voie des défenses contre les virus et contre les bactéries, ou les lymphocytes Th_2 , la voie de l'allergie? Ce choix semble dépendre de la nature de l'intrus. Par exemple, certains parasites portent des antigènes capables d'orienter immédiatement la réaction lymphocytaire vers les lymphocytes Th_2 . Une fois cette réaction auxiliaire engagée dans un sens Th_1 ou Th_2 , elle s'auto-amplifie ; la production de lymphocytes Th_1 stimule la production de lymphocytes Th_1 (de même pour les lymphocytes Th_2), tandis que ces deux populations cellulaires s'inhibent réciproquement. Ces interactions sont contrôlées par les cytokines produites par les deux populations de lymphocytes T auxiliaires : l'interféron gamma, qui inhibe la production des lymphocytes Th_2 , et l'interleukine 4, qui inhibe celle des lymphocytes Th_1 .

Les chimiokines

Nous avons montré que l'interféron gamma et le TNF alpha stimulent également de concert la production locale de chimiokines, notamment celles qui recrutent de nouveaux lymphocytes Th_1 et de nouveaux macrophages circulant dans le sang ; ce sont les chimiokines RANTES, IP-10 (*Interferon-Induced Protein 10*, la protéine 10 activée par l'interféron) et MIG (*Monokine Induced by Interferon Gamma*, la monokine activée par l'interféron gamma). L'afflux de ces cellules alimente la réaction immunitaire locale, dont l'intensité et le rayon d'action augmentent.

Les chimiokines attirent les globules blancs, leur permettant de traverser la paroi vasculaire et de passer de l'intérieur des vaisseaux sanguins vers les tissus, puis de migrer à l'intérieur des tissus

vers le site du conflit immunitaire. À l'occasion d'un phénomène inflammatoire local, les cellules endothéliales qui tapissent la surface interne des vaisseaux sanguins produisent des chimiokines, des substances adhésives. Les leucocytes circulant dans le sang rencontrent alors un tapis de chimiokines dans les vaisseaux qui sillonnent les tissus où siège l'inflammation. Ce tapis accroche les leucocytes qui adhèrent à la surface des vaisseaux, puis migrent à travers l'endothélium vers le tissu.

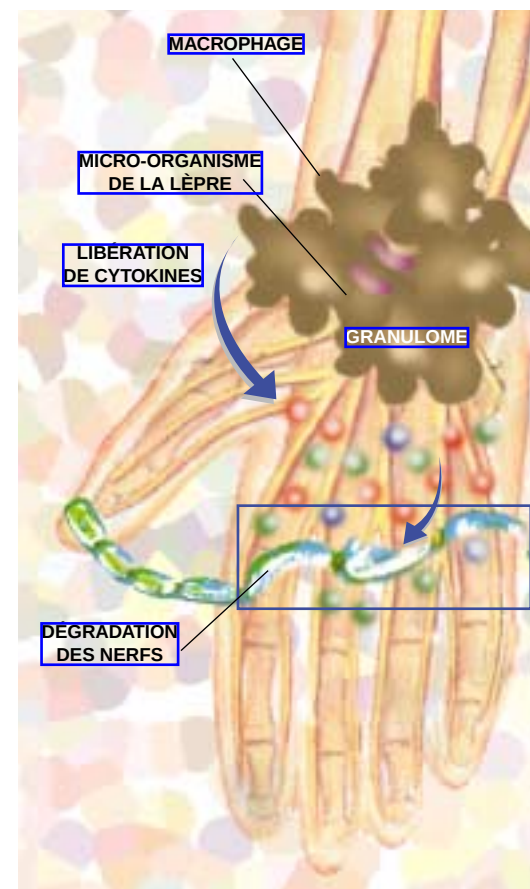
Les leucocytes migrent dans le tissu et y rencontrent différentes chimiokines qui, à l'endroit où l'inflammation est maximale, sont produites par les macrophages, les fibroblastes ou les leucocytes déjà parvenus sur les lieux. Ces chimiokines sont des médiateurs solubles qui diffusent dans le tissu agressé à partir de ce site de production. Toutefois, la diffusion est limitée, car les chimiokines adhèrent à la matrice extracellulaire, c'est-à-dire à des protéines, telles que le collagène ou la fibronectine, qui constituent le tissu conjonctif, charpente de l'espace extracellulaire. Un gradient de chimiokines se crée dans l'espace extracellulaire, la concentration de chimiokines fixée aux protéines extracellulaires étant maximale près du site de production. Après avoir traversé l'endothélium, les leucocytes émettent des prolongements cellulaires dans toutes les directions et évaluent l'endroit où la concentration en chimiokines est la plus élevée. Le « bras-renifleur » qui détecte cette concentration maximale s'ancre alors à la matrice extracellulaire, puis se rétracte, entraînant l'ensemble du corps cellulaire. Puis ce phénomène se reproduit, et, d'étape en étape, les leucocytes rejoignent le site de production des chimiokines, c'est-à-dire celui de l'attaque du micro-organisme pathogène.

Les chimiokines sont des recruteurs spécialisés : certaines chimiokines n'attirent que les polynucléaires neutrophiles, d'autres les éosinophiles, d'autres encore les macrophages, les lymphocytes T ou les lymphocytes B . Or selon l'agent infectieux, les chimiokines libérées diffèrent et, par conséquent, les cellules immunitaires recrutées par ces cytokines. Ainsi les staphylocoques produisent des toxines bactériennes qui déclenchent seulement la production d'interleukine 8, laquelle n'active qu'une classe de cellules immunitaires, les polynucléaires neutrophiles : les abcès dus aux staphylocoques ne contiennent que

des polynucléaires neutrophiles. Au contraire, le bacille de la tuberculose déclenche la production de cytokines (interféron gamma et TNF alpha) qui laissent les polynucléaires indifférents, mais qui attirent les macrophages et les lymphocytes T .

Ainsi, les chimiokines jouent un rôle essentiel dans la constitution des foyers inflammatoires et dans les mécanismes de défense immunitaire, permettant la mobilisation (au sens militaire du terme) des cellules immunitaires vers le lieu du conflit. La synthèse des chimiokines est surtout déclenchée par des cytokines inflammatoires, telles que l'interleukine 1 et le TNF alpha, et par l'interféron gamma. Les premières cellules immunitaires activées par la présence d'un agent pathogène sont des sentinelles qui produisent des cytokines inflammatoires, alertent les leucocytes circulants et les recrutent vers le site de l'infection.

Arrivés sur place, ces leucocytes produisent eux-mêmes des cytokines



4. L'AGENT PATHOGENE DE LA LEPRE engendre deux types de symptômes selon la prédisposition des personnes infectées. Dans la forme tuberculoïde (à gauche), le système immunitaire défend efficacement l'organisme contre l'infection : peu d'agents pathogènes subsistent. En revanche, les amas

inflammatoires et des chimiokines, signaux de rappel d'autres renforts leucocytaires. Ce mécanisme se renouvelle tant que persiste l'agent pathogène, ou que des signaux immunitaires ou médicamenteux n'imposent pas la paix. Ainsi, des substances anti-inflammatoires – par exemple, les systèmes antagonistes de l'interleukine 1 déjà décrits – jouent ce rôle, de même que des médicaments, notamment des corticoïdes (les glucocorticoïdes). Les glucocorticoïdes sont des anti-inflammatoires, parce qu'ils inhibent l'expression des gènes codant les cytokines inflammatoires, notamment des chimiokines. C'est l'un des principaux mécanismes de l'action anti-inflammatoire de ces substances utilisées dans le traitement de plusieurs maladies chroniques, où le système immunitaire est suractivé à tort, par exemple les rhumatismes inflammatoires chroniques (la polyarthrite rhumatoïde), les maladies inflammatoires du tube digestif (la maladie de Crohn, une

inflammation de l'intestin douloureuse accompagnée de diarrhée et de perte de poids) ou les inflammations bronchiques, tel l'asthme.

La complexité des interactions entre cytokines au cours d'une infection est également illustrée par le bacille de la lèpre (*Mycobacterium leprae*). Au cours d'une telle infection, deux types de réactions peuvent se produire, donnant deux «maladies» d'apparence différente. Dans le cas de la maladie dite lépromateuse, les réactions immunitaires sont insuffisantes et les microbes pullulent. Le micro-organisme pathogène se multiplie sans entrave dans les cellules qui finissent par éclater, créant des lésions tissulaires. Cette forme est due à un défaut de production d'interleukine 12 et d'interféron gamma (les macrophages, en particulier, ne sont pas activés), et à un excès de production d'interleukine 4 et d'interleukine 10 qui s'opposent à l'activation des lymphocytes T. Au contraire, dans la forme de la maladie dite tuber-

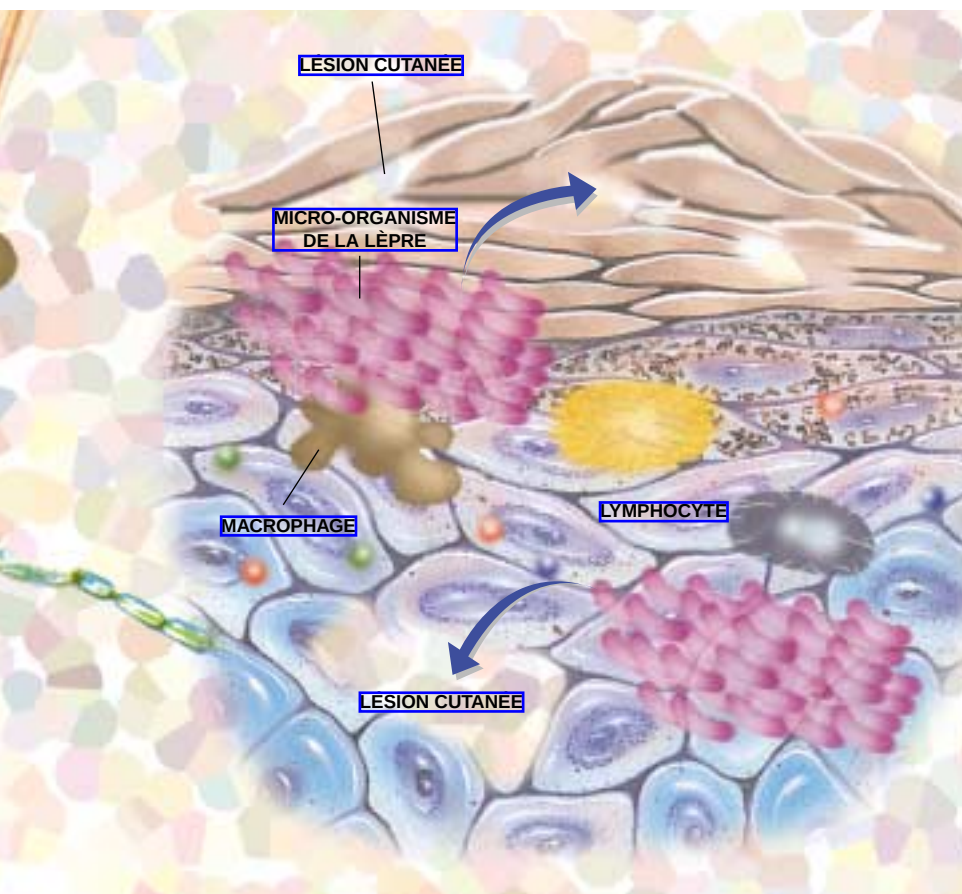
culoïde, la pathologie résulte d'une réaction immunitaire incontrôlée : la production d'interleukine 12, d'interféron gamma et de TNF alpha est excessive et mal régulée par l'interleukine 4 et par l'interleukine 10. Dans ce cas, les macrophages sont correctement activés et les microbes vaincus (il n'en reste presque pas), mais la production massive des cytokines, notamment du TNF alpha, lèse les organes où les réactions immunitaires se déroulent. Dans cette forme, les nerfs périphériques sont souvent endommagés.

L'inégalité face aux maladies

Cet exemple soulève une question fondamentale et préoccupante : pourquoi deux personnes de constitution apparente semblable (même sexe, même âge, même poids, en bonne santé) réagissent-elles parfois si différemment à un même agent pathogène ? Pourquoi certaines ont-elles beaucoup de fièvre pendant une grippe ou après une vaccination, d'autres non ? Pourquoi des infections, telle la listériose, sont-elles mortelles, mais dans quelques cas seulement ? Nous ne sommes pas égaux face aux agents infectieux, à la fois par les symptômes qui se manifestent et par notre faculté à éliminer les intrus. Cette inégalité est parfois acquise : la dénutrition, les âges extrêmes de la vie, la grossesse ou l'existence de pathologies associées (le SIDA) perturbent le système immunitaire, notamment le réseau des cytokines. Toutefois, cette inégalité face aux maladies a également une composante génétique : la sensibilité aux infections.

Les gènes codant les cytokines ou leurs récepteurs sont très variables parmi la population générale. Cette hétérogénéité (ou polymorphisme) ne porte généralement pas sur les séquences de l'ADN qui codent les cytokines, mais sur les séquences qui contrôlent l'expression de ces gènes : face à une situation identique, deux personnes différentes produisent plus ou moins de telle ou telle cytokine, de tel ou tel récepteur de cytokine. Étant donné le grand nombre de cytokines et de récepteurs, deux personnes ne réagissent quasi jamais de la même façon en présence du même agent pathogène.

Cette inégalité face aux infections résulte vraisemblablement du polymorphisme génétique des cytokines. Au cours du paludisme, par exemple,



de macrophages, nommés granulomes, libèrent de grandes quantités de cytokines, notamment du TNF alpha qui entraîne la mort des cellules des nerfs périphériques. Des troubles neurologiques apparaissent : ce sont les granulomes qui sont responsables des symptômes, et non l'agent pathogène lui-même. Dans le cas de la forme lépromateuse (à droite), le système immunitaire ne contrôle pas la multiplication de l'agent pathogène, qui prolifère. Ces micro-organismes se multiplient dans les cellules de la peau notamment, et les détruisent. Des tumeurs cutanées apparaissent.

les globules rouges sont infectés par le micro-organisme *Plasmodium falciparum*, et le système immunitaire réagit en libérant, notamment, du TNF alpha. William Mc Guire et ses collègues de l'Université d'Oxford ont montré que la paludisme tue plus souvent les personnes dont la synthèse de TNF alpha est supérieure à la normale : le paludisme tue surtout parce que le TNF alpha fait coaguler le sang dans les vaisseaux du cerveau. Les faibles producteurs de TNF alpha sont partiellement protégés contre les conséquences dramatiques de cette infection. Dans les zones intertropicales soumises depuis des siècles au paludisme, qui représente une forte pression de sélection, le profil génétique des populations a vraisemblablement évolué : les faibles producteurs de TNF alpha ont été sélectionnés.

Au contraire, en Europe du Nord et dans les populations Nord-américaines, l'un des principaux facteurs de sélection a été la tuberculose, qui a emporté la Dame au camélias, Mozart, Chopin ou Modigliani. Or, dans le cas de la tuberculose, le TNF alpha est, avec l'interféron gamma, indispensable à l'activation des macrophages et à la mise en place des mécanismes de défense immunitaire. Ainsi, dans ces pays, la pression de sélection a favorisé les forts producteurs de TNF alpha. La tuberculose s'est répandue de l'Europe à l'ensemble du monde, à la suite de la colonisation ; les populations colonisées n'ont pas subi la longue pression de sélection qui s'était exercée en Europe. Cette différence génétique expliquerait en partie pourquoi les formes les plus graves de tuberculose, celles que l'on voyait en Europe il y a quelques siècles et qui avaient pratiquement disparu, réapparaissent dans des populations originaires d'Afrique, d'Asie du Sud-Est ou d'Amérique latine.

Les populations s'adaptent donc en fonction de la force des pressions de sélection subies, le réseau des cytokines étant l'une des principales cibles de cette sélection. Toutefois, ces pressions varient au fil du temps. Aujourd'hui, en

Afrique, le SIDA est la principale cause de mortalité d'origine infectieuse. Or, on sait que le pronostic de l'infection est meilleur quand les malades produisent des quantités importantes d'interféron gamma, d'interleukine 12 et de chimiokines, et peu de certains récepteurs de chimiokines, notamment CCR5, car ce récepteur est une sorte de deuxième clé dont le virus a besoin pour pénétrer dans les cellules qu'il infecte. Si l'épidémie n'est pas rapidement contrôlée, elle risque de modifier les défenses immunitaires des populations atteintes ; les personnes mieux adaptées à ce virus seront peut-être sélectionnées, mais au prix d'une plus grande sensibilité à d'autres maladies, infectieuses ou non. Un nouvel état d'équilibre apparaîtra dans la population, jusqu'à la survenue d'une autre épidémie grave. À moins que des médicaments ne viennent freiner cette dérive naturelle du patrimoine génétique.

Au-delà de leur action sur les cellules du système immunitaire, certaines interleukines agissent sur des cellules qui ne font pas partie du système immunitaire. Cette action extra-immunologique explique les symptômes que l'on observe lors des réactions immunitaires intenses, telles que la fièvre et la perte d'appétit, et qui indiquent que différents organes, notamment l'encéphale, ont été stimulés. Ce sont les cytokines inflammatoires – l'interleukine 1, l'interleukine 6 et le TNF alpha – qui sont responsables de ces symp-

tômes. Lorsqu'ils persistent, ils expliquent en partie l'altération de l'état général (la fatigue, l'amaigrissement), qui accompagnent les cancers avancés ou les infections chroniques graves, tels la tuberculose ou le SIDA.

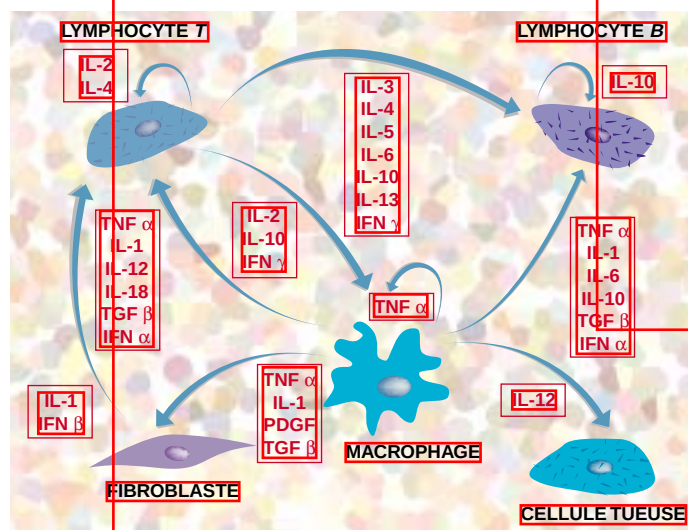
Si la sensibilité face aux maladies infectieuses varie d'une personne à l'autre, il en est de même pour les pathologies non infectieuses, notamment les maladies auto-immunes et les maladies allergiques. Là encore, cette sensibilité variable résulterait de l'hétérogénéité de fonctionnement du réseau des cytokines.

Les cytokines, cibles de nouveaux médicaments

Aujourd'hui, on comprend mieux le rôle des cytokines dans les pathologies humaines. De plus, on a découvert que certaines substances qui modulent le système immunitaire et que l'on utilise de longue date, tels les corticoïdes, agissent sur ce réseau. Par conséquent, on tente de le moduler en renforçant ou en imitant l'action de certaines cytokines, ou, au contraire, en bloquant leur production ou leurs effets.

Depuis le début des années 1980, on sait que l'interféron alpha a des propriétés antivirales et antiprolifératives, de sorte que l'on a commencé à utiliser cette cytokine, produite par génie génétique, chez des personnes atteintes d'hépatites virales chroniques et de maladies sanguines malignes (des leucémies). L'interleukine 2, qui active les lymphocytes T auxiliaires et les lymphocytes T tueurs, est utilisée dans les cancers rebelles aux autres traitements, surtout les cancers du rein et les mélanomes. Quant à l'interféron bêta, il constitue d'ores et déjà une arme thérapeutique de choix contre la sclérose en plaques.

Des progrès considérables ont été réalisés, ces derniers mois, avec les antagonistes des cytokines, notamment du TNF alpha : ce sont soit des anticorps monoclonaux spécifiques qui musellent le TNF alpha et l'empêchent d'agir, soit des récepteurs solubles du TNF alpha (qui piègent ce facteur). Les antagonistes du TNF alpha viennent



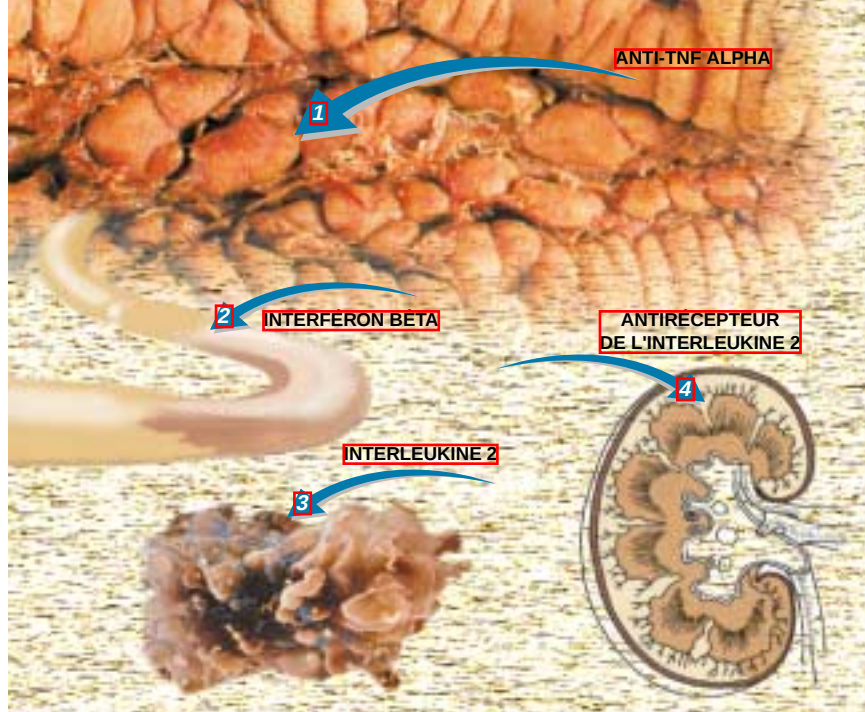
5. LE RÉSEAU des cytokines est très imbriqué. Lorsqu'un macrophage, l'éboueur de l'organisme, est activé, il libère du TNF alpha qui entretient sa propre activation. Il libère aussi divers facteurs qui activent les lymphocytes T et B, lesquels synthétisent à leur tour des substances qui entretiennent leur activation et d'autres qui agissent sur divers types cellulaires. Ces interactions mettent en jeu de nombreuses cytokines et plusieurs types de cellules dont on n'a schématisé que quelques représentants.

d'obtenir leur autorisation de mise sur le marché en Europe pour deux maladies fréquentes et invalidantes : la maladie de Crohn et la polyarthrite rhumatoïde (toutes deux dues à un excès de TNF). Utilisés depuis quelques années aux États-Unis, ces traitements ont totalement changé le pronostic de ces deux maladies. Aujourd'hui les cytokines thérapeutiques et leurs antagonistes sont administrés par piqûres et sont coûteuses. On peut espérer, dans un avenir proche, disposer de petites molécules non protéiques moins onéreuses et administrables par voie orale.

Par ailleurs, dans le cas d'un choc septique, on a montré, sur l'animal, que des substances qui neutralisent le TNF alpha préviennent la survenue d'un choc septique à condition d'être administrées dès le début de la libération massive des cytokines. Quelques tentatives sur l'homme n'ont pas eu les résultats escomptés, vraisemblablement en raison d'une administration trop tardive, une fois que les signes cliniques du choc septique étaient déjà manifestes, une fois l'orage cytokinique déjà déclenché.

Les cytokines semblent aussi avoir des applications intéressantes chez les personnes infectées par le VIH. Les traitements antiviraux utilisés contre le VIH assurent une réduction notable de la concentration en particules virales dans le sang, mais la récupération des fonctions du système immunitaire est lente et incomplète. On s'est demandé comment accélérer cette récupération. Or, l'interleukine 2 est normalement synthétisée par les lymphocytes T auxiliaires, mais ces derniers sont détruits par le VIH : sa concentration est inférieure à la normale chez les personnes séropositives. De plus, on sait que cette cytokine stimule la prolifération des lymphocytes T, *in vitro*. Au cours d'un essai thérapeutique coordonné par l'Agence nationale de recherche sur le SIDA, l'ANRS, on a administré de l'interleukine 2 à une centaine de personnes infectées par le VIH, à un stade peu avancé de la maladie. Cet essai a montré que le traitement par l'interleukine 2 des personnes infectées par le VIH favorise la multiplication des lymphocytes T auxiliaires, et, comme elle les protège contre la mort cellulaire programmée, l'apoptose, elle semble aussi améliorer leur survie.

Enfin, la spécificité des cytokines ouvre des espoirs thérapeutiques :



6. DE NOUVEAUX TRAITEMENTS inhibent les cytokines responsables de diverses maladies. La maladie de Crohn (1, aspect de l'intestin atteint) est due à un excès de TNF, et des antagonistes spécifiques de cette substance font régresser la maladie. Les poussées de sclérose en plaque (2, les prolongements neuronaux perdent progressivement leur enveloppe de myéline) sont freinées par l'interféron bêta. Le traitement par l'interleukine 2 des personnes infectées par le VIH favorise la multiplication des lymphocytes T (3, un lymphocyte d'où s'échappent d'innombrables particules virales). Des anticorps dirigés contre les récepteurs de l'interleukine 2 empêchent que les greffes (de rein, par exemple, 4) ne soient rejetées.

on devrait pouvoir élaborer de nouveaux médicaments qui inhiberaient un seul type de réaction immunitaire, sans perturber les autres. Par exemple, la plupart des cellules immunitaires présentes dans la muqueuse bronchique au cours d'une crise d'asthme semblent être recrutées par une seule chimiokine, l'éotaxine, qui agit sur un récepteur spécifique, nommé CCR₃. Si l'on parvenait à bloquer ce récepteur, on empêcherait le développement de l'inflammation allergique bronchique, et uniquement cette réaction inflammatoire.

Citons un dernier exemple des applications potentielles de la spécificité des cytokines : des anticorps monoclonaux dirigés contre les récepteurs de l'interleukine 2 sont utilisés contre les rejets de greffe. Lors d'une

greffe, les lymphocytes T spécifiques du greffon sont activés et ils déclenchent les réactions immunitaires qui seront responsables du rejet de la greffe. Or ces lymphocytes ne peuvent survivre qu'en présence d'interleukine 2 dont ils portent – seuls – des récepteurs. On a donc eu l'idée de synthétiser des anticorps dirigés contre le récepteur de l'interleukine 2 : ils se fixent sur le récepteur, empêchant l'interleukine 2, vitale pour les lymphocytes spécifiques du greffon, de s'y loger. Ces lymphocytes meurent : la greffe n'est pas rejetée. Comme seuls les lymphocytes T spécifiques du greffon sont activés, les anticorps dirigés contre le récepteur de l'interleukine 2 n'agissent que sur eux : les autres acteurs du système immunitaire ne sont pas perturbés.

Dominique ÉMILIE travaille dans le service de médecine interne et d'immunologie clinique, dirigé par Pierre GALANAUD, à l'Hôpital Antoine-Béclère, à Clamart. Dans le même hôpital, Marc HUMBERT travaille dans le service de pneumologie. Ils mènent tous trois des recherches à l'Institut Paris-Sud sur les cytokines.

D. ÉMILIE et al, *Chimiokines et leurs récepteurs : rôle dans l'infection par le VIH*, in *Med. Thérap.*, n° 4, pp. 663-666, 1988.

D. ÉMILIE et al., *Quel avenir pour les drogues immunostimulantes : l'exemple de l'interleukine 2 dans la reconstitution immunitaire de l'infection par le VIH*, in *Médecine/Sciences*, vol. 15, pp. 911-914, 1999.

M. HUMBERT, *Les nouvelles armes contre l'asthme*, in *Pour la Science*, n° 264, pp. 46-53, octobre 1999.

J. THÈSE, *The Cytokine Network and Immune Functions*, Oxford University Press, 1999.

La mission *Galileo* vers Jupiter

TORRENCE JOHNSON

Malgré des difficultés techniques, la sonde spatiale Galileo a révélé l'inouïe variété des satellites de Jupiter.

Afin d'économiser son énergie, le module de descente voyageait dans un silence radio total. Seule une petite horloge égrenait les secondes. À 215 000 kilomètres de là, le vaisseau qui l'avait largué était prêt à recevoir et à retransmettre ses émissions. Sur la Terre, des scientifiques attendaient impatiemment ces données : n'avaient-ils pas, pour certains, préparé cet instant depuis 20 ans ? Le premier signal attendu était un simple bit de donnée, oui ou non, qui indiquerait si le petit module avait survécu à son plongeon dans l'atmosphère dense de Jupiter.

La route jusqu'à Jupiter fut parsemée d'embûches. Lors de la conception du projet, au milieu des années 1970, on avait prévu que la sonde spatiale prendrait le départ en 1982, serait mise en orbite autour de la Terre par une navette spatiale et serait envoyée vers Jupiter par un étage supérieur de fusée spécialement conçu. Toutefois, les ratés des premiers lancements de la navette et des difficultés de conception de l'étage supérieur ont retardé le calendrier. Le terrible accident de *Challenger*, en 1986, alors que *Galileo* était prête à partir, bouleversa les plans. Contraints d'utiliser un étage supérieur plus sûr mais moins puissant, les ingénieurs calculèrent une trajectoire qui utilisait l'assistance gravitationnelle de Vénus et de la Terre. Après le lancement, en octobre 1989, le voyage devait durer six ans. Toutefois, après deux années de voyage, l'antenne principale de communication ne s'ouvrit pas ; il ne restait que l'antenne de secours, moins puissante, pour assurer les communications avec la Terre. Puis l'enregistreur de données à bande se bloqua.

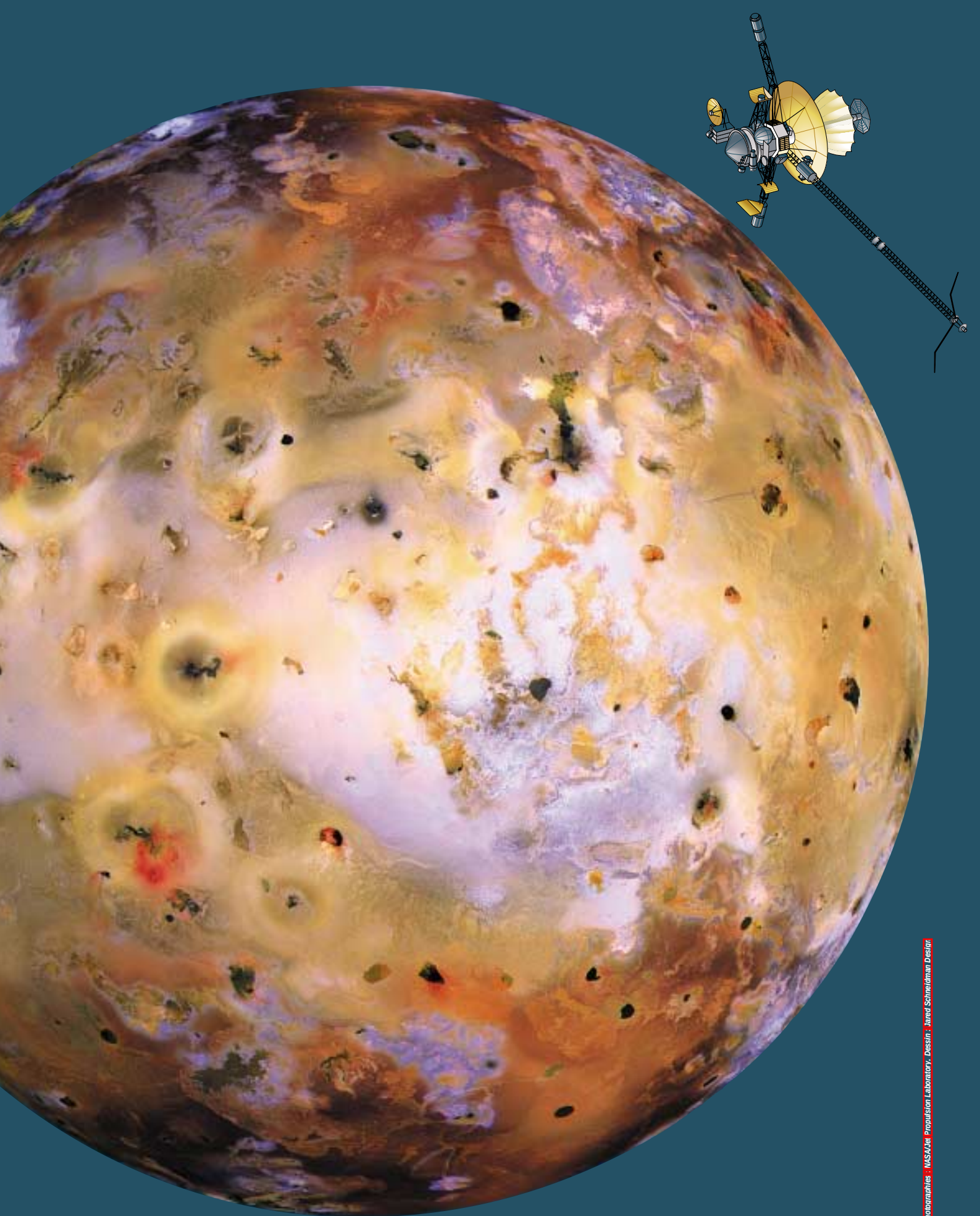
Lorsque les ingénieurs reçurent le signal qui confirmait le fonctionnement du module, il y eut des exclamations de joie dans la salle de contrôle. Pourtant, tous savaient que deux heures cruciales allaient s'écouler avant le second événement clé : la mise en orbite de l'orbiteur autour de

Jupiter. Pour la réussir, on devait réduire sa vitesse : pendant 45 minutes, les ingénieurs donnèrent l'ordre au moteur principal de ralentir l'orbiteur. La manœuvre fut un succès : l'orbiteur devint le premier satellite artificiel de la planète géante.

Depuis ce jour de décembre 1995, la mission a donné la première vision détaillée du système jovien (les survols par *Pioneer* et *Voyager*, dans les années 1970, n'en avaient donné qu'un aperçu). Le module de descente a traversé les nuages de Jupiter et a fait les premières mesures *in situ* de l'atmosphère d'une planète extérieure, envoyant ses données pendant une heure avant de sombrer dans les profondeurs gazeuses de la planète. L'orbiteur se porte toujours à merveille. Il a photographié et analysé la planète, ses anneaux et ses multiples satellites. Mieux encore, il a révélé qu'un océan d'eau liquide semble être abrité par Europe, l'un des quatre plus gros satellites de Jupiter, découverts par Galilée en 1610 (voir *L'océan caché d'Europe*, de Robert Pappalardo, James Head et Ronald Greeley, *Pour la Science*, février 2000). D'autres surprises attendaient les astronomes : des jets d'électrons relient Jupiter et Io, le satellite galiléen à l'activité volcanique intense ; Ganymède est le premier satellite dont on ait détecté un champ magnétique ; Callisto présente des caractéristiques étranges et possède peut-être un océan, comme Europe.

CRIBLÉE DE 80 VOLCANS ACTIFS, la surface de Io donne l'impression que la Terre est géologiquement inerte, par comparaison. Les taches jaunes, marron et rouges de cette mosaïque en fausses couleurs (*image principale*) correspondent à différents minéraux à base de soufre. Un givre de dioxyde de soufre recouvre les zones blanches. Du gaz et de la poussière éjectés se retrouvent en orbite, comme on l'observe quand le Soleil éclaire Io de côté (*en cartouche à droite*). La lueur jaunâtre est due en grande partie à du sodium gazeux. Le jet de lumière blanche correspond à la dispersion de la lumière solaire par le panache, haut de 100 kilomètres, du volcan Prométhée.





Photographies : NASA/Jet Propulsion Laboratory. Dessin : Jared Schneidman Design.

La géante gazeuse : Jupiter

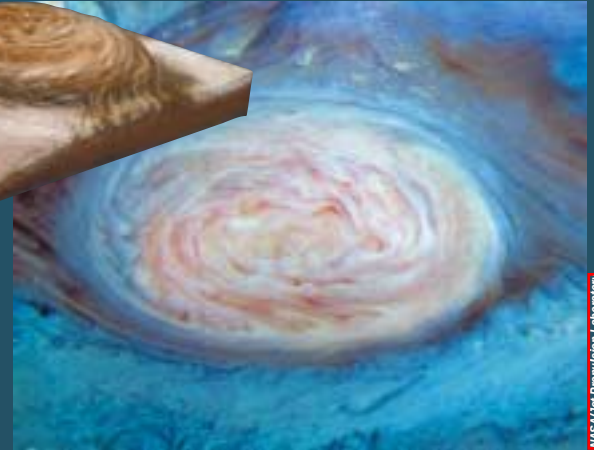


Reta Beebe,
New Mexico
State University et NASA

Avant la mission *Galileo*, aucun objet fabriqué par l'homme n'était jamais entré en contact avec une planète géante gazeuse. Le vaisseau principal a laissé tomber un module dans l'atmosphère de Jupiter, un peu au Nord de son équateur (*flèche noire sur la photographie de gauche*). Pendant plus d'une heure, le module est descendu dans l'atmosphère, mesurant sa composition (*tableau ci-contre*), avant d'être détruit par la pression et la chaleur excessives (*séquence ci-contre à droite*). Dans le tableau, on suppose que la composition solaire primordiale est identique à celle des couches externes du Soleil.

NASA Jet Propulsion Laboratory

CES NUAGES OVALES ont été observés par *Galileo* dans le proche infrarouge, au début de 1997. Une région en forme de poire est piégée entre eux. Les ovals tournent en sens inverse des aiguilles d'une montre, tandis que la région en forme de poire tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Un an plus tard, les ovals avaient fusionné. Chaque oval a un diamètre d'environ 9 000 kilomètres.

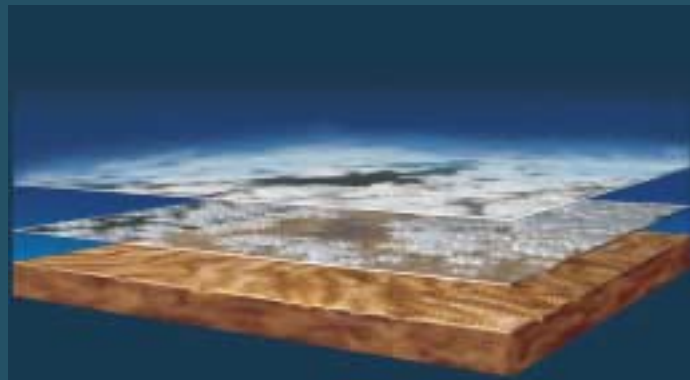


NASA Jet Propulsion Laboratory

CETTE GRANDE TACHE ROUGE est une zone de cyclone qui s'élève à une trentaine de kilomètres au-dessus des nuages voisins. En allant du rouge au vert puis au bleu, les couleurs correspondent à une quantité décroissante de méthane mesuré le long de la ligne de visée. Ainsi, les zones roses et blanches sont les plus hautes, et les zones bleutées et noires sont les plus basses. La tempête, de 26 000 kilomètres d'extension, résulte vraisemblablement des instabilités des forts courants atmosphériques d'Est et d'Ouest de la planète. Sur le schéma (*cartouche, ci-dessus*), l'échelle verticale est exagérée d'un facteur 1 000.

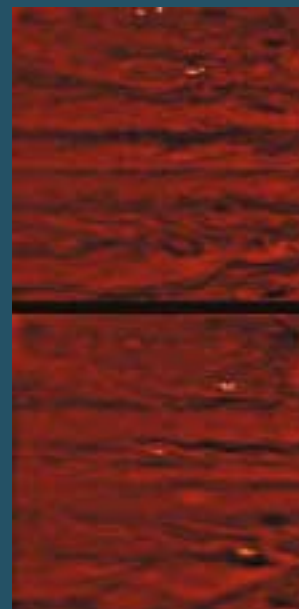


NASA Jet Propulsion Laboratory



Don Dixon

UN TROU DANS LA COUVERTURE NUAGEUSE de haute altitude révèle les régions comparativement chaudes situées plus bas. Comme sur les autres images prises dans l'infrarouge proche, les nuages bleutés sont minces, les nuages blancs sont épais et les nuages rougeâtres sont en profondeur (*schéma ci-dessus*). La sonde *Galileo* s'est enfoncée dans une région de ce type, nommée point chaud. Cette image couvre 34 000 kilomètres en longueur.



NASA Jet Propulsion Laboratory

DES ÉCLAIRS apparaissent sur ces images de la face nocturne de Jupiter. Le clair de lune de Io éclaire faiblement la couverture de nuages d'ammoniac. Les éclairs proviennent probablement de nuages d'eau situés une centaine de kilomètres plus bas. La foudre frappe à peu près au même rythme que sur Terre, mais les éclairs sont 1 000 fois plus brillants. Chaque image fait environ 60 000 kilomètres de côté.



Don Davis

Le module pénètre l'atmosphère
450 kilomètres, 10^{-7} bar, 0 minute

Le premier parachute s'ouvre
23 kilomètres, 0,4 bar, 2,86 minutes

Le module se sépare
du couvercle arrière
23 kilomètres, 0,4 bar, 2,88 minutes

Le bouclier thermoprotecteur tombe
21 kilomètres, 0,45 bar, 3,03 minutes

ALTITUDE DE RÉFÉRENCE : 0 kilomètre, 1 bar, 6,4 minutes

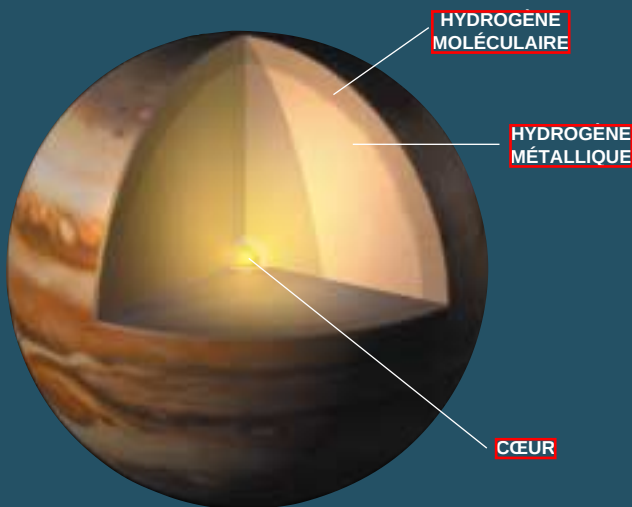
Les communications cessent
-146 kilomètres, 22 bars,
61,4 minutes

La structure de titane fond
-1 000 kilomètres, 2 000 bars,
9 heures

Don Dixon

COMPOSITION CHIMIQUE DE LA HAUTE ATMOSPHÈRE (NOMBRE D'ATOMES PAR ATOME D'HYDROGÈNE)

ÉLÉMENT	FORME CHIMIQUE	JUPITER	SATURNE	SOLEIL
HELIUM	HELIUM	0,078	$0,070 \pm 0,015$	0,097
CARBONE	MÉTHANE	$1,0 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}	$3,6 \times 10^{-4}$
AZOTE	AMMONIAQUE	$4,0 \times 10^{-4}$	$3 \pm 1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$
OXYGÈNE	EAU	$3,0 \times 10^{-4}$	non mesuré	$8,5 \times 10^{-4}$
SOUFRE	SULFURE D'HYDROGÈNE	$4,0 \times 10^{-5}$	non mesuré	$1,6 \times 10^{-5}$
DEUTÉRIUM	DEUTÉRIUM	3×10^{-5}	3×10^{-5}	$3,0 \times 10^{-5}$
NÉON	NÉON	$1,1 \times 10^{-5}$	non mesuré	$1,1 \times 10^{-4}$
ARGON	ARGON	$7,5 \times 10^{-6}$	non mesuré	$3,0 \times 10^{-6}$
KRYPTON	KRYPTON	$2,5 \times 10^{-9}$	non mesuré	$9,2 \times 10^{-10}$
XÉNON	XÉNON	$1,1 \times 10^{-10}$	non mesuré	$4,4 \times 10^{-11}$



HYDROGÈNE
MOLÉCULAIRE

HYDROGÈNE
MÉTALLIQUE

CŒUR

Alfred F. Kemm

JUPITER n'est pas véritablement une planète géante gazeuse. Sous une mince couche d'atmosphère, l'essentiel de la planète est constitué d'hydrogène à une pression telle qu'il est devenu liquide et conducteur, un peu comme du mercure. Au centre, l'hydrogène s'accumule autour d'un noyau rocheux.

Un courant descendant magistral

Selon les théories de formation planétaire, Jupiter et les autres planètes géantes se sont créés à partir de la nébuleuse solaire primitive en deux étapes. Dans un premier temps, des «planétésimaux» formés de glaces (de grosses comètes qui s'étaient condensées à partir du nuage de gaz et de poussières primordial) s'agglomérèrent. Puis, quand la protoplanète est devenue suffisamment grosse, elle a attiré du gaz de la nébuleuse. Ainsi, Jupiter aurait une composition semblable à celle de la nébuleuse solaire primitive. Par la suite, la planète a été façonnée par des mécanismes de différenciation interne et par l'apport de matériaux provenant des comètes qui ne cessent de la percuter. Le module de descente devait surtout chercher la contribution de ces divers mécanismes.

La découverte de la sonde qui pose le plus de problèmes est sans doute celle qui concerne les «espèces condensables», dont l'azote, le soufre, l'oxygène et le carbone. Depuis longtemps, les planétologues savent que Jupiter renferme environ trois fois plus de carbone (détecté sous la forme de méthane) que le Soleil. Les autres espèces (sous la forme d'ammoniac, de sulfures d'ammonium et d'eau) devaient se condenser en couches de nuages à des profondeurs variées. Les impuretés contenues dans les gouttelettes des nuages, peut-être du soufre ou du phosphore, donnent à chaque couche sa couleur. Le module était conçu pour descendre sous la couche nuageuse inférieure : on pensait qu'elle était composée d'eau, à une pression de cinq à dix atmosphères, située à environ 100 kilomètres sous les nuages supérieurs, composés d'ammoniac solidifié. On prévoyait d'observer du vent, des nuages et une chaleur humide.

Pourtant, à la profondeur prévue, les instruments n'ont observé aucun signe de nuages, juste quelques légères brumes à la pression de 1,6 atmosphère. L'eau et le soufre étaient peu abondants. Le détecteur d'éclairs (un système radio qui détecte les décharges d'électricité statique) n'a enregistré que de faibles décharges. Bref, le ciel était dégagé et sec. Pourquoi les prévisions étaient-elles erronées ? Les images infrarouges des télescopes terrestres apportèrent rapidement un élément de réponse. La sonde était fortuitement entrée dans une région atmosphérique

particulière, un «point chaud», où le ciel dégagé laisse passer le rayonnement infrarouge des niveaux inférieurs. Jupiter possède de nombreuses régions

de ce type, et leur emplacement change continuellement, de sorte qu'il était impossible de programmer la sonde pour qu'elle les vise ou les évite.

Le hasard de cette descente sur un point chaud ne dissipait pas entièrement le mystère. Les planétologues pensaient que, même dans ces régions

La force des éclairs

Si il est connu depuis les observations des sondes *Voyager* que l'atmosphère jovienne est le siège de nombreux orages, leur origine demeurait un mystère. L'interprétation récente d'images de Jupiter obtenues par *Galileo* a abouti à des résultats spectaculaires. En observant la face nocturne de Jupiter éclairée par le clair de lune de Io et en comparant, de nuit, les zones nuageuses éclairées par les orages aux mêmes zones, de jour, afin d'identifier les nuages environnants, les planétologues ont localisé précisément le lieu de ces phénomènes électriques.

Cet éclairage indirect a permis de repérer quels nuages étaient à l'origine des éclairs. En analysant ces images, les planétologues américains Andrew Ingersoll et Peter Gierasch ont montré que ces nuages étaient associés à des

tourbillons atmosphériques. Ces nuages d'orage, situés à des profondeurs de trois atmosphères, sont bien des nuages de gouttelettes d'eau analogues aux nuages tropicaux terrestres. Lorsque l'on comptabilise l'énergie résultant de la convection dans ces nuages, on constate qu'elle est suffisante pour entretenir les mouvements tourbillonnaires de l'atmosphère qui alimentent les vastes courants zonaux et les grands systèmes anticycloniques, telle la grande tache rouge.

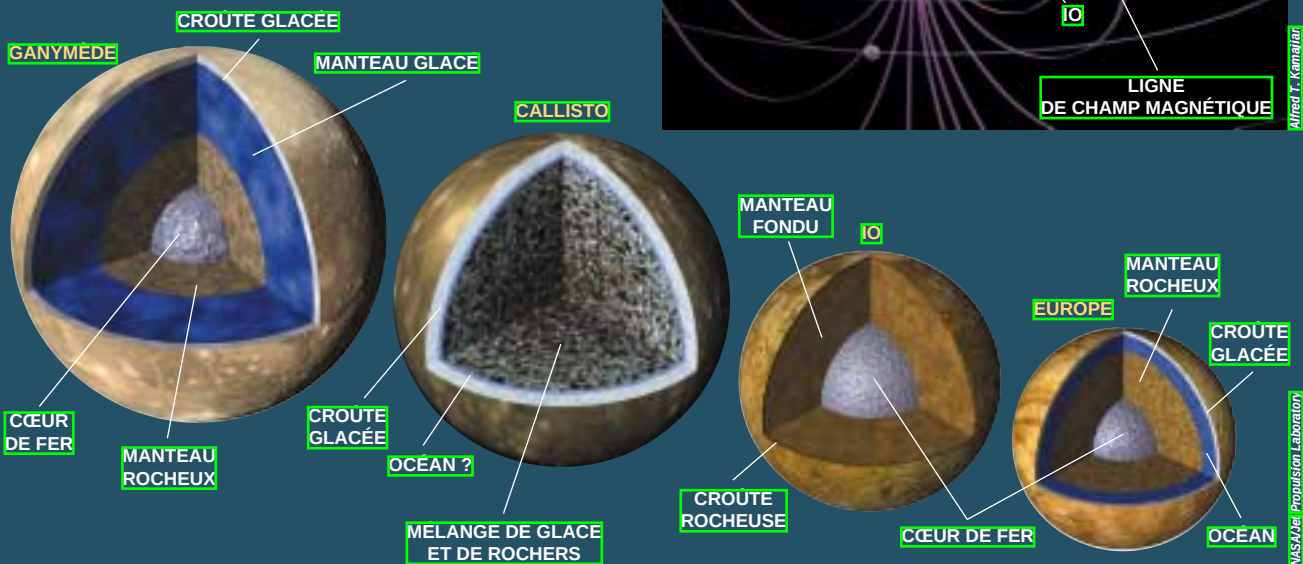
Le lien entre les nuages d'eau générateurs d'éclairs et la dynamique des tourbillons aidera à élucider les mécanismes responsables de la météorologie globale de Jupiter, encore fort mystérieux.

Pierre DROSSART, Observatoire de Meudon

Structure interne et champ magnétique des satellites galiléens

Les quatre satellites de Jupiter ne méritent pas vraiment d'être rabaissés au rang de simples «lunes», car, à de nombreux égards, ce sont de véritables planètes. Les deux objets les plus proches de Jupiter, Io et Europe, ont à peu près la même taille et la même densité que notre Lune. Les deux plus éloignées, Ganymède et Callisto, sont à peu près de la taille de Mercure, mais bien moins denses. La sonde *Galileo* n'a pas atterri sur ces astres, mais les astronomes déduisent leur structure interne à partir de mesures des forces gravitationnelles et des champs magnétiques. Parmi ces quatre objets, seule Callisto ne semble pas s'être différenciée en couches distinctes de métal, de roche et d'eau gelée. Les champs électromagnétiques de Jupiter interagissent avec les quatre satellites, mais plus particulièrement avec Io (schéma de droite). Les champs piègent et ionisent

du sodium provenant des éruptions volcaniques de Io, créant un tore de plasma. Un tube de flux reliant Jupiter à Io transporte un courant électrique dont l'intensité atteint cinq millions d'ampères (la planète et les satellites ne sont pas à l'échelle).

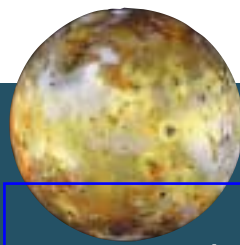


spécifiques et à la profondeur atteinte par la sonde, la composition des gaz serait analogue à celle de l'ensemble de l'atmosphère. Or, celle-ci ne semblait pas être telle que d'autres mesures l'indiquaient. Jupiter contenait-elle vraiment aussi peu d'oxygène et de soufre que le module le mesurait? Personne n'a pu expliquer comment ces éléments ont été éliminés si efficacement.

La composition des points chauds différerait-elle alors considérablement de celle du reste de l'atmosphère? Par exemple, un fort courant descendant de gaz froid et sec, en provenance de l'atmosphère supérieure, engendrerait-il la modification atmosphérique observée? Cette théorie comporte des difficultés, mais elle est aujourd'hui la plus plausible. En effet, juste avant que le module ne cesse d'émettre, les concentrations en eau, en ammoniac et en sulfure d'hydrogène augmentaient rapidement, comme si la sonde approchait la base d'un courant descendant. Les images d'un autre point chaud important, fournies par l'orbiteur, montrent que les vents convergent vers le centre du point chaud à partir de toutes les directions (voir l'illustration de la page 66). Le gaz ne peut aller que vers le bas. En outre, les spectres obtenus ont montré que les quantités d'eau et d'ammoniac varient d'un facteur 100 entre les différents points chauds, ce qui corrobore l'idée selon laquelle les conditions météorologiques locales déterminent la composition détaillée de l'atmosphère.

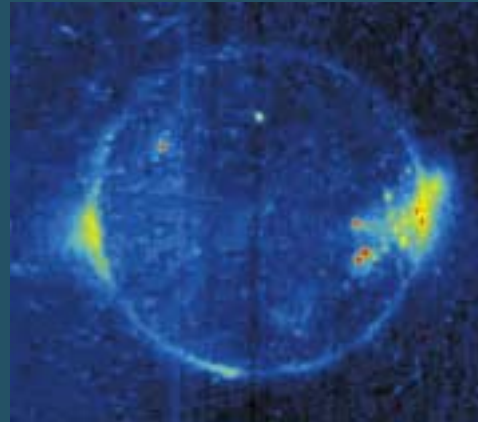
De la pluie sur toutes les planètes

Les prévisions étaient justes sur un point : le vent. Les bandes de nuages de Jupiter sont associées à des courants rapides, des vents d'Est et des vents d'Ouest soufflant à plusieurs centaines de kilomètres par heure. Sur la Terre, les vents analogues faiblissent près de la surface. Cependant, Jupiter n'a pas de surface, puisque c'est une planète formée de gaz. De ce fait, si une source d'énergie interne (comme l'énergie libérée par la contraction gravitationnelle) dominait, les vents devraient rester forts, voire s'accroître en profondeur. Inversement, si l'énergie était apportée principalement par une source externe (comme la lumière solaire), le contraire se produirait : comme sur la Terre, les vents faibliraient avec la profondeur. En descendant, le module atmosphérique observa que les vents

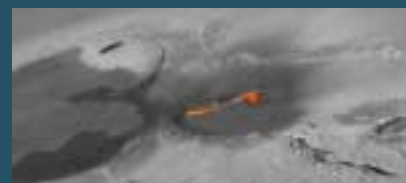
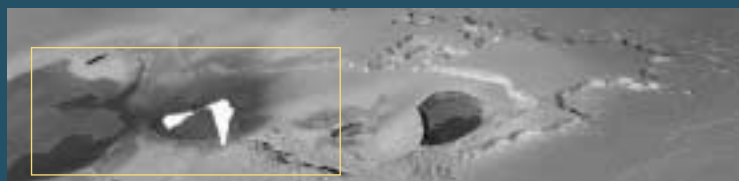
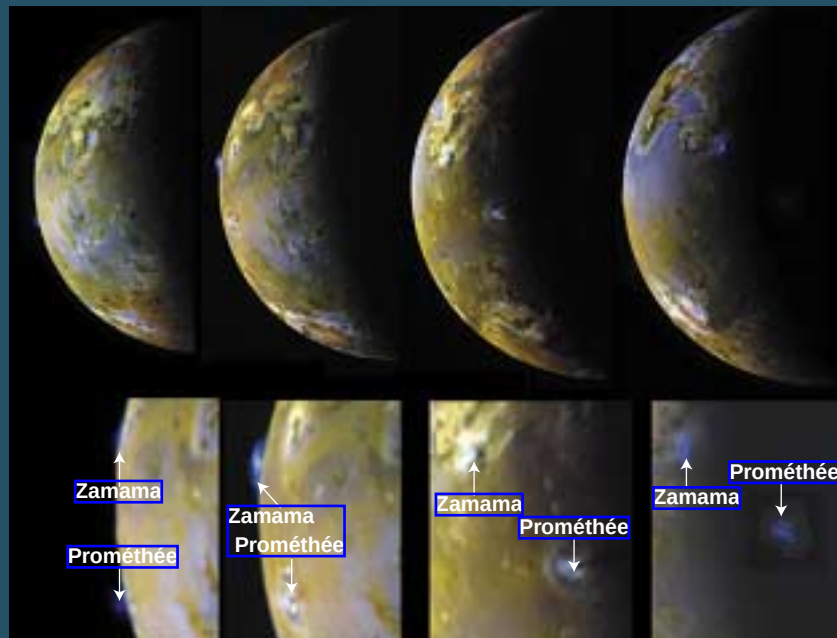


Io, le satellite infernal

La belle couleur rouge orangé qui caractérisait Io sur les images données par la sonde *Voyager*, il y a 20 ans, n'apparaît pas sur ces images en fausses couleurs obtenues par *Galileo*. Elles n'en sont pas moins spectaculaires. Lorsque le satellite se trouve dans l'ombre de Jupiter (*en haut*), les écoulements de lave sont visibles sous la forme de petites taches rouges et jaunes. Les panaches volcaniques apparaissent comme des lueurs sur le pourtour ; le panache de gauche s'échappe du volcan Prométhée. Une séquence de quatre images en couleurs renforcées (*au milieu*) montre les volcans Prométhée et Zamama : on voit d'abord apparaître des panaches, puis les volcans eux-mêmes, entourés d'anneaux de débris de plus de 100 kilomètres de diamètre. En novembre 1999, la sonde *Galileo* a obtenu des images du volcan Pelé dans le visible (*en bas à gauche*) et en infrarouge (*en bas à droite*). Au centre de cette dernière image se trouve un point rouge sombre : le rougeoiement de la lave au cœur du volcan.

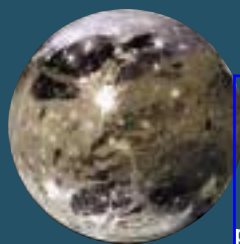


WST/Dei Propulsion Laboratory



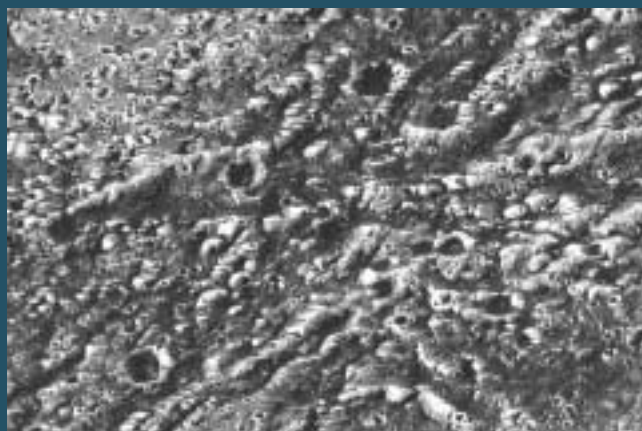
WST/Dei Propulsion Laboratory

Ganymède, mélange glacé

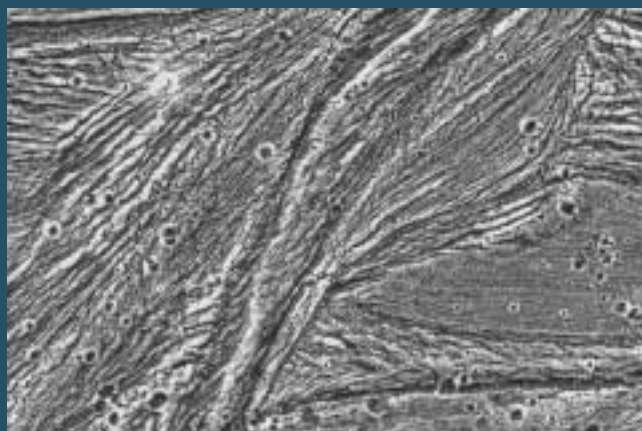


Le plus gros satellite du Système solaire est un étrange mélange de terrains sombres ou clairs. Les régions sombres, comme *Galileo Regio* (première image), comportent de nombreux cratères. Les sillons profonds pourraient contenir des pous-

sières laissées par la sublimation de la glace. Les régions claires, comme *Uruk Sulcus* (deuxième image), présentent moins de cratères, et davantage de caractéristiques tectoniques, tels des sillons. Cette image couvre environ 400 kilomètres de côté. Certaines régions, comme *Tiamat Sulcus* (troisième image), ici juste après le lever du Soleil, contiennent les deux types de terrain.



NASA Jet Propulsion Laboratory



NASA Jet Propulsion Laboratory

s'intensifiaient d'abord rapidement, puis se stabilisaient : l'atmosphère de Jupiter est régie par des sources d'énergie internes.

Bien que le module de descente n'ait détecté que peu de signes d'orages, l'orbiteur a vu les nuages illuminés par des éclairs brillants (voir l'illustration de la page 66). Comme *Voyager* l'avait fait avant elle, *Galileo* a observé que les éclairs étaient circonscrits à des latitudes précises. Ces zones sont des régions de cisaillement anticyclonique : les vents Est-Ouest y changent de vitesse de façon brusque du Nord au Sud. Ces changements d'intensité créent des conditions turbulentes et orageuses. Comme sur la Terre, des éclairs naissent dans des nuages où des grains de glace partiellement fondus s'élèvent et retombent dans la turbulence, ce qui sépare des charges positives et négatives. On estime la profondeur à laquelle l'éclair se produit d'après la taille de la tache illuminée sur les nuages : plus la tache est grande, plus la décharge est profonde. Les mesures de la sonde ont montré que les éclairs émanent des couches de l'atmosphère où sont censés se former des nuages d'eau. L'importance de ces phénomènes orageux confirme que toutes les régions de l'atmosphère ne sont pas aussi sèches que le site traversé par la sonde atmosphérique.

Le module a cessé d'émettre après avoir parcouru 0,1 pour cent de la dis-

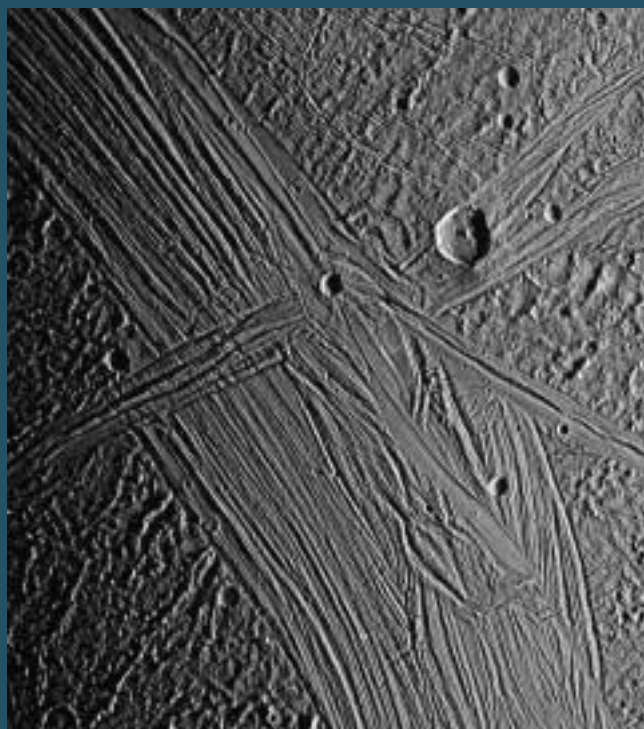
tance au centre : les fortes pressions et la température élevée l'ont ensuite détruit. Cependant, grâce à certaines de ses mesures, les astronomes entrevoient les profondeurs de l'atmosphère. Les concentrations en gaz rares – hélium (l'élément le plus abondant dans Jupiter après l'hydrogène), néon, argon, krypton et xénon – sont particulièrement instructives. Ces gaz ne réagissant pas chimiquement avec les autres éléments, ils indiquent les conditions physiques au sein de la planète. Notamment, la concentration en hélium est si révélatrice qu'un instrument de *Galileo* était consacré à sa mesure.

Les spectres infrarouges obtenus par *Voyager* indiquaient que l'atmosphère de Jupiter contenait proportionnellement beaucoup moins d'hélium que le Soleil. Les astronomes se perdaient en conjectures sur les mécanismes qui avaient vidé la haute atmosphère de cet élément. Toutefois, les mesures de *Galileo* ont montré que Jupiter renferme à peu près la même concentration en hélium que les couches externes du Soleil (voir l'illustration de la page 67). Ce nouveau résultat allège la difficulté, mais ne la résout pas complètement, car les couches externes du Soleil ont elles-mêmes perdu de l'hélium. Un mécanisme a dû appauvrir les couches externes de Jupiter en hélium, mais ce mécanisme a vraisemblablement démarré plus tard,

dans l'histoire de la planète, qu'on ne le supposait. Par ailleurs, les instruments de la sonde *Galileo* ont mesuré sur Jupiter une concentration en néon égale au dixième de la valeur solaire.

Ces deux résultats corroborent l'hypothèse, autrefois controversée, selon laquelle les profondeurs de Jupiter subissent un déluge d'hélium. Là, la pression est si considérable (des millions de fois la pression au niveau de la mer, sur la Terre) que l'hélium ne se mélange plus à l'atmosphère riche en hydrogène. L'hélium formerait alors un océan qui occuperait le centre de la planète. Dans certaines conditions, le néon se dissout dans les gouttes de pluie d'hélium. Selon les résultats de *Voyager*, l'hélium précipiterait de la même façon sur Saturne.

En revanche, après plusieurs années d'analyses, les planétologues ont récemment annoncé que Jupiter renferme les autres gaz rares en abondance. La planète gazeuse est plus riche que le Soleil en argon, en krypton et en xénon ; cet enrichissement est analogue à celui en carbone et en soufre. Pourquoi tant de gaz rares ? Le seul moyen de piéger de telles quantités de ces gaz rares serait par « congélation », ce qui n'est pas possible à la distance par rapport au Soleil à laquelle se trouve actuellement Jupiter. Par conséquent, une bonne partie des matériaux dont est constituée la planète proviendrait de régions plus froides et plus éloignées. Jupiter pourrait s'être



NASA/Jet Propulsion Laboratory



Ron Davis

formée plus loin que son orbite actuelle et s'être ensuite rapprochée du Soleil (voir *La migration des planètes*, de Renu Malhotra, *Pour la Science*, octobre 1999).

La mesure de la concentration en deutérium (l'un des isotopes de l'hydrogène, dont le noyau est composé d'un proton et d'un neutron) complète l'histoire de Jupiter. Sa concentration est sensiblement égale à celle que l'on mesure dans le Soleil, et bien différente de celle des comètes ou des océans terrestres. Ainsi, malgré les spectaculaires collisions de comètes dans l'atmosphère de Jupiter, telle celle de Shoemaker-Levy 9, en 1994, les comètes modifieraient peu la composition de l'atmosphère jovienne en deutérium.

Un monde de feu

Après avoir transmis les données du module de descente, l'orbiteur a entamé sa visite du système jovien. Aujourd'hui, il a effectué une trentaine d'orbites autour de la planète, avec plusieurs survols de chacun des quatre satellites galiléens. Europe a tenu la vedette, en raison de sa géologie de surface et d'autres caractéristiques qui semblent indiquer l'existence d'un océan sous sa glace de surface. Les autres satellites n'ont pas été négligés pour autant.

Le satellite galiléen le plus proche de Jupiter, Io, avait été l'attraction principale lors des deux rencontres avec les

sondes *Voyager*. Les images initiales montraient une surface qui semblait remarquablement jeune, parce qu'elle était la seule du Système solaire qui soit quasi dépourvue de cratères d'impacts. Puis des clichés ont montré d'immenses panaches dus à des éruptions. Des observations ultérieures ont confirmé que Io est déchirée par une activité volcanique intense. De même taille que la Lune, le satellite émet 100 fois plus de laves que la Terre.

La sonde *Galileo* a moins observé Io que les autres satellites, en grande partie en raison des radiations qui pourraient endommager la sonde : Io se trouve à l'intérieur des ceintures de rayonnement intense de Jupiter. La sonde est passée à 900 kilomètres de la surface de Io juste avant de se mettre en orbite autour de Jupiter, en 1995, mais elle n'a revisité le satellite qu'en octobre 1999, une fois l'essentiel de la mission accompli et les scientifiques prêts à prendre plus de risques.

Lors du premier passage, une panne momentanée du système de stockage de données (blocage du dérouleur de bande magnétique) avait contraint les scientifiques à bloquer les systèmes d'imagerie et de spectroscopie, mais le détecteur de particules et le magnétomètre étaient restés actifs. Ces instruments ont montré que l'«espace vide» autour de Io regorge de particules et de gaz crachés par les éruptions volcaniques et aspirés

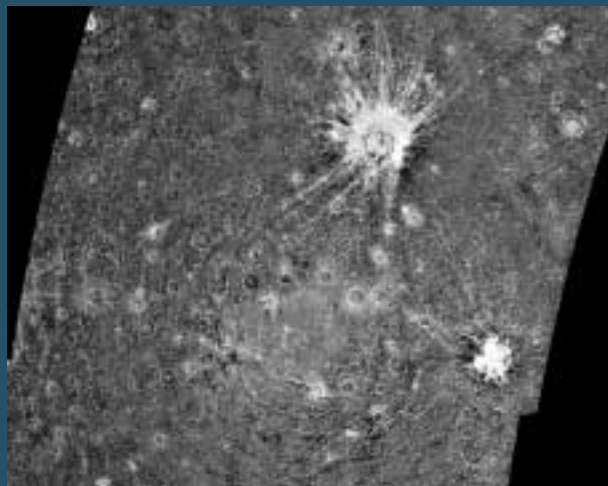
par le champ magnétique de Jupiter. Des faisceaux d'électrons suivent les lignes de champ qui relient Io à l'atmosphère de Jupiter ; des plasmas denses et froids s'infiltreraient dans le sillage laissé derrière Io par le balayage des champs magnétiques. À chaque passage de Io dans l'ombre de Jupiter, *Galileo* a vu, dans l'atmosphère de Jupiter, un anneau de gaz rougeoyant formé par le choc des électrons accélérés contre les molécules de l'atmosphère jovienne. Autrement dit, Io est étroitement liée à la planète géante par le plus vaste circuit électrique du Système solaire (voir l'illustration de la page 68).

Pendant l'essentiel de sa mission, *Galileo* a étudié la surface ravagée de Io à bonne distance. À partir de la luminosité des volcans à différentes longueurs d'onde, dans le domaine visible et dans le proche infrarouge, les planétologues ont estimé leur température, afin de déterminer la composition des laves. La plupart des volcans terrestres déversent une lave de composition basaltique (des silicates de fer, de magnésium et de calcium, comme l'olivine et le pyroxène) ; les coulées basaltiques ont des températures comprises entre 1 300 et 1 450 kelvins (1 027 à 1 177 °C). Les premières mesures de température de Io, obtenues à l'aide de télescopes au sol, il y a plusieurs années, indiquaient des valeurs comprises entre 1 500 et 1 800 kelvins. Ces analyses éliminaient l'hypothèse que les laves

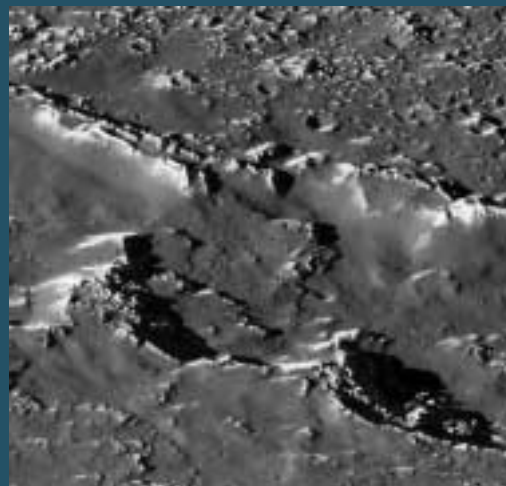


Une surface cratérisée : Callisto

Callisto est le plus déroutant des satellites galiléens. Sa surface est criblée de grands cratères, comme le *Valhalla*, énorme structure d'impact à plusieurs anneaux (à gauche). Pourtant, le satellite est relativement dénué de petits cratères, et ceux-ci ont des contours flous (image de droite), ce qui suggère une surface balayée par des poussières.



NASA Jet Propulsion Laboratory



NASA Jet Propulsion Laboratory

de Io soient composées de substances qui sont gazeuses à ces températures, comme le soufre, qui avait été pressenti jusque-là comme le fluide volcanique dominant sur Io.

Les mesures de *Galileo* ont renforcé l'énigme : les laves de Io ont des températures comprises entre 1 700 et 2 000 kelvins. La Terre n'a plus connu de magma à une telle température depuis trois milliards d'années. Aussi Io montre-t-elle peut-être comment était la Terre dans sa jeunesse, quand ses températures internes étaient supérieures et que la composition de son manteau différait de celle d'aujourd'hui.

Lorsque l'orbiteur est finalement retourné à proximité de Io, à l'automne 1999, les ingénieurs doutaient que l'engin survivrait au rayonnement. Lors de l'un de ses passages, il interrompit de son propre chef la séquence d'enregistrement de données quatre heures seulement avant d'atteindre Io, et l'équipe scientifique réinitialisa en catastrophe. Quelques instruments furent endommagés, mais tous continuèrent à fonctionner. Les volcans actifs de Io étaient enfin examinés de près (voir l'illustration de la page 69).

Un champ bien à elle

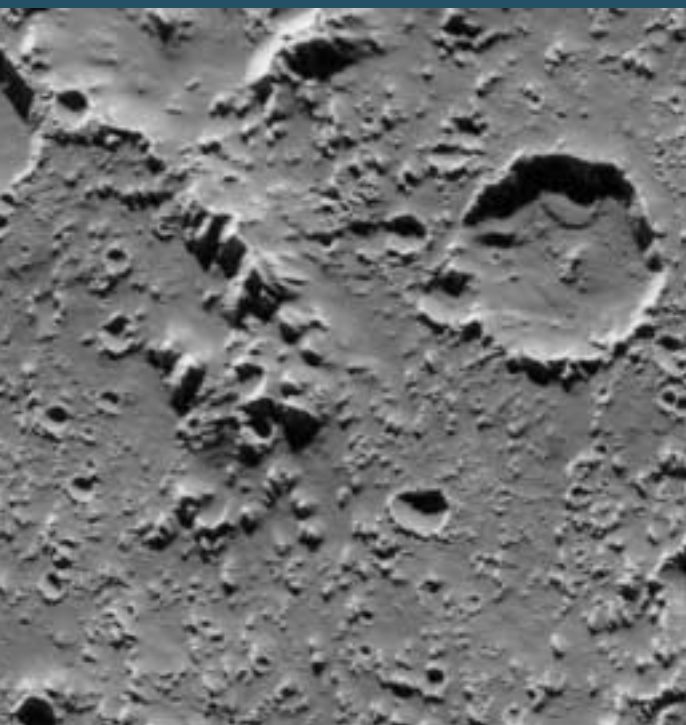
L'une des principales découvertes de *Galileo* a été faite lors de sa première rencontre orbitale avec Ganymède, le

plus gros satellite de Jupiter. Environ une demi-heure avant que la sonde ne s'approche au plus près de Ganymède, l'instrument qui enregistre les champs électriques ambiants commença à s'affoler. Au calme fond d'émission radio qui était observé presque partout dans le système jovien succédait une émission radio complexe et active. Pendant 45 minutes, l'activité resta intense, puis elle cessa aussi brusquement qu'elle avait commencé. Simultanément, le magnétomètre avait enregistré des signaux plus intenses.

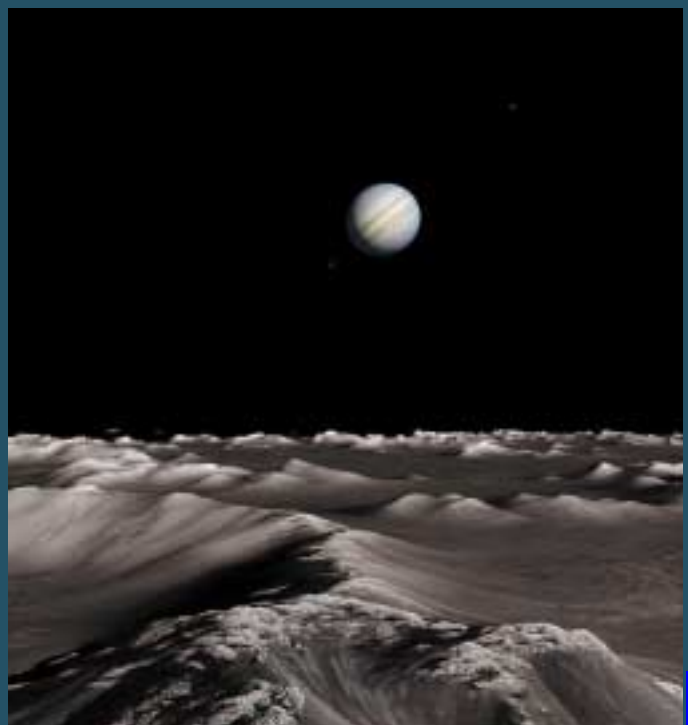
Les physiciens des plasmas avaient déjà observé de pareils signaux lorsque les vaisseaux spatiaux entraient et sortaient des magnétosphères de la Terre, de Jupiter, de Saturne, d'Uranus et de Neptune. Deux survols ultérieurs de Ganymède ont confirmé leurs soupçons : ce satellite engendre un champ magnétique dipolaire semblable à ceux des planètes précitées. Aucun autre satellite ne possède un tel champ. Mars ou la Lune ont peut-être possédé naguère un champ magnétique, mais, aujourd'hui, leur champ magnétique est très faible : il ne semble dû qu'à l'aimantation de roches de surface. Au total, le Système solaire serait une poupée gigogne magnétique : Ganymède a une magnétosphère qui est contenue dans la gigantesque magnétosphère de Jupiter, qui est elle-même contenue dans celle du Soleil (voir l'illustration de la page 70).

En stockant en continu les signaux de la sonde, les planétologues ont exploré le champ gravitationnel de Ganymède et, donc, sa structure interne : le satellite possède probablement un noyau dense d'un rayon de 1 500 kilomètres environ, entouré d'un manteau de glace d'une épaisseur de 900 kilomètres et d'une croûte de 200 kilomètres. Les modèles géochimiques indiquent que ce noyau est une sphère constituée de fer ou de sulfure de fer, entourée de roches. Ce noyau interne métallique semble engendrer le champ dipolaire, mais comment ?

L'analogie classique entre les champs magnétiques planétaires et ceux qui émanent de barreaux aimantés est trompeuse : du fer solide au centre d'une planète ou d'un gros satellite serait trop chaud pour conserver un champ magnétique permanent. La génération d'un champ magnétique résulte plutôt des mouvements d'un liquide conducteur, ce que les physiciens nomment l'effet dynamo. Les modélisations de Ganymède montrent que son intérieur peut être assez chaud pour que le fer ou le sulfure de fer de son intérieur soit fondu. Les mêmes modèles montrent que la convection, c'est-à-dire les mouvements verticaux analogues à ceux de l'eau dans une casserole d'eau bouillante, cesse avec le refroidissement progressif du noyau : sans source de chauffage externe, la



NASA Jet Propulsion Laboratory



Ron Davis

convection aurait dû cesser il y a plus de trois milliards d'années, et le champ magnétique devrait être éteint.

L'activité de Ganymède est-elle due aux «résonances» orbitales entre les trois satellites galiléens internes? Io fait précisément quatre fois le tour de Jupiter quand Europe effectue deux révolutions, et Ganymède une. De même qu'une balançoire a des mouvements plus amples lorsque les poussées s'exercent en phase avec son oscillation naturelle, la résonance engendrerait de grands effets à partir de petites forces. Les orbites des satellites, notamment, seraient allongées. La distance qui sépare les satellites et Jupiter changeant continuellement, l'influence de la gravité de Jupiter croît et décroît, de sorte que les marées solides sur ces objets seraient notables. Ce mécanisme de chauffage par effet de marées expliquerait l'intensité du volcanisme sur Io et empêcherait l'océan d'Europe de prendre en glace.

On pensait naguère que ce mécanisme chauffait peu Ganymède, le plus extérieur de ces trois satellites, mais on admet aujourd'hui que les orbites ont pu varier : par le passé, l'effet des résonances était peut-être plus fort, et l'orbite de Ganymède plus perturbée. Les immenses failles qui parcourent sa surface seraient la trace de cette période révolue de chauffage intense. Dans cette hypothèse, Ganymède se refroidirait

encore, et son noyau liquide, soumis à des courants de convection, produirait encore un champ magnétique.

Vieux, mais pas terne

Comparé aux éblouissantes Europe, Io et Ganymède, le satellite galiléen le plus extérieur, Callisto, avait toujours semblé assez ennuyeux. Les images que nous en avait données *Voyager* correspondaient exactement au stéréotype du satellite de glace : une vieille boule de boue gelée et grêlée. Toutefois, les observations de *Galileo* nous dévoilent une histoire fort mouvementée.

Callisto est couverte de marques d'impacts de tailles variées : certains cratères ont quelques kilomètres de large, tandis que le «palimpseste Valhalla» a un diamètre qui atteint 1 500 kilomètres. Sa surface date du déluge de météorites et de comètes qui a suivi la formation des planètes et de leurs satellites, il y a plus de quatre milliards d'années. En ce sens, Callisto a un terrain très ancien. En l'examinant de plus près, on s'aperçoit que Callisto est recouvert de débris sombres, très fins. Les petits cratères, abondants sur la plupart des autres corps célestes, sont quasi absents de la surface du satellite. Les reliefs semblent atténués par l'érosion. Quels mécanismes plus récents ont-ils remodelé la surface? Une lévitation électrostatique de la poussière fine l'a-t-elle fait s'écouler sur la

surface? Ou bien l'évaporation de glaces de surface a-t-elle laissé des dépôts de matériaux plus sombres et moins volatils? Aucune explication n'est encore complètement satisfaisante.

Curieusement, les spectres en proche infrarouge révèlent, en plus de la glace d'eau et des minéraux hydratés attendus, quatre motifs d'absorption inhabituels, à une longueur d'onde voisine de quatre micromètres. Le premier proviendrait de dioxyde de carbone piégé dans la surface. Deux autres motifs spectraux correspondent vraisemblablement à du soufre qui proviendrait des éruptions volcaniques de Io. Le quatrième système de raies spectrales est le plus étrange. Sa longueur d'onde correspond à des liaisons chimiques entre un atome de carbone et un atome d'azote. On retrouve ces caractéristiques spectroscopiques avec des molécules organiques complexes qui ont été nommées «tholins» par Carl Sagan et qui ressemblent aux constituants organiques de la nébuleuse solaire (les nuages de grains de glaces interstellaires ont des spectres comparables). L'ensemble de ces données fournit la première preuve directe que les satellites de glaces contiennent les composés à base de carbone, d'azote et de soufre que l'on trouve habituellement dans les comètes et dans les météorites primitives. Ces matériaux ont peut-être contribué au développement de la vie sur la Terre.

La structure interne de Callisto est aussi paradoxale que sa surface : le grand âge et la jeunesse s'y côtoient. Contrairement aux autres satellites galiléens, sa densité semble relativement homogène, signe que la majeure partie des glaces et des roches qui le constituent sont mélangées : le satellite n'a pas de noyau. Selon cette hypothèse, l'intérieur de Callisto n'a jamais été chauffé beaucoup, ni par des désintégrations radioactives ni par des marées solides. À l'inverse des autres satellites galiléens, ce satellite ne subit les effets d'aucune résonance orbitale.

Pourtant Callisto est loin d'être un corps inerte. Le magnétomètre de *Galileo* a détecté que le satellite perturbe le champ magnétique jovien d'une façon très particulière. Cette perturbation, différente de celle de Ganymède, s'apparente à ce que l'on observe dans les expériences de physique lorsque l'on soumet une sphère de cuivre creuse à un champ magnétique variable : ces champs provoquent la circulation de courants électriques dans l'enveloppe conductrice de la sphère, ce qui engendre ensuite un champ magnétique exactement opposé au champ imposé. Le champ magnétique de Callisto serait induit d'une manière analogue.

Quelle serait la composition de la couche conductrice d'électricité ? Les roches, la glace et les particules ionosphériques sont de mauvais conducteurs. Reste une possibilité qui aurait semblé farfelue il y a peu : un océan d'eau salée couvrirait la surface du satellite. On a calculé qu'une couche d'eau de mer d'une épaisseur de quelques dizaines de kilomètres expliquerait les mesures magnétiques. Cette coexistence d'un intérieur relativement indifférencié et d'un océan de surface intrigue les théoriciens. Callisto doit être assez chaude pour abriter un océan, mais pas trop chaude, sans quoi les matériaux lourds et légers se dissocieraient.

La couche aqueuse pourrait se trouver en sandwich entre un intérieur chauffé par la radioactivité, où les maté-

riaux resteraient mélangés par convection, et un mince manteau de glace, où un cycle de convection différent refroidirait l'océan.

Bien que la mission *Galileo* se soit concentrée sur l'étude des satellites galiléens, l'orbiteur n'a pas négligé les membres moins importants de la famille jovienne. Ses capteurs ont enregistré des images des quatre petits satellites intérieurs : Métis, Adrasteé, Amalthée et Thébé, par ordre de distances croissantes à Jupiter. D'après les images, ces petits satellites sont directement responsables des anneaux de Jupiter. Une série de photographies, prises alors que la sonde se trouvait dans l'ombre de Jupiter, a montré les minuscules particules de poussières de ces anneaux éclairées par la lumière solaire arrière. Ces images montrent les anneaux principaux et l'anneau ténu et filamenteux déjà observés par *Voyager* en 1979. Elles révèlent aussi la structure complexe de l'anneau filamenteux. Il est constitué de nombreuses couches directement reliées aux orbites de Thébé et d'Amalthée. Ainsi, les anneaux sont probablement constitués de débris microscopiques expulsés de ces satellites par les impacts de minuscules météorites.

Les données recueillies par *Galileo* ont radicalement modifié la vision que l'on avait du système jovien. Le système semblait simple ; on sait maintenant qu'il a une complexité comparable à celle du Système solaire tout entier. Avec les survols de *Voyager*, on avait connu l'excitation du premier regard sur un monde inconnu, mais seule l'étude détaillée faite par *Galileo* pouvait en faire découvrir toutes les nuances, et montrer les limites des catégories simplistes comme les «nuages porteurs d'orages» et les «satellites de glace». Bientôt, nous découvrirons le système de Saturne : une autre sonde, *Cassini-Huygens*, l'atteindra en 2004. Là encore, les planétologues s'attendent à obtenir quelques réponses, et beaucoup de questions...

Torrence JOHNSON travaille au Laboratoire pour la propulsion spatiale à Pasadena, en Californie.

Thérèse ENCRENAZ, *Les planètes géantes*, Belin, 1996.

Galileo Orbiter, section spéciale de *Science*, vol. 274, pp. 377-413, 18 octobre 1996.

Remote Sensing of the Galileo Orbiter

Mission, numéro spécial d'*Icarus*, vol. 135, n° 1, septembre 1998.

André BRAHIC, *Enfants du Soleil*, Odile Jacob, 1999.

The New Solar System, quatrième édition, sous la direction de J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Peterson et Andrew Chalkin, Sky Publishing, 1999.

Matériaux numériques et dégradation virtuelle

JULIE DORSEY • PAT HANRAHAN

Les ordinateurs formeront des images plus réalistes quand on décrira mieux la structure physique des matériaux et que l'on saura simuler leur dégradation par l'environnement.

En 1995, l'infographie franchit une étape décisive avec la réalisation du film d'animation *Toy Story* : pour la première fois, un long-métrage est entièrement fait sur ordinateur. Toutefois, les décors et les personnages «numériques» qui sont créés pour ce type de production ont souvent un aspect trop parfait, irréel. Tout est un peu trop lisse, trop propre, comme si des personnages de plastique sortaient de leur moule. Il manque la saleté et la poussière, les fissures et les rayures, le filet de rouille sur le mur à côté du tuyau percé, les plaques de vert-de-gris sur une statue de cuivre ancienne, les nuances subtiles de la peau humaine, avec ses taches de rousseur, ses pores, ses rides, sa couperose... Bref, il manque la marque du temps.

L'équipe de la Société Pixar qui a réalisé le long-métrage *Toy Story 2*, à la fin de 1999, a ajouté des effets d'«usure» tels que des rayures et de la saleté, en peignant des motifs sur des surfaces. Malheureusement, cette technique conçue au coup par coup allonge notablement les temps de calcul. Ni l'application des techniques existantes, ni le recours à davantage de puissance de calcul ne suffiront à faire perdre aux personnages obtenus par infographie leur apparence cireuse. Afin de créer des simulations qui n'aient pas l'air d'en être, les infographistes doivent apprendre à modéliser l'apparence des matériaux dans toute leur variété, avec des traces

d'usure et de salissure convaincantes. Les techniques de simulation d'éclairage comme le lancer de rayons et la «radiosité» augmentent le réalisme des scènes grâce à des effets d'éclairage tamisé et à des reflets, mais la complexité des images ainsi produites et, donc, la qualité du rendu dépendent avant tout d'une bonne compréhension du comportement optique des matériaux.

Le réalisme de ces modèles ne cesse de s'améliorer, en partie parce que l'on modélise explicitement la structure interne des matériaux : on simule la propagation et la dispersion de la lumière sous la surface. On modélise également mieux l'évolution des surfaces lors des mécanismes de vieillissement tels que la corrosion, qui crée des couches irrégulières d'oxydes et, à terme, détache des morceaux de la surface. Les infographistes cherchent aujourd'hui à créer une palette d'outils logiciels afin de «passer une couche» de ces mécanismes physiques,

1. LA FORMATION D'UNE PATINE sur une statue de Bouddha en cuivre est simulée à l'aide d'une série de couches qui représentent la structure physique de la surface. L'algorithme décrit l'oxydation de la couche supérieure et l'élimination de morceaux de matériaux endommagés, comme le feraient le vent et la pluie. L'interaction de la lumière avec les couches superposées détermine l'apparence finale.



Les techniques de création d'images et de rendu ne sont plus l'apanage de l'industrie du spectacle : la Société

Boeing a utilisé les techniques de rendu destinées aux systèmes de réalité virtuelle dans la conception de son modèle 777 ; les architectes et les urbanistes utilisent les techniques de rendu pour mieux juger de l'impact visuel des bâtiments proposés sur leur voisinage.

Qu'est-ce qui donne son apparence au monde réel? Au XVII^e siècle, Rembrandt et d'autres artistes hollandais et flamands ont appris à



reproduire les nuances naturelles de la peau humaine, à l'aide de couches successives de peinture et de laque. Au XIX^e siècle, le physicien anglais Lord Rayleigh identifia les principes optiques à la base de la couleur bleue du ciel, des irisations des ailes de papillon ou du lustre des surfaces polies. Aujourd'hui, les infographistes combinent intuitions et théories pour obtenir des simulations informatiques des mécanismes qui engendrent toute la gamme des apparences.

Pour créer des images réalistes, on doit modéliser la lumière et ses interactions avec l'environnement : les objets du décor, les accessoires et les personnages. On doit tenir compte des diverses sources lumineuses et analyser les scènes du point de vue d'une caméra virtuelle : une fois une scène définie, le programme de rendu calcule les chemins suivis par la lumière, des sources lumineuses jusqu'à la caméra (voir la figure 5).

Plusieurs algorithmes simulent la propagation de la lumière. Avec celui de radiosité, on décrit comment la lumière réfléchiée par les surfaces mates éclaire leur environnement. Avec celle du lancer de rayons, on cherche la trajectoire des rayons lumineux à partir de l'observateur, en calculant ses réflexions sur les surfaces. Aujourd'hui, la technique de pointe est le lancer de rayons stochastique : les rayons lumineux qui arrivent sur une surface sont réfléchis aléatoirement dans différentes directions, avec des probabilités qui prennent en compte les propriétés des surfaces ou d'autres facteurs de l'environnement (la brume, par exemple). Cette technique simule efficacement l'interaction de la lumière avec des objets aux formes variées et avec des types de matériaux différents.

Les premières méthodes de rendu de surface ont été mises au point dans les années 1970 à l'Université de l'Utah. Les formes étaient souvent simplifiées : on les approchait par des triangles jointifs. Henri Gouraud, alors jeune étudiant français parti faire une thèse outre-Atlantique, a mis au point un modèle où le sommet de chaque triangle était d'une couleur donnée et la couleur de la lumière réfléchiée était interpolée sur le triangle. Lance Williams et Edwin Catmull (qui fonda ensuite la Société Pixar) ont été les premiers à proposer le plaquage de texture, où la couleur d'un objet résulte d'une image



Fat Harradine et Wolfgang Kröner

2. LA PEAU HUMAINE est très difficile à simuler. Pour obtenir cette image, on a calculé l'interaction de la lumière avec l'épiderme (en surface) et avec le derme, fortement irrigué, situé en dessous. Les lèvres, par exemple, sont roses parce que l'épiderme y est très mince. Les données utilisées pour cette image ont été obtenues par les techniques de résonance magnétique nucléaire.

qui est plaquée sur une représentation en trois dimensions de la surface de l'objet, comme le collage d'une décalcomanie sur une maquette en plastique.

Les premiers algorithmes de réflexion de la lumière sur les objets décrivaient les aspects essentiels de l'apparence des objets à partir de formules simples, sans considérer le comportement réel de ces objets. Ces algorithmes de réflexion «phénoménologiques» utilisent une fonction mathématique nommée «fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle». À chaque matériau, on associe une fonction particulière. Par exemple, certaines fonctions correspondent aux matériaux mats, tel le carton, qui dispersent la lumière de manière isotrope (c'est la loi de réflexion de Lambert). D'autres s'appliquent aux miroirs parfaits, qui réfléchissent un rayon lumineux dans une seule direction (voir la figure 6). Entre ces extrêmes, les surfaces brillantes émettent de la lumière dans des directions centrées autour de la direction de réflexion spéculaire. On modélise ces surfaces en ajustant les tailles des taches réfléchies les plus brillantes.

L'infographie classique traite séparément la texture et les reflets. En fait, pour la plupart des matériaux, la texture visuelle est plus distinctive que les propriétés de réflexion, d'où l'importance de savoir engendrer et utiliser des

textures afin de calculer la réflexion en différents points d'une surface. Deux techniques très utilisées créent des combinaisons de texture et de réflexion : d'une part, les modèles procéduraux pour lesquels le résultat obtenu dépend de l'évaluation de fonctions prédéfinies, et, d'autre part, la peinture interactive en trois dimensions.

Dans un modèle procédural, un programme calcule et engendre le motif souhaité. Par exemple, on représente le bois à partir d'un système de cylindres. Ce système de base détermine alors la couleur et l'intensité de la lumière réfléchiée par des pièces découpées dans le bois, des pieds de table par exemple. À l'inverse, dans la peinture directe en trois dimensions, l'ordinateur simule l'application d'une peinture sur un objet tridimensionnel. Les propriétés de la peinture déterminent l'apparence du matériau, et le motif est obtenu par l'application de coups de pinceau sur différentes parties de l'objet. Cette technique est très appréciée dans l'industrie du film d'animation, car elle est naturelle et intuitive pour l'artiste, qui visualise alors instantanément les modifications apportées.

Ces approches, quoique puissantes, ont leurs limites, notamment en raison du considérable travail manuel qu'elle impose : la peinture d'un motif complexe sur un bâtiment de pierre requiert des jours de travail. Des méthodes algorithmiques seraient clairement utiles en pareil cas. Par ailleurs, à mesure que les images numériques se banalisent, la gamme d'apparences à simuler s'élargit. Les techniques spécifiques à certains objets et à certaines applications atteignent vite leurs limites. La volonté de dépasser ces limites a conduit les informaticiens à intégrer davantage d'informations sur la structure des matériaux et sur l'interaction de la lumière avec la matière.

Du lisse au rugueux

La rugosité d'une surface, par exemple, modifie l'aspect d'un matériau. Une surface métallique brossée ou usinée comprend souvent de fines rayures. Un tissu contient des fibres entrecroisées (la trame et la chaîne), qui créent des différences de niveau. Les caractéristiques d'une surface peuvent également évoluer ; par exemple, quand on polit une surface, les aspérités disparaissent, d'où un aspect plus brillant.

À l'échelle microscopique, on obtient une surface rugueuse en modifiant de façon systématique une surface moyenne. On décrit les perturbations soit par une fonction aléatoire qui possède des propriétés statistiques données, soit par une carte détaillée des structures microscopiques de la surface.

Au XVIII^e siècle, le géophysicien français Pierre Bouguer a étudié le premier les reflets des surfaces rugueuses. Il pensait qu'une surface était un assemblage de nombreuses facettes microscopiques, ou «microfacettes». La quantité de lumière réfléchie vers un observateur dépendait de la proportion de microfacettes alignées de sorte qu'elles réfléchissent la lumière de la source vers l'observateur. Bouguer espérait expliquer la loi de Lambert, qui décrit l'apparence des surfaces mates, en construisant un arrangement de microfacettes qui réfléchirait la lumière de la même manière dans toutes les directions, mais il n'y parvint pas.

Toutefois, les microfacettes se sont imposées pour la représentation des surfaces spéculaires ou brillantes. Les simulations infographiques de la réflexion spécifient directement la répartition des orientations de microfacettes. Le plus souvent, on utilise une répartition simple : un paramètre de rugosité définit le degré de déviation

des microfacettes par rapport à la forme générale de la surface.

Même pour des surfaces brillantes, les techniques fondées sur la répartition des microfacettes ont leurs limites. Par exemple, lorsqu'un rayon lumineux atteint une surface rugueuse avec un angle d'incidence faible, les reliefs engendrent une ombre importante, qui change radicalement l'apparence de la surface. Or, ces effets d'ombre de la surface sur elle-même sont difficiles à calculer. Lorsque la longueur d'onde du rayon lumineux devient comparable à la taille des microreliefs, le problème est encore plus ardu : le modèle de réflexion de Bouguer n'est plus applicable, car les effets ondulatoires, telles la diffraction et les interférences, interviennent.

Prendre le problème en profondeur

Pour de nombreux matériaux, la réflexion ne se résume pas à la simple interaction de la lumière avec la surface, c'est-à-dire avec l'interface de l'air et du matériau. Des interactions à l'intérieur du matériau entrent en jeu. Ce phénomène de dispersion sous la surface est courant dans les matériaux organiques, tels les plastiques. La profondeur d'interaction de la lumière est comprise entre

quelques micromètres (dans le cas de la peinture et d'autres enduits) et plusieurs millimètres (dans le cas de la peau ou du marbre).

Lors d'une réflexion sous la surface, la lumière pénètre au sein du matériau. À l'intérieur, la lumière est diffusée et absorbée par les constituants du milieu, atomes ou molécules. Ce phénomène est comparable à l'interaction de la lumière avec une nappe de brume constituée de gouttelettes d'eau. Une partie de la lumière diffusée revient à la surface et ressort du milieu, donnant à l'observateur l'impression qu'il s'agit de lumière réfléchie. La plupart des diffusions dévient la lumière d'un angle bien inférieur à 90 degrés, et de nombreuses diffusions de ce type sont parfois nécessaires pour renvoyer la lumière vers l'extérieur. Quand le nombre de déviations est grand, avant l'absorption de la lumière, la direction de propagation de la lumière devient aléatoire. Ce mécanisme, qui explique pourquoi la lumière ressort du matériau suivant une direction aléatoire, est celui que traduit la loi de Lambert.

Les physiciens ont d'abord mis au point la théorie de la dispersion dans les milieux stratifiés afin d'expliquer le transport radiatif (le mouvement de la chaleur et de la lumière par rayonnement) dans les atmosphères solaires



3. LE RUISSELLEMENT DE LA PLUIE modifie l'apparence des matériaux. À l'aide d'un algorithme qui décrit l'écoulement des particules d'eau sur une surface (ci-dessus au centre), on simule l'altération d'une Vénus de Milo couverte de poussière (ci-dessus à droite) et d'une façade (à droite).



PHOTOS : D. DE DOSSY / ARTS DÉCORATIFS / ART DÉCORATIF

et planétaires. Cette théorie a été reprise et étendue par des informaticiens intéressés par l'apparence de la peinture, de la peau, de la végétation et des océans. Ces modèles ont été récemment adaptés à l'infographie. Leur efficacité

et leur universalité est remarquable : ils décrivent aussi bien un mur fraîchement peint que les nuances du teint d'un visage humain, qui sont respectivement les textures les plus simples et les plus complexes à modéliser.

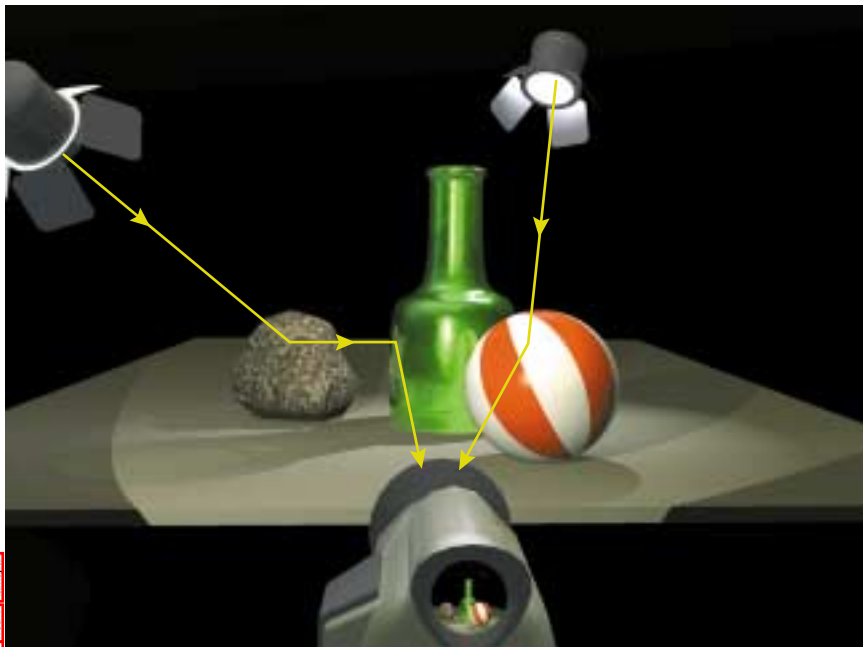
Ceux qui ont déjà acheté de la peinture savent que la peinture de couleur se prépare à partir de peinture blanche. La blancheur de la peinture blanche lui est conférée par du dioxyde de titane, qui diffuse très bien la lumière et ne l'absorbe presque pas. Lorsque la lumière tombe sur une surface peinte en blanc mat, les rayons lumineux pénètrent dans la couche de peinture et sont diffusés par les particules de dioxyde de titane en suspension dans le liant avant de ressortir de la peinture. La blancheur de la surface résulte de la très faible absorption de la lumière et de l'égale restitution des différentes longueurs d'onde du domaine visible. Les multiples diffusions, à l'intérieur de la peinture, font perdre à la lumière la mémoire de sa direction initiale : la direction résultante est aléatoire, ce qui donne l'aspect mat.

Une peinture de couleur s'obtient par le mélange d'une petite quantité de pigment à la peinture blanche. Ces pigments sont des composés qui absorbent certaines longueurs d'onde. Puisque les pigments sont en suspension dans un milieu diffusant presque parfait, la lumière finit par interagir avec un pigment et elle est partiellement absorbée : la lumière qui ressort a la couleur qui correspond aux longueurs d'onde qui n'ont pas été absorbées. Ce mécanisme a été modélisé pour la première fois par Paul Kubelka et Franz Munk en 1931. En supposant que le milieu contient des particules qui dispersent et absorbent la lumière de manière isotrope, ils déduisaient la couleur et l'intensité de la lumière ressortant du milieu selon son épaisseur et sa concentration en pigment.

Le modèle Kubelka-Munk est le modèle de réflexion sous la surface le plus simple et le plus utilisé. Toutefois, comme il suppose une diffusion isotrope, il ne s'applique qu'aux matériaux mats. Pour prendre en compte la réflexion dans des directions privilégiées, comme c'est le cas des surfaces brillantes, on a mis au point d'autres modèles où l'on sépare la lumière en deux composantes. La première correspond à la lumière qui ressort du matériau après une diffusion unique, et la seconde correspond au reste de la lumière, qui subit de multiples diffusions. Comme dans le modèle Kubelka-Munk, on suppose que la lumière diffusée plusieurs fois obéit à la loi de Lambert, alors que la lumière issue d'une diffusion unique



4. L'USURE D'UN SPHINX DE GRANIT est simulée à l'aide d'une coque épaisse (cartouche). On a calculé comment l'eau et les molécules qui y sont dissoutes pénètrent la coque et réagissent chimiquement avec la pierre ; simultanément, des sels recristallisent dans la croûte érodée.



5. L'INTERACTION DE LA LUMIÈRE avec son environnement doit être simulée pour obtenir des images informatiques réalistes. L'environnement comprend des sources lumineuses, des objets et des caméras qui observent la scène. La simulation doit prendre en compte la réflectivité des surfaces et l'absorption de la lumière par les métaux.

est renvoyée selon la loi de diffusion de la particule concernée.

À l'aide de ces idées, nous avons modélisé la peau et résolu aussi un problème important de l'infographie. Le rendu de la peau est particulièrement difficile, à la fois parce qu'elle possède une structure complexe et parce que le système de vision humain a acquis une aptitude particulière pour discriminer les visages : nous obtenons un aspect plus proche de la réalité que pour les autres objets. Les modèles de diffusion sur des couches superposées surmontent ces difficultés avec efficacité.

La peau humaine est constituée de deux couches principales : le derme, à l'intérieur, et l'épiderme à l'extérieur. Le derme contient beaucoup de sang, ce qui le rend rouge. L'épiderme, beaucoup plus mince, contient de la mélanine qui, selon sa concentration, rend la peau claire, brune ou noire. De surcroît, l'épiderme peut être recouvert d'huile, de saleté ou de produits cosmétiques.

Afin d'engendrer des visages réalistes, nous choisissons les concentrations de sang et de mélanine, ainsi que les épaisseurs relatives du derme

et de l'épiderme. Par exemple, la minceur de la couche d'épiderme, sur les lèvres, explique que ces dernières sont plus rouges que le reste du visage. Les taches de rousseur sont modélisées par des «éclaboussures» de mélanine réparties aléatoirement sur les joues (voir la figure 2).

La simulation de la corrosion

Aux débuts de l'infographie, les modèles étaient idéalisés : on négligeait les changements dus à l'environnement et au temps. Toutefois, l'aspect des objets est déterminé par les phénomènes de vieillissement : les murs en brique patinés par les ans, les métaux rouillés, les pierres recouvertes de mousse, les poutres desséchées et fendillées résultent de phénomènes physiques, chimiques ou biologiques : corrosion, érosion, croissance biologique, sédimentation... L'évolution d'un matériau dépend étroitement de sa structure ; la pierre, le bois et les métaux évoluent différemment, parce qu'ils ont des structures distinctes. Les

méthodes de préparation, comme la taille, le polissage ou la teinture, ont également une influence. Depuis quelques années, nous simulons des mécanismes qui modifient l'aspect des matériaux d'abord en identifiant le phénomène physique à l'origine d'une modification spécifique de l'apparence, puis en élaborant les modèles appropriés.

Les patines métalliques sont un exemple classique de modification de l'apparence d'un matériau par interaction avec son environnement. Une patine est une pellicule sur une surface, qui résulte de la modification chimique de la surface, ou bien de l'adjonction ou de la disparition de matière. Les patines apparaissent naturellement, par corrosion atmosphérique (comme la pluie), ou artificiellement, par la peinture ou d'autres traitements de surface. La composition d'une patine et sa vitesse de croissance dépendent de l'environnement. Par exemple, les patines croissent en général plus vite en ville qu'à la campagne, car l'air contient plus de composés soufrés.

L'un de nos modèles reproduit la formation des patines de cuivre. La

La modélisation de la réflexion

La manière dont une surface réfléchit la lumière peut être caractérisée par une «fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle». Cette fonction mathématique définit la proportion de la lumière qui est réfléchie dans les diverses directions de l'espace, en fonction de la direction d'incidence.

La plus ancienne loi de réflexion, connue des Grecs anciens, stipule que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence. La distribution de réflectance bidirectionnelle est nulle dans toutes les directions, excepté dans l'unique direction où toute la lumière repart.

La loi de Lambert décrit la réflexion sur les surfaces mates : la lumière se réfléchit de manière isotrope, quelle que soit la direction de la lumière incidente. La loi de Lambert est un bon exemple de modèle phénoménologique, car elle rend bien compte de l'apparence de matériaux mats, comme le carton, sans description du mécanisme physique à l'origine de cette redistribution de la lumière. Entre ces deux extrêmes que sont les miroirs parfaits et les surfaces mates, les surfaces brillantes ont des distributions de réflectance qui considèrent une réflexion autour d'une direction principale.



Mesure de la réflectance d'un objet.

Depuis des années, les spécialistes de l'optique et des radars, ainsi que certains spécialistes des matériaux mesurent directement les distributions de réflectance des matériaux. De telles mesures ont certainement joué un rôle important dans la conception des avions furtifs.

Les distributions des réflectances intéressent également la télédétection : l'apparence des forêts et des champs, entre autres, varie en fonction de l'angle du Soleil et de l'angle d'observation du satellite. C'est un problème inverse de la simulation de l'apparence d'un matériau : il s'agit d'identifier un matériau à partir de son apparence.

Des instruments mesurent les distributions de réflectance (voir la figure ci-contre). Une source lumineuse éclaire un échantillon placé au centre de l'appareil. Un photomètre se déplace tout autour de l'échantillon et mesure la lumière réfléchie dans chaque direction. Afin d'obtenir la réflectance du matériau étudié dans tout l'espace, on répète les mesures en modifiant la position de la source lumineuse. Les fonctions de réflectance déjà connues ne sont pas encore utilisées à grande échelle en infographie, mais plusieurs groupes examinent cette approche.

surface est représentée comme une série de couches, et les patines sont formées par l'application à la structure en couches d'une série d'opérateurs intuitifs, tels «oxyder», «éroder» ou «polir». Par exemple, l'opérateur «oxyder» ajoute de l'oxyde à la couche supérieure. «Éroder» simule la perte de matériau détaché par l'action du vent ou de la pluie. Pour simuler en détail des variations d'épaisseur en fonction du temps, nous avons expérimenté une série de modèles à utiliser conjointement à la structure en couches, et où la patine croît sur la surface selon des motifs fractals (les fractales, des formes qui gardent la même structure quelle que soit l'échelle, sont très utilisées en infographie, pour engendrer des sols réalistes, de la végétation, etc.). L'apparence finale de la patine de cuivre dépend de la manière dont la lumière interagit avec les couches successives que nous simulons à l'aide du modèle de Kubelka-Munk (voir la figure 1).

La pluie est l'un des principaux phénomènes susceptibles de changer l'aspect des matériaux. Le ruissellement de l'eau enlève les salissures de certaines zones, et en dépose ailleurs. Cet effet est simulé à l'aide d'un modèle simple d'écoulement de l'eau, dit à «particules» : chaque particule représente une goutte d'eau dont le mouvement est commandé par la gravité, les frottements, le vent, la rugosité, les forces d'adhérence... Un ensemble d'équations décrit les interactions chimiques entre l'eau et la surface des matériaux : la vitesse d'absorption de l'eau, sa solubilité et la vitesse de sédimentation des dépôts. Nous avons ainsi simulé les effets de l'eau sur une reproduction virtuelle de la célèbre statue de la *Vénus de Milo* (voir la figure 3).

Nous avons d'abord recouvert la statue d'une couche uniforme de poussière, puis nous avons lavé la surface en lui appliquant une simulation d'écoulement. L'écoulement a engendré des stries nettes dans la poussière, ainsi que des caractéristiques aléatoires liées à la nature discrète des «particules» d'eau. La saleté s'est accumulée sur les portions de surface situées

hors du chemin emprunté par l'eau, par exemple sous le bras. Les salissures se sont réparties inégalement près des plis du vêtement ; par exemple, la surface des parties convexes des plis était propre vers le haut, et sale vers le bas. Les salissures sont par ailleurs plus uniformes à la base de la statue et vers le bas, parce que cette zone était moins exposée à l'eau.

Des pierres ancestrales

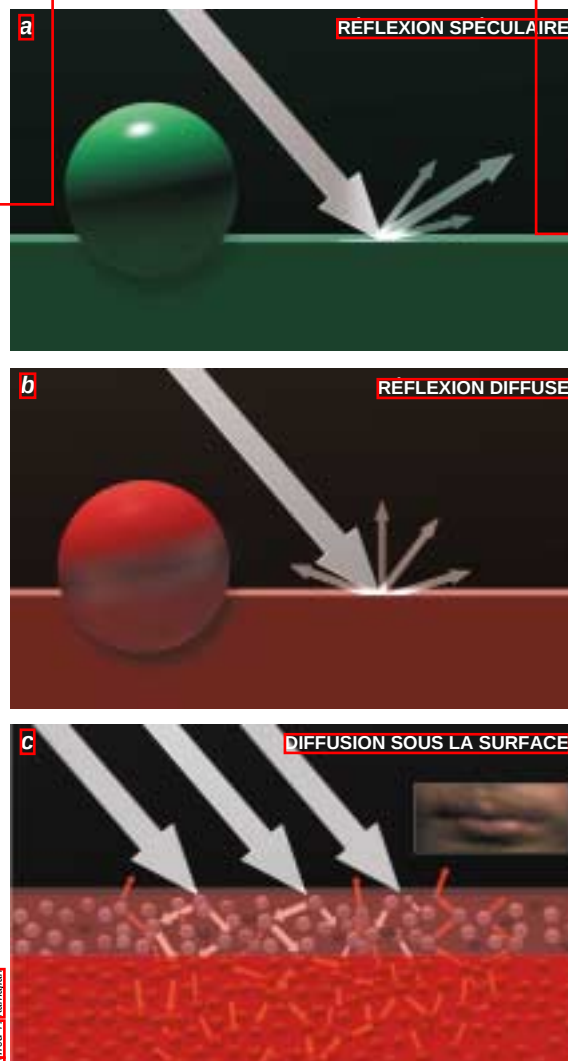
Les modèles de patine et d'écoulement de l'eau ne simulent que des effets de surface, car seule une mince couche de matériau proche de la surface est modifiée. Plus récemment, nous avons examiné des phénomènes naturels qui

agissent en profondeur, comme l'érosion des pierres. Les pierres sont un assemblage serré de microcristaux. L'arrangement de ces cristaux caractérise le type de roche et détermine en partie ses propriétés physiques et chimiques, dont sa dureté, sa couleur et sa longévité.

Comme le métal, la pierre est attaquée par les produits atmosphériques, oxydes de carbone, de soufre et d'azote qui, dilués dans l'eau, donnent les pluies acides, tristement célèbres. Au lieu de rester en surface, cette solution pénètre la pierre. Parfois, la roche subit alors des transformations chimiques, et une recristallisation engendre une croûte plus fragile que la roche initiale. Des morceaux de croûte se détachent, et une nouvelle couche de la pierre est exposée aux attaques acides. Le vieillissement des roches s'accompagne d'effets variés : changements de coloration, formation de croûtes sales, érosion de surface et dégâts structurels, telle la fissuration.

Comment un sphinx de granit est-il modifié par une telle érosion ? Nous avons modélisé la statue comme une coquille de pierre d'une épaisseur assez importante et dont la face externe correspond à la surface de la statue. Une fonction à trois dimensions décrit les minéraux présents dans la masse de cette «surface volumétrique». Le modèle environnemental inclut de l'eau et des polluants qui réagissent à la surface et à l'intérieur de la coquille. De cette manière, le modèle engendre un mélange volumétrique de minéraux et une «microgéométrie» de surface complexe. Afin de rendre la coloration et la translucidité dues aux minéraux proches de la surface, nous simulons la dispersion de la lumière à l'intérieur de la roche à l'aide du lancer de rayons stochastique.

L'infographie est fréquemment conduite à chercher des compromis entre des calculs trop longs et une médiocre qualité des images. Par exemple, quand une statue érodée apparaît à l'arrière-plan d'une scène, on a intérêt à remplacer une description précise des petites irrégularités



6. LA RÉFLEXION SUR LES SURFACES est un élément crucial des systèmes de création d'images. La réflexion spéculaire (a) engendre des surfaces brillantes avec des reflets. Les matériaux mats simples, tels que le carton, sont modélisés à l'aide d'une réflexion diffuse (b) qui disperse la lumière de manière isotrope. Pour de nombreux matériaux, la propagation de la lumière sous la surface (c) détermine l'apparence finale.

géométriques de sa surface par une carte de répartition des microfacettes. La texture reste admissible, mais les calculs sont bien moins longs. En revanche, lorsque la position de la caméra change et que la statue passe au premier plan, l'utilisation d'une carte des irrégularités s'impose (voir l'encadré ci-contre).

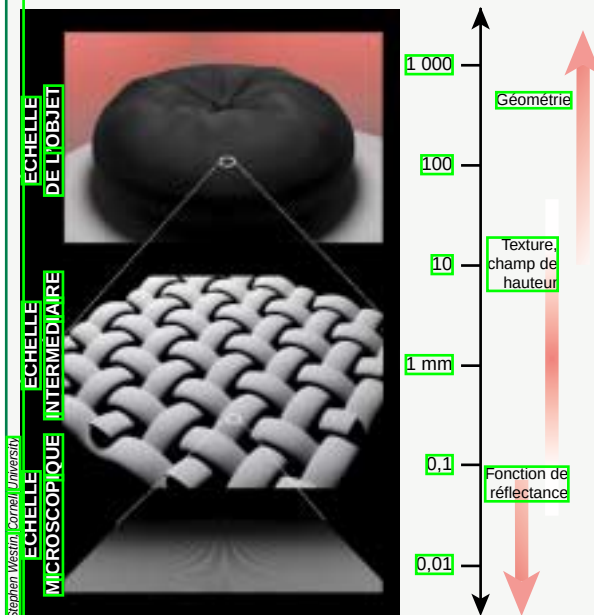
Nouveaux modèles, nouveaux rendus

La mise au point de modèles de matériaux pour l'infographie commence seulement, mais certaines questions fondamentales sur leurs limites se posent déjà. La physique décrit encore assez mal l'apparence des matériaux. La corrosion des métaux, par exemple, est très étudiée en raison de son intérêt scientifique et de son évidente importance pratique, mais les chercheurs n'en comprennent qu'imparfaitement les mécanismes. De surcroît, toutes les applications ne requièrent pas le même degré de précision du modèle. Par exemple, au cinéma, les objets doivent seulement donner l'illusion de la réalité ; peu importe que les algorithmes utilisés pour obtenir cet aspect correspondent ou non aux phénomènes physiques réels. En revanche, dans certaines applications scientifiques et techniques, l'exactitude physique est capitale. Ainsi, le modèle de peau que nous avons présenté illustre les compromis à réaliser et leurs contraintes : il convient pour de nombreuses applications, mais il ne tient pas compte des follicules pileux, des pores et des glandes sébacées, de sorte qu'il intéresse peu les dermatologues ou les biologistes.

La création de modèles de matériaux fondés sur les lois physiques et l'élucidation de leur vieillissement sont des chantiers importants en infographie. Les spécialistes cherchent une gamme plus variée de modèles de matériaux et de mécanismes qui modifient leur apparence. Le projet à long terme est la création des palettes de matériaux qu'un large public pourrait utiliser, de la même manière qu'il a aujourd'hui accès aux bibliothèques d'images. À mesure que les physiciens percent les mystères de la structure des matériaux, de nouveaux modèles informatiques apparaîtront, et les applications techniques et artistiques fleuriront. Dans la conception automobile, on pourra ainsi étudier de nombreux revêtements en les appliquant à

Différents niveaux de détail

Pour créer une seule image, les systèmes infographiques doivent parfois traiter des millions de formes géométriques et calculer des millions de fonctions de réflectance. L'utilisation de modèles de matériaux doit se faire astucieusement, sans quoi le nombre de calculs est réhibitore. Par exemple, on peut calculer la réflectance, ou en chercher des valeurs approchées, lors d'une phase préparatoire, et garder les résultats en mémoire pour le calcul du rendu proprement dit.



Le meilleur modèle d'une surface, ici celle d'un coussin, dépend du niveau de détail nécessaire.

sera représentée par de fines variations de l'ombrage et par l'ajout éventuel d'ombres portées. Pour des prises de vues lointaines, une description par des microfacettes est suffisante.

La détermination automatique des représentations adéquates des surfaces et des matériaux selon la distance de la caméra est un domaine de recherche actif en infographie. Comment obtenir un programme informatique qui trouve automatiquement le bon niveau de détail ? Aujourd'hui, ces scènes où l'on peut se déplacer à différentes échelles sont très complexes : elles contiennent des dizaines de millions de surfaces, de sorte que, pour l'efficacité du calcul, les approximations sont cruciales.

Une autre technique consiste à introduire une hiérarchie d'échelles et à utiliser la bonne échelle selon les circonstances. Lorsqu'une caméra s'approche d'un objet, les détails à sa surface doivent être modélisés correctement. Lorsque la caméra recule, les détails les plus fins deviennent inutiles. Par exemple, une surface rugueuse est habituellement représentée par un champ de hauteur. Pour les vues proches, ces irrégularités sont effectivement représentées par des déplacements de la surface. Pour des vues à des distances intermédiaires, seule une moyenne de la surface sera utile, et la rugosité

des voitures virtuelles, afin de connaître la structure, l'apparence et les performances des revêtements sur la durée de vie du véhicule. Les architectes et les conservateurs simuleront la durabilité à long terme des matériaux, et ils étudieront l'efficacité des différentes

méthodes de préservation. Enfin, les modèles informatiques de matériaux aideront même les stylistes à créer des apparences entièrement nouvelles, qui ne se contenteront plus d'imiter la nature, mais embelliront le monde où nous vivons.

Julie DORSEY travaille au Laboratoire d'informatique de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT). Pat HANRAHAN enseigne au département d'informatique et de génie électrique de l'Université de Stanford.

Pat HANRAHAN et Wolfgang KRUEGER, *Reflection from Layered Surfaces Due to Subsurface Scattering*, in *Proceedings of SIGGRAPH 93*, ACM, 1993.

Julie DORSEY et Pat HANRAHAN, *Modeling and Rendering of Metallic Patinas*, in *Proceedings of SIGGRAPH 96*, ACM, 1996.

Texturing and Modeling, deuxième édition, sous la direction de D.S. Ebert et al., Morgan Kaufmann Publishers, 1998.

Julie DORSEY, Alan EDELMAN, Henrik JENSEN, Justin LEGAKIS et Hans PEDERSEN, *Modeling and Rendering of Weathered Stone*, in *Proceedings of SIGGRAPH 99*, ACM, 1999.

L'arbre du vivant : un buisson foisonnant

FORD DOOLITTLE

Depuis une dizaine d'années, les biologistes étudient l'apparition des formes de vie et cherchent un arbre généalogique des espèces vivantes.

Ayant exploré les racines de cet arbre, ils découvrent que les divers gènes racontent des histoires évolutives différentes.

Il y a plus d'un siècle, Charles Darwin supposa que les nombreuses espèces vivantes descendaient d'espèces moins nombreuses, qui descendaient elles-mêmes d'espèces encore moins nombreuses, et ainsi de suite jusqu'au moment où la vie est apparue sur la Terre. Les relations de parenté semblaient se représenter par un arbre généalogique des espèces : l'arbre du vivant.

Cette idée, longtemps controversée, est largement admise depuis dix ans, et la plupart des biologistes considèrent que l'on connaît bien les grandes lignes de l'arbre du vivant, construit à partir d'un ancêtre commun, la première cellule, qui apparut il y a 3,5 à 3,8 milliards d'années.

Aujourd'hui, à la surprise générale, de nouvelles découvertes montrent que les racines de l'arbre ne sont pas telles qu'on croyait. Il y a plus de richesse biologique à la base de l'arbre que ne le laissait supposer la simplicité des micro-organismes.

La construction de l'arbre

Il y a 35 ans, les biologistes manquaient de données pour construire l'arbre du vivant. Depuis Aristote, ils ne déterminaient le degré de parenté entre espèces qu'en comparant leur anatomie et leur physiologie. Cette méthode était relativement efficace pour les organismes complexes. Par exemple, elle a montré que les hominidés avaient un ancêtre commun avec les grands singes, qui avait lui-même un ancêtre com-

mun avec les autres singes, qui avait lui-même un ancêtre commun avec les prosimiens, etc.

Cependant, cette méthode n'était pas applicable aux micro-organismes unicellulaires. Les biologistes étaient d'autant plus contrariés que les micro-organismes avaient été les seuls habitants de la Terre pendant la première moitié, sinon les deux tiers, de son histoire. Comment les micro-organismes avaient-ils évolué? Dans quel ordre les structures internes et les particularités métaboliques des cellules étaient-elles apparues? Entre l'apparition du premier organisme unicellulaire et celle des champignons, des plantes ou des animaux pluricellulaires, les cellules sont devenues plus grosses et plus complexes : elles ont acquis un noyau et un cytosquelette (une structure interne), ainsi que la faculté d'absorber d'autres cellules. Quand ces innovations sont-elles survenues?

Au milieu des années 1960, à l'Institut de technologie de Californie, Emile Zuckerkandl et Linus Pauling inventèrent une méthode révolutionnaire pour établir les liens de parenté entre les espèces de micro-organismes : au lieu d'examiner l'anatomie ou la physiologie, ils proposèrent de comparer l'ordre des sous-unités qui constituent les gènes ou les protéines.

Cette méthode de «phylogénie moléculaire» s'est rapidement imposée. Un gène, c'est-à-dire un segment d'ADN composé d'une succession de nucléotides, code une protéine, c'est-

à-dire une molécule composée d'une succession d'acides aminés. Toutefois, les gènes mutent régulièrement : ils subissent des modifications de leur séquence qui changent parfois la protéine codée. Les mutations anodines



1. L'ARBRE DU VIVANT qui était admis naguère partait d'un ancêtre commun, une petite cellule sans noyau qui aurait engendré deux groupes procaryotes (sans noyau) : les bactéries et les archéobactéries. Ces dernières auraient elles-mêmes engendré les eucaryotes (dotés d'un noyau et d'une structure complexe). Puis les eucaryotes auraient absorbé des bactéries productrices d'énergie, qui seraient devenues des mitochondries ou des chloroplastes (chez les plantes).

ou porteuses d'améliorations s'accumulent progressivement. Ainsi, chez deux espèces qui descendent d'un même ancêtre, les séquences des gènes qu'elles partagent diffèrent de plus en plus. En dénombrant toutes les différences, on reconstitue l'arbre des espèces vivantes.

Il y a 35 ans, les biologistes identifiaient difficilement l'ordre des acides aminés dans les protéines, et ils ne savaient pas séquencer les gènes. Toutefois, à la fin des années 1960 et au début des années 1970, les séquençages de protéines démontrèrent l'intérêt de la phylogénie moléculaire, en confirmant, puis en complétant l'arbre de plusieurs groupes, tels les vertébrés. Ils établirent également les liens de parenté entre certaines bactéries, montrant notamment que celles qui produisent de l'oxygène par photosynthèse (les cyanobactéries) forment un groupe particulier.

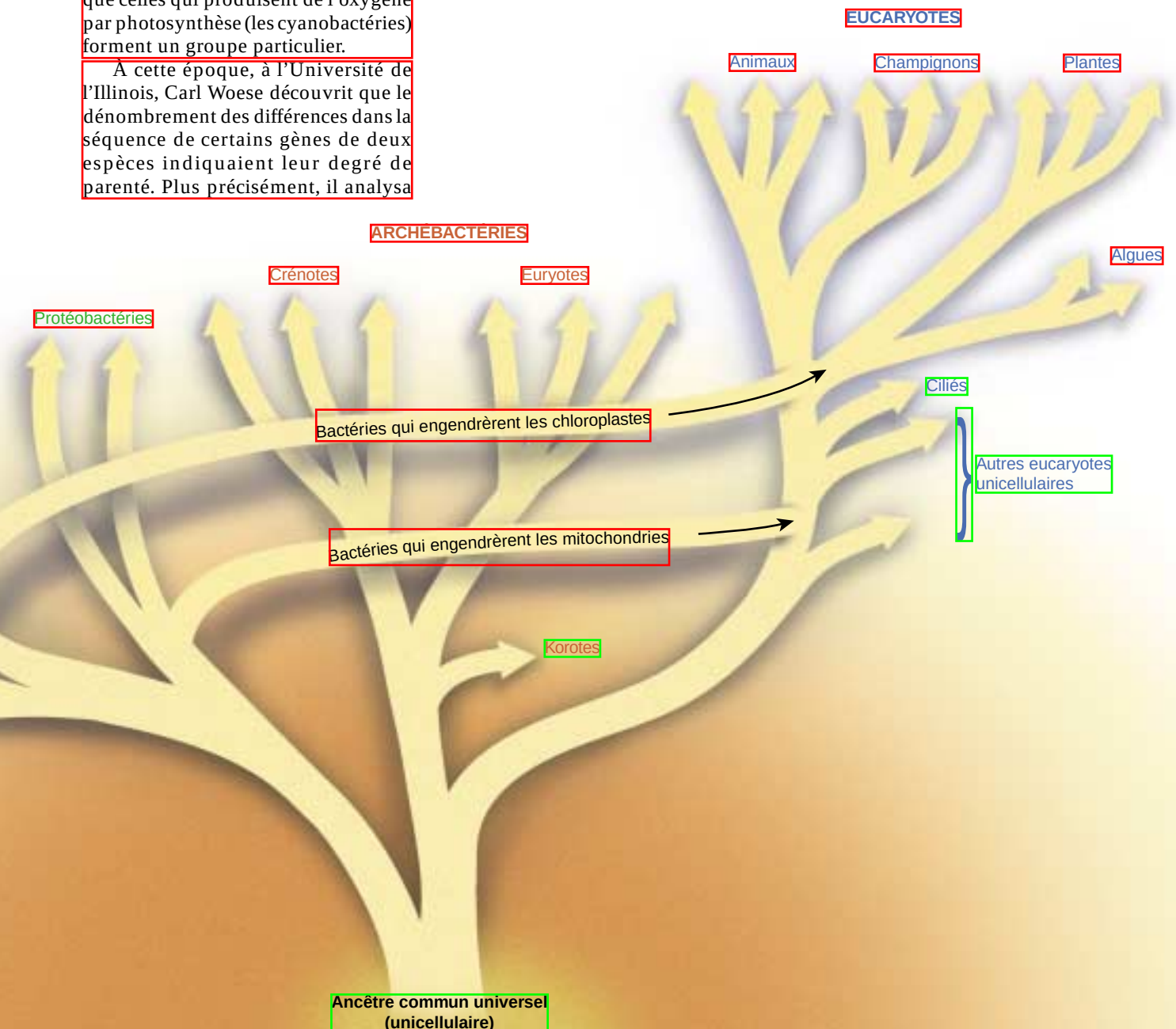
À cette époque, à l'Université de l'Illinois, Carl Woese découvrit que le dénombrement des différences dans la séquence de certains gènes de deux espèces indiquaient leur degré de parenté. Plus précisément, il analysa

l'ARN de la petite sous-unité ribosomale. Les ribosomes sont des organites intracellulaires qui fabriquent les protéines des cellules. Ces «usines» à protéines sont composées de deux parties, ou sous-unités, qui sont constituées chacune de protéines et d'ARN (des enchaînements de nucléotides, comme l'ADN). Au fil de l'évolution, les ribosomes sont devenus indispensables au fonctionnement des cellules. Selon C. Woese, l'ARN ribosomal (ou les gènes qui codent cet ARN) était un bon «chronomètre moléculaire universel».

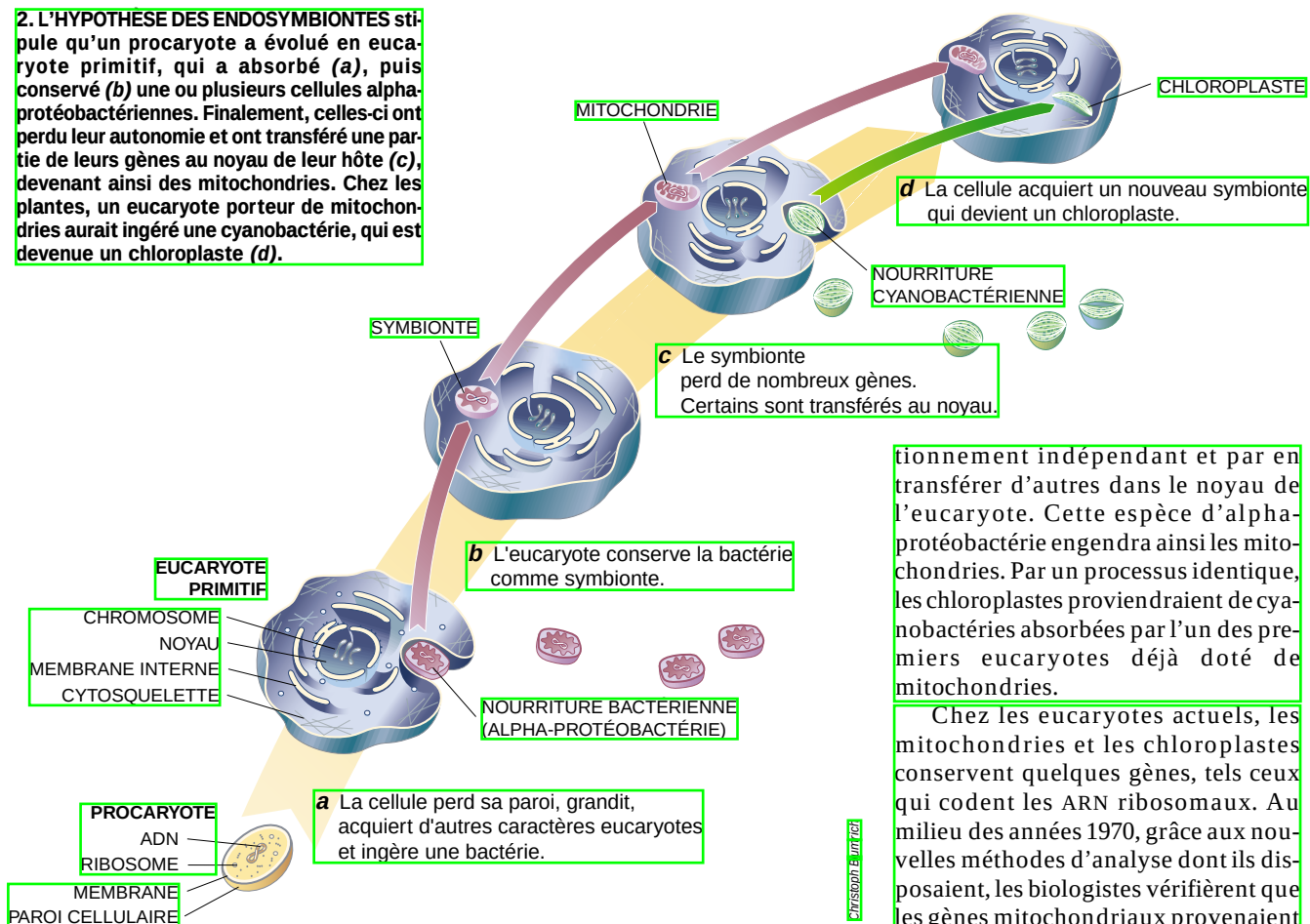
Toutefois, l'analyse des séquences d'ARN ribosomal était initialement si fastidieuse que C. Woese dut attendre la fin des années 1970 pour avoir assez de résultats et pouvoir en tirer des conclusions. Depuis, la phy-

logénie des organismes, des micro-organismes unicellulaires aux espèces pluricellulaires complexes, a beaucoup progressé grâce au séquençage des gènes d'ARN ribosomal. À la fin des années 1980, l'accumulation des résultats a rallié la plupart des biologistes au modèle de l'arbre du vivant. Aujourd'hui, on connaît les séquences d'ARN ribosomal de plusieurs milliers d'espèces.

Les analyses de l'ARN ribosomal confirmèrent d'abord certaines idées qui faisaient déjà l'objet d'un large consensus. Cependant, elles réservaient aussi des surprises. Dans les années 1960, la microscopie avait confirmé que la structure des cellules partageait les êtres vivants en deux groupes : les eucaryotes et les procaryotes. D'une part,



2. L'HYPOTHESE DES ENDOSYMBIOTES stipule qu'un procaryote a évolué en eucaryote primitif, qui a absorbé (a), puis conservé (b) une ou plusieurs cellules alpha-protéobactériennes. Finalement, celles-ci ont perdu leur autonomie et ont transféré une partie de leurs gènes au noyau de leur hôte (c), devenant ainsi des mitochondries. Chez les plantes, un eucaryote porteur de mitochondries aurait ingéré une cyanobactérie, qui est devenue un chloroplaste (d).



Les cellules eucaryotes (animaux, plantes, champignons et certaines formes de vie unicellulaire) ont un noyau qui contient les chromosomes et qui est limité par une membrane ; elles ont aussi un cytosquelette, un réseau complexe de membranes internes (le réticulum endoplasmique) et, souvent, des mitochondries, qui assurent l'équivalent de la respiration, c'est-à-dire qui utilisent l'oxygène pour récupérer l'énergie stockée dans les substances nutritives sous forme chimique. Les cellules d'algues et de plantes supérieures contiennent aussi des chloroplastes, qui effectuent la photosynthèse. D'autre part, les procaryotes semblaient naguère être confondus avec les bactéries. Ces cellules, plus petites et plus simples, sont dépourvues de noyau, mais entourées d'une membrane et, souvent, d'une paroi rigide.

Les premiers résultats de C. Woese corroborèrent la distinction entre procaryotes et eucaryotes : les ARN ribosomaux des divers procaryotes se ressemblaient plus qu'ils ne ressemblaient à ceux des eucaryotes. Ces études conduisirent même à l'un des plus beaux résultats de la biologie de

l'évolution : l'hypothèse des «endosymbiotes», qui explique comment les mitochondries et les chloroplastes sont apparus dans les eucaryotes (voir *La naissance des cellules complexes*, par Christian de Duve, *Pour la Science*, juin 1996). Selon cette théorie, une cellule procaryote anaérobie (incapable d'utiliser l'oxygène comme source d'énergie) perdit sa paroi rigide ; la membrane, plus flexible, se développa et se replia sur elle-même, ce qui forma le noyau et d'autres organites. À ce stade de sa transformation en eucaryote, cette cellule acquit la faculté d'absorber des procaryotes, au lieu de se limiter aux petites molécules environnantes.

L'un des descendants de cet eucaryote primitif absorba une bactérie qui tirait son énergie de la respiration, c'est-à-dire une protéobactérie. Celle-ci appartenait au groupe des alpha-protéobactéries (une sous-division des protéobactéries). Au lieu de digérer cette alpha-protéobactérie, il la conserva, en tant qu'endosymbionte : il l'abrita, puisqu'elle lui fournissait de l'énergie en respirant. Ce type d'endosymbionte finit par perdre certains de ses gènes qui assuraient auparavant son fonc-

tionnement indépendant et par en transférer d'autres dans le noyau de l'eucaryote. Cette espèce d'alpha-protéobactérie engendra ainsi les mitochondries. Par un processus identique, les chloroplastes proviendraient de cyanobactéries absorbées par l'un des premiers eucaryotes déjà doté de mitochondries.

Chez les eucaryotes actuels, les mitochondries et les chloroplastes conservent quelques gènes, tels ceux qui codent les ARN ribosomaux. Au milieu des années 1970, grâce aux nouvelles méthodes d'analyse dont ils disposaient, les biologistes vérifièrent que les gènes mitochondriaux provenaient effectivement des alpha-protéobactéries et les gènes chloroplastiques des cyanobactéries, conformément à l'hypothèse des endosymbiotes.

La fin d'une controverse

La surprise vint d'une découverte que C. Woese annonça à la fin des années 1970 : le monde vivant ne se divisait pas en deux groupes (les bactéries et les eucaryotes), mais en trois. Certains procaryotes, considérés comme des bactéries à cause de leur ressemblance physique avec elles, avaient une constitution bien différente. Ils semblaient même appartenir à un groupe qui se serait séparé depuis très longtemps des autres procaryotes. Les biologistes avaient déjà remarqué le comportement inhabituel de certains procaryotes (par exemple, les environnements extrêmes les attirent), mais personne n'avait encore contesté leur statut de bactérie. D'après C. Woese, ces procaryotes formaient un troisième groupe primitif, les archéobactéries, aussi différentes des bactéries que les bactéries l'étaient des eucaryotes.

Tout d'abord, cette découverte fut largement contestée. Puis la plupart des scientifiques se rallièrent à la nouvelle

théorie, car la structure de certaines molécules d'archéobactéries diffèrait de celle des molécules de bactéries et d'eucaryotes correspondantes. Par exemple, les lipides des membranes cellulaires d'archéobactéries et de bactéries n'ont pas les mêmes liaisons chimiques.

De même, les protéines des archéobactéries diffèrent des protéines correspondantes des bactéries, pour plusieurs processus fondamentaux, telles la transcription et la traduction. Pour fabriquer une protéine, la cellule copie (elle «transcrit») le gène qui code cette protéine sous la forme d'un brin d'ARN messager. Puis les ribosomes lisent l'ARN messager et assemblent la protéine, acide aminé par acide aminé (c'est la «traduction»). L'enzyme nommée ARN polymérase, qui transcrit les gènes dans les archéobactéries, ressemble davantage à la molécule correspondante des eucaryotes qu'à celle des bactéries, sur le plan de la complexité et de la nature de ses interactions avec l'ADN. De surcroît, les protéines qui traduisent les ARN messagers dans les ribosomes des archéobactéries sont également plus proches de celles des eucaryotes que de celles des bactéries.

Une fois l'existence des trois groupes reconnue, les biologistes se demandèrent si l'ancêtre de la première cellule eucaryote était une bactérie ou une archéobactérie. Ils conclurent, d'après la ressemblance de leurs systèmes de transcription et de traduction, que l'ancêtre des eucaryotes était une archéobactérie.

En 1989, cette affirmation fut validée par Peter Gogarten et ses collègues de l'Université du Connecticut, et par Takashi Miyata et ses collègues de l'Université de Kyushu. Pour mieux «enraciner» l'arbre du vivant, ces deux

groupes analysèrent des gènes qui codaient d'autres composants cellulaires que les ribosomes. Pour des raisons techniques, l'ARN ribosomal indique le degré de parenté entre deux organismes, mais il ne révèle pas lequel est le plus ancien. D'après les séquences d'ADN codant deux protéines cellulaires importantes, l'ancêtre commun universel a engendré les bactéries et les archéobactéries, qui ont elles-mêmes engendré les eucaryotes.

Depuis 1989, de nombreuses études ont confirmé ce résultat. Au cours des cinq dernières années, les biologistes ont séquencé le génome (l'ensemble des gènes) d'une demi-douzaine d'archéobactéries et de plus de 15 bactéries. Leur comparaison confirme que beaucoup de gènes d'archéobactéries utiles à la transcription et à la traduction ressemblent à ceux des eucaryotes : ces processus se déroulent de façon similaire chez les deux groupes. De plus, bien que les archéobactéries n'aient pas de noyau, leurs chromosomes ressemblent à ceux des eucaryotes : l'ADN s'enroule autour de protéines, nommées histones, et les chromosomes adoptent parfois une structure en «chapelet». La plupart des protéines qui assurent la réplication des chromosomes des archéobactéries se retrouvent sous une forme ou sous une autre chez les eucaryotes, mais pas chez les bactéries.

L'arbre du vivant qui s'imposa ces dernières années fut construit à partir de tous ces résultats. Les organismes vivants se sont d'abord scindés en deux groupes, les bactéries et les archéobactéries qui ont engendré les eucaryotes. Ultérieurement,

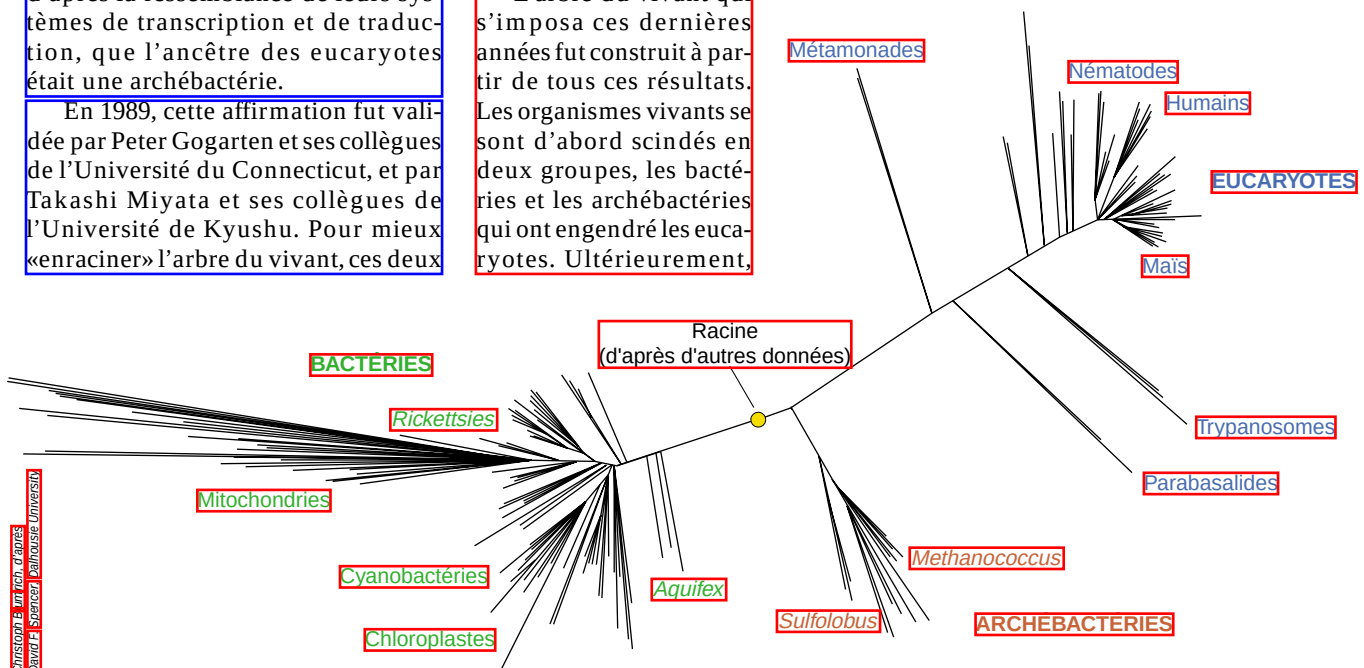
les eucaryotes ont absorbé deux types de bactéries : une alpha-protéobactérie qui engendra les mitochondries, et une cyanobactérie qui engendra les chloroplastes.

Les doutes resurgissent

Toutefois, le séquençage de génomes de plus en plus nombreux a donné des résultats qui contredisent cette théorie. Notamment, les seuls gènes bactériens des eucaryotes auraient dû venir des mitochondries, des chloroplastes ou de leurs précurseurs alpha-protéobactériens et cyanobactériens. En outre, les gènes de ces précurseurs auraient dû intervenir dans la respiration ou dans la photosynthèse, mais pas dans des processus cellulaires déjà commandés par des gènes hérités des archéobactéries.

Ce n'est pas ce que les biologistes ont observé : les gènes nucléaires d'eucaryotes sont souvent d'origine bactérienne, et pas seulement archéobactérienne. Ces gènes n'interviennent pas toujours dans la respiration ou dans la photosynthèse. Beaucoup codent des protéines qui assurent des fonctions aussi essentielles à la survie des cellules que la transcription et la traduction.

D'après l'arbre du vivant, les gènes bactériens auraient migré vers les eucaryotes, mais pas vers les archéobactéries. Or, celles-ci semblent avoir des



3. LES SÉQUENCES D'ARN RIBOSOMAL de près de 600 espèces définissent les relations de parentés entre elles. Chaque trait de ce schéma représente l'ARN ribosomal d'une espèce ou d'un groupe. Certains ARN ribosomaux sont codés par des gènes nucléaires, mais d'autres le sont par des gènes mitochondriaux ou chloroplastiques.

Les branches mitochondriales sont longues, car les gènes correspondant évoluent rapidement. Les arbres construits par comparaison des ARN ribosomaux n'ont pas de racine. À partir d'autres types de gènes, on situe la racine au point jaune, qui correspond à la partie inférieure de l'arbre de la figure 1.

gènes d'origine bactérienne. Par exemple, *Archaeoglobus fulgidus* possède des caractères typiques d'une archéobactérie, notamment les lipides de sa membrane cellulaire et sa machinerie de transcription et de traduction. Toutefois, c'est une forme bactérienne de l'enzyme HMGCoA réductase qui synthétise ses lipides membranaires. De surcroît, *Archaeoglobus fulgidus* capte son énergie et ses nutriments dans les nappes de pétrole sous-marines où elle vit, grâce à des gènes bactériens.

Comment résoudre le dilemme? En supposant que l'évolution ne se décrit pas par un arbre aussi simple que Darwin le supposait. Bien qu'elle s'effectue le plus souvent par un transfert «vertical» des gènes, de génération en génération, l'évolution des cellules résulterait aussi de transferts «horizontaux», de gènes isolés ou de séries de gènes se transmettant d'espèce à espèce.

Ces transferts horizontaux expliqueraient comment les eucaryotes, qui descendent des archéobactéries, ont reçu tant de gènes bactériens qui interviennent dans leur métabolisme : les eucaryotes auraient absorbé des gènes de bactéries et conservé ceux qui leur étaient utiles. De la même manière, diverses archéobactéries auraient acquis des gènes de bactéries et inversement.

Quelques théoriciens de la phylogénie moléculaire, dont Mitchell Sogin, du Laboratoire de biologie marine de Woods Hole, et Russell Doolittle, de l'Université de San Diego, ont également évoqué le transfert horizontal de

certains gènes pour expliquer un mystère ancien : pourquoi de nombreux gènes eucaryotes ne ressemblent-ils à aucun gène archéobactérien ou bactérien? Notamment, les gènes de deux caractères typiquement eucaryotes, le cytosquelette et le réticulum endoplasmique (un système de membranes internes) semblent venus de nulle part... M. Sogin et R. Doolittle supposent que ces gènes proviennent d'un quatrième groupe d'organismes, aujourd'hui disparus, dont les gènes auraient intégré le noyau des eucaryotes lors de transferts horizontaux.

En fait, le transfert horizontal n'est pas un mécanisme insolite : les microbiologistes connaissent l'existence de transferts horizontaux chez les bactéries depuis longtemps. C'est ainsi que les bactéries pathogènes se transmettent leur résistance à un antibiotique. Toutefois, peu de biologistes soupçonnaient que des gènes essentiels à la survie des cellules changeaient souvent de mains ou que le transfert horizontal avait forgé l'histoire primitive des micro-organismes.

L'arbre survivra-t-il?

Comment les nouvelles découvertes modifient-elles la structure de l'arbre du vivant? Tout d'abord, la transformation d'archéobactéries en eucaryotes est trop schématique, voire fautive. Les eucaryotes ne descendraient pas d'archéobactéries, mais de précurseurs qui auraient reçu des parties archéobactériennes, des parties bactériennes et, peut-être, d'autres parties encore.

On admet encore que les transferts horizontaux ont engendré les mitochondries et les chloroplastes à partir d'alpha-protéobactéries et de

cyanobactéries ingérées par les eucaryotes, mais on reconnaît aujourd'hui que d'autres transferts se sont produits après l'apparition des premiers eucaryotes. Plus tardivement, chez les eucaryotes pluricellulaires, les transferts horizontaux furent restreints par l'apparition de cellules germinales, séparées et protégées.

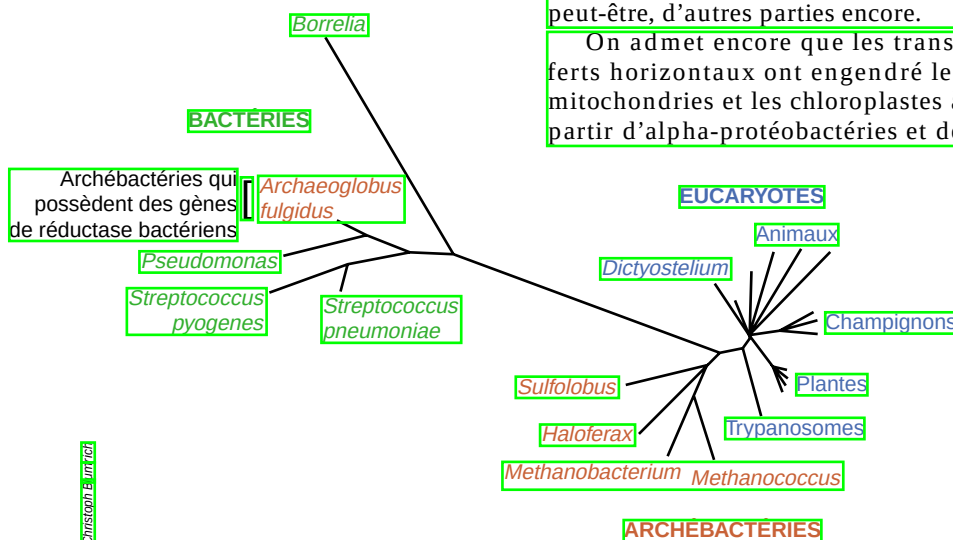
La description des relations de parenté entre procaryotes est également trop schématique. Les procaryotes que l'on nomme archéobactéries ont de nombreux gènes et de nombreux caractères biochimiques en commun, distincts de ceux des bactéries, mais de nombreux transferts horizontaux se sont produits entre ces deux groupes (ainsi qu'entre espèces de chacun de ces groupes).

Les gènes les moins susceptibles d'être transférés pourraient-ils définir les liens de parenté entre les procaryotes? De nombreux microbiologistes pensent encore que les gènes de la petite sous-unité ribosomale, ainsi que ceux qui codent des protéines de la transcription et de la traduction, ne subissent aucun transfert. Toutefois, cette hypothèse n'est pas étayée. Les arbres ne montrent l'évolution que d'une partie seulement du génome des espèces. L'arbre universel est une simplification.

À quoi un modèle plus proche de la réalité ressemblerait-il? Au sommet, des ramifications subsisteraient (voir la figure 5) pour les organismes pluricellulaires, les animaux, les plantes et les champignons. Les transferts de gènes qui ont accompagné l'établissement des mitochondries et des chloroplastes seraient décrits par des fusions de branches majeures, et de nombreuses fusions supplémentaires devraient apparaître avant eux et se prolonger chez les groupes actuels (bactéries et archéobactéries). Il n'y a sans doute pas de tronc principal, dans le groupe des procaryotes, à la base du groupe des eucaryotes.

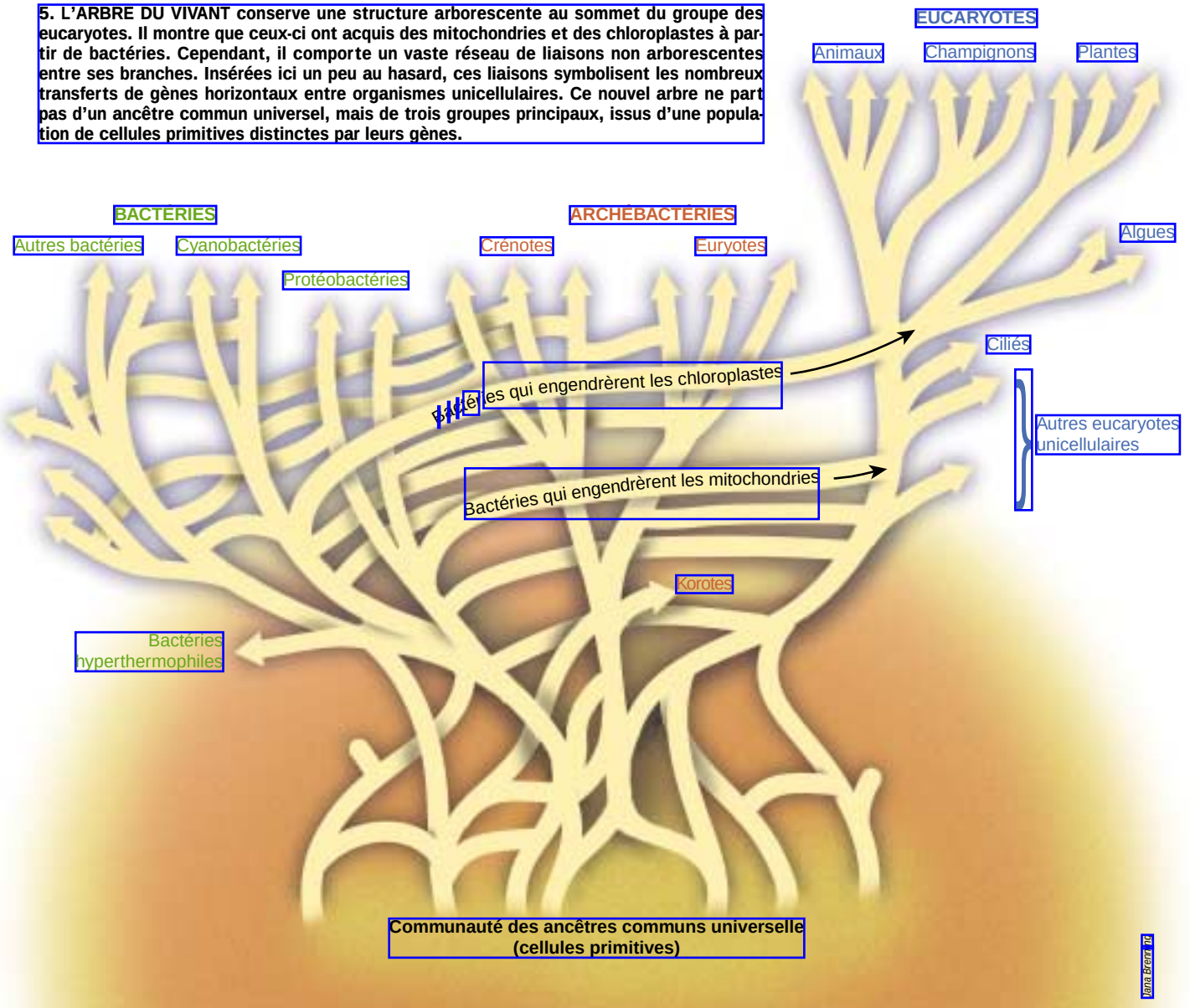
Cet arbre «révisé» serait encore faux, car la fusion des branches représente la réunion de génomes entiers, alors que seuls quelques gènes ont parfois été transférés. Pour décrire l'évolution des espèces avec précision, il faudrait superposer les arbres représentant des milliers de familles de gènes (les gènes des ARN ribosomiaux forment seulement l'une de ces familles).

En l'absence de transferts horizontaux, les arbres de toutes les familles de gènes auraient la même topologie (le même ordre de ramifications). Les



4. CET ARBRE classe les espèces vivantes d'après l'ordre des sous-unités dans le gène qui code l'enzyme HMGCoA réductase. Chez l'archéobactérie *Archaeoglobus fulgidus*, ce gène est de nature bactérienne. Cette découverte, et bien d'autres, prouve l'importance des transferts de gènes horizontaux (entre cellules d'espèces distinctes) dans l'évolution des organismes unicellulaires. L'arbre universel admis naguère ne tient pas compte de ces transferts.

5. L'ARBRE DU VIVANT conserve une structure arborescente au sommet du groupe des eucaryotes. Il montre que ceux-ci ont acquis des mitochondries et des chloroplastes à partir de bactéries. Cependant, il comporte un vaste réseau de liaisons non arborescentes entre ses branches. Insérées ici un peu au hasard, ces liaisons symbolisent les nombreux transferts de gènes horizontaux entre organismes unicellulaires. Ce nouvel arbre ne part pas d'un ancêtre commun universel, mais de trois groupes principaux, issus d'une population de cellules primitives distinctes par leurs gènes.



gènes ancestraux, à la racine de chaque arbre, figureraient tous dans le génome de l'ancêtre commun universel. Cependant, de nombreux transferts se sont produits : les arbres des familles de gènes diffèrent, même si certains ont une topologie en partie analogue. L'ancêtre commun universel est un mythe.

Selon C. Woese, «l'ancêtre commun universel n'était pas un organisme particulier qui aurait engendré une lignée unique. C'était plutôt un conglomerat de cellules primitives qui ont évolué ensemble jusqu'à l'apparition de plusieurs lignées distinctes et ont finalement engendré trois groupes primitifs (les bactéries, les archéobactéries et les eucaryotes)». Autrement dit, les cellules primitives avaient peu de gènes, et elles étaient très différentes les unes des autres. En échangeant leurs gènes, ces

cellules primitives se sont communiqué leurs facultés. Finalement, cet éventail de cellules éclectiques et variables a fusionné en trois groupes fondamentaux qui restent reconnaissables, car la plupart (mais pas l'ensemble) des transferts de gènes de l'époque se perpétuent dans chaque groupe.

Cette idée décourage certains microbiologistes, car elle ébranle l'arbre du

vivant. Toutefois, la biologie a évolué conformément aux canons de la science. Le séquençage des gènes et leur analyse, par des méthodes de phylogénie moléculaire, ont montré que l'hypothèse attrayante de l'arbre universel unique était trop schématique. Son abandon laisse le champ libre à de nouvelles hypothèses, dont nous ignorons encore les tenants et les aboutissants.

Ford DOOLITTLE est professeur de biochimie et de biologie moléculaire à l'Université Dalhousie (Halifax, Canada).

Carl WOESE, *The Universal Ancestor*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 95, n° 12, pp. 6854-6859, 9 juin 1998.

W. Ford DOOLITTLE, *You Are What You Eat : A Gene Transfer Ratchet Could Account for Bacterial Genes in Eukaryotic Nuclear Genomes*, in *Trends in Genetics*, vol. 14, n° 8, pp. 307-311, août 1998.

W. Ford DOOLITTLE, *Phylogenetic Classification and the Universal Tree*, in *Science*, vol. 284, pp. 2124-2128, 25 juin 1999.

Quand l'eau refuse de geler

JOHN WETTLAUER • GREG DASH

Une mince couche d'eau subsiste à la surface de la glace, même aux températures bien inférieures à 0 °C. Cette couche permet de faire du patin à glace et favorise l'électrification des nuages d'orage.

Quand l'hiver s'annonce, on isole les conduites d'eau les plus exposées afin d'empêcher l'eau de geler à l'intérieur des canalisations : la glace étant moins dense que l'eau, elle ferait éclater les tuyaux.

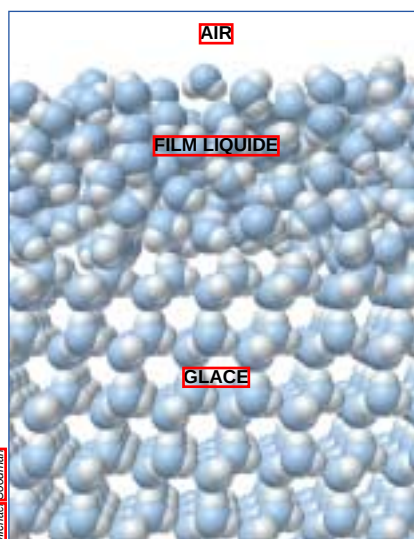
La solidification de l'eau et la fonte de la glace sont les exemples les plus communs, et parmi les plus spectaculaires, de changements de phase. Certains aspects de ces transformations restaient mystérieux. Ces 15 dernières années, les physico-chimistes ont découvert que les analyses avaient négligé la présence d'une couche d'eau dont l'épaisseur ne dépasse pas quelques diamètres moléculaires, à la surface de la glace. Cette pellicule correspond à un état naturel de la glace solide ; formée par «fusion de surface», elle possède certaines des caractéristiques structurales du solide situé sous elle, mais elle a la mobilité d'un fluide. Malgré sa minceur, cette pellicule intervient de façon très importante dans les phénomènes de fusion et de prise en glace. Servant à la fois de voie d'écoulement de l'eau et de porteur de charge électrique, elle est capable de soulever des pierres et de faire claquer des éclairs dans le ciel.

Boules de neige et patins à glace

Généralement les solides fondent de l'extérieur vers l'intérieur : un morceau de beurre posé sur un fourneau ou un morceau de soudure sur un fer à souder se liquéfie d'abord en surface, parce que l'extérieur est chauffé par l'environnement ; puis cette couche

externe fondue chauffe une couche plus à l'intérieur, et ainsi de suite. La fusion de surface est un effet plus subtil : une couche de liquide se forme à la surface des solides même quand leur température est inférieure de plusieurs dizaines de degrés à leur température de fusion.

Pour comprendre le mécanisme de la fusion de surface, imaginons que nous soyons dans un cristal de glace, où le réseau rigide résulte de la répétition d'un motif fixe (une «maille») composé de quelques molécules d'eau. En nous déplaçant du centre vers la surface, nous rencontrons périodiquement des molécules d'eau,



Michèle COCCO

DES FILMS D'EAU LIQUIDE présents à la surface de la glace permettent de patiner, même à des températures inférieures à 0 °C. Ces films lubrifiants se forment parce que les molécules d'eau de la surface sont moins tenues que les molécules de la masse.



toutes bien arrimées à leurs quatre voisines les plus proches. En revanche, quand nous arrivons près de la surface du cristal, le réseau se déforme, car les molécules externes sont en contact direct avec l'environnement non structuré que constitue l'air ambiant ; ces molécules de surface sont tenues par moins de liaisons chimiques, de sorte que leurs vibrations ont raison de leur ordonnancement. À une température suffisamment élevée (mais inférieure à la température de fusion normale), les molécules forment une couche comparable à du liquide (*voir le schéma de la page ci-contre*).

L'idée de l'existence d'un film liquide à la surface de la glace n'est

pas nouvelle, mais l'origine de cette couche était mal interprétée. Tous ceux qui ont déjà pris part à une bataille de boules de neige savent que, pour fabriquer un projectile efficace, on doit utiliser de la neige mouillée ; la neige sèche ne « colle » pas. C'est également vrai pour les « boules de sable » que l'on fait au bord de la mer. Dans les années 1630, René Descartes analysa ainsi la « tenue » de la glace. Puis, 200 ans plus tard, le même sujet captiva le physico-chimiste anglais Michael Faraday. Après 20 années d'analyse de la glace et de la neige, Faraday écrivit : « Quand on presse une poignée de neige mouillée, elle gèle et forme un bloc (contenant de l'eau) qui ne se disso-

cie pas comme le ferait une boule de sable ou d'un autre matériau. » Le journal de Faraday conserve les traces des premières études de ce que l'on nomme aujourd'hui la fusion de surface. Faraday avait conclu qu'une mince couche d'eau enveloppant les flocons de neige les collait en gelant ; cette couche lui semblait être une caractéristique naturelle de la glace à une température peu inférieure à sa température de fusion.

Faraday et son ami John Tyndall réalisèrent indépendamment des expériences qui leur montraient l'existence d'un film liquide à la surface de la glace à l'équilibre thermique, mais certains de leurs puissants contemporains étaient sceptiques. En 1849,



SCIENCE PHOTO LIBRARY

James Thompson et son frère William Thompson (qui fut anobli sous le nom de Lord Kelvin) répliquèrent en indiquant que la mince couche d'eau résultait plutôt d'un abaissement temporaire de la température de fusion, en raison d'une pression exercée par le contact d'un objet. Comme les molécules sont plus proches dans l'eau liquide que dans la glace, l'écrasement de la glace (sous la lame d'un patin, par exemple) aurait favorisé la fusion du solide.

Cette théorie de «fusion par compression» s'est imposée pour expliquer pourquoi la glace est glissante, et on la trouve encore dans de nombreux manuels de physique. Toutefois des calculs simples montrent que la fusion par compression n'explique la physique du patin à glace qu'à des températures proches de la température de fusion normale de la glace : un patineur glissant sur un lac gelé, sur des patins à glace ordinaires, ne réduit la température de fusion que de quelques degrés. Par la

seule fusion par compression, les patins ne glisseraient qu'aux températures légèrement inférieures à 0 °C. À Cambridge, en 1939, Frank Bowden et T.P. Hughes cherchèrent une meilleure théorie. Ils conclurent de leurs analyses qu'un autre facteur dominait à basse température : les frottements de la lame du patin contre la glace produisent suffisamment de chaleur pour former une mince couche d'eau liquide.

Les physico-chimistes étudient ainsi la théorie de la fusion par compression

Les effets de la fusion de surface sur l'environnement

UN SOL FROID ET DUR

Les agriculteurs savent que les gelées font remonter les cailloux dans les champs : des terres qu'ils avaient consciencieusement nettoyées sont sens dessus dessous, des pierres tiennent en équilibre sur des aiguilles de glace, et le sol est boursoufflé autour des gros rochers. Ce phénomène de «débeurrage» résulte des films liquides présents à la surface de la glace. Il s'amorce quand de l'air froid refroidit le sol et gèle une partie de l'eau à proximité de la surface du sol, mais les véritables dégâts se produisent après cet épisode initial. Les forces moléculaires et les impuretés sur les surfaces glacées retardent la prise en glace des films liquides jusqu'à ce que la température tombe à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de zéro. Jusqu'à cette température, une mince couche d'eau liquide enveloppe les cristaux de glace qui croissent entre les minuscules fragments de roches et d'argile qui composent le sol.

De l'eau provenant des profondeurs du sol alimente la croissance des cristaux de glace. L'eau chaude a plus d'énergie libre que l'eau froide et, comme tous les corps, elle tend vers un état d'énergie minimale. Dans les sols gelés, cette évolution engendre un phénomène de «pression thermomoléculaire» : l'eau chaude est attirée vers les endroits où elle peut perdre une partie de son énergie en formant de la glace. Cette migration est facilitée quand l'eau

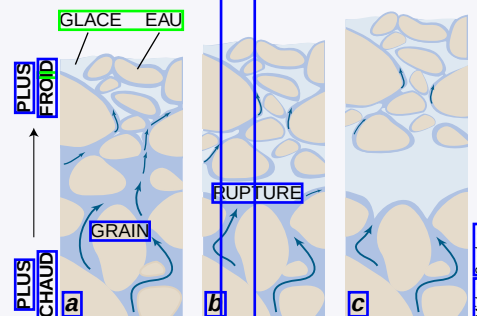
peut utiliser un passage déjà créé, à savoir le film liquide sur les surfaces gelées.

L'eau continue ainsi à envahir les espaces entre les grains de sol gelé jusqu'à ce que la pression de l'eau déjà présente soit égale à la pression de l'eau qui arrive. La force d'adhérence entre les grains de glace et de sol atteint 12,5 kilogrammes par centimètre carré par degré au-dessous de zéro, jusqu'à ce que la glace gèle complètement. La plupart

du temps, le sol craque bien avant qu'une telle pression soit atteinte. L'eau coule alors dans le vide, où elle gèle. La couche de glace grossit à mesure que de l'eau arrive et gèle, et finit par soulever le sol au-dessus d'elle. À Washington, Larry Wilen a fabriqué un appareil simple avec lequel il mesure directement les forces de soulèvement par le gel : dans une cavité circulaire, un cristal de glace est entouré d'eau ; la cavité est fermée d'un côté par une plaque de verre, de l'autre

par une feuille de plastique. Entre 0 °C et -1 °C, un film d'eau se forme là où la glace touche le plastique.

L. Wilen refroidit la surface du disque de sorte que le centre soit plus froid. L'eau du bord du disque, plus chaude, coule le long du film liquide vers le centre du cristal de glace, mue par la pression thermomoléculaire. Une partie de l'eau gèle en chemin, soulevant la feuille de plastique, de la même manière que l'expansion des couches de glace sous terre déforme le sol. En nous fondant sur cette expérience, nous avons construit une théorie qui explique le mouvement microscopique de ce film liquide responsable du débeurrage.



LE DÉBEURRAGE crée ces cercles de pierres sur l'île du Spitzberg. Le phénomène commence quand l'eau du sol gèle. De l'eau plus chaude monte le long des films liquides qui recouvrent alors la glace (a). Quand la pression de l'eau entre les grains de sol et de glace est supérieure à la pression due à l'eau qui arrive, le sol craque (b). L'eau s'engouffre et gèle, soulevant le sol (c).

et celle de la fusion par frottements depuis plus de 100 ans, mais ces deux théories n'expliquent ni la dynamique du phénomène de soulèvement du sol par le gel ni l'électrisation des nuages, qui sont deux effets importants de la glace dans l'environnement (voir l'encadré ci-dessous).

Les surfaces humides

Dès les années 1950, des physiciens ont repris l'étude de la fusion de surface, qui a finalement été obser-

vée en 1985 : à l'Institut de physique atomique et moléculaire d'Amsterdam, Joost Frenken et Friso van der Veen ont envoyé des faisceaux d'ions sur un cristal de plomb en le chauffant à une température proche de sa température de fusion (328 °C) ; en analysant comment les ions étaient réfléchis par le matériau, les deux physiciens ont déduit que les atomes de surface devenaient de plus en plus désordonnés, se comportant comme les particules d'un fluide dès la tem-

pérature de 318 °C. Le film s'épaississait progressivement, et le cristal finissait par fondre dans la masse à partir de la surface. Puis, en 1986, avec Da-Ming Zhu, l'un de nous (G. Dash) a montré que de minces couches d'argon et de néon subissent des changements de phase progressifs aux températures inférieures à leur température de fusion normale. Depuis, les physico-chimistes ont montré que la plupart des solides subissent cette fusion de surface.

LES COLLISIONS ELECTRISANTES

En été, la foudre précède souvent la grêle. En effet, la glace est présente dans les cumulo-nimbus qui constituent les fronts orageux et qui jouent un rôle central dans la production des éclairs. Les Anciens pensaient que la foudre était déclenchée par les dieux en colère. Plus tard, elle a tenu une place importante dans les recherches sur l'électricité. Toutefois on comprend seulement depuis peu comment la microphysique de la glace détermine le développement des charges électriques dans les nuages. Cette électrisation résulte de la présence d'un film liquide (d'une épaisseur de quelques molécules) à la surface des cristaux de glace qui sont en mouvement dans les nuages.

Les éclairs partent de la base des nuages, où la température est assez basse pour que les gouttelettes d'eau gèlent. Emportés par des courants d'air ascendants, ces minuscules cristaux de glace heurtent la grêle qui tombe vers le sol. Les cristaux de glace emportent une charge électrique positive, ce qui confère à la grêle une charge négative équivalente. Ainsi une différence de potentiel considérable s'établit dans les nuages, entre des charges positives, en haut des nuages, et des charges négatives, en bas.

Les physiciens avaient établi cette théorie grâce à des observations et à des simulations en laboratoire, mais ils ne savaient pas calculer la charge électrique des nuages. En 1984, Greg Turner et David Stow, de l'Université d'Auckland, ont proposé que les films d'eau qui couvrent la surface des cristaux de glace et des grêlons jouent un rôle dans le processus de charge. Cinq ans plus tard, avec notre collègue Marcia Baker, l'un de nous (G. Dash) a proposé un mécanisme plus détaillé de cet effet : la charge électrique est transmise avec l'eau quand celle-ci passe des grêlons aux cristaux de glace pendant la collision.

Dans notre laboratoire, Brian Mason a testé cette hypothèse en 1998 : il a pesé des grains de glace avant et après une collision, en utilisant deux microbalances à cristaux de quartz, qui détectent des changements de masse de l'ordre de quelques dix milliardièmes de

grammes ; il déterminait ainsi la masse infime de quelques couches de molécules d'eau. Il a également mesuré les courants électriques qui circulaient pendant les collisions afin de chercher un transfert de charge associé au transfert de masse. Comme le prédisait la théorie de M. Baker et G. Dash, un transfert de masse est toujours associé à un déplacement de charges. Le cristal de glace (épaissi par la collision d'une épaisseur de quelques centaines de molécules seulement, sur une surface de un centième de millimètre carré) acquiert simultanément une charge positive.

B. Mason a observé que la masse transférée est bien supérieure à ce que laisse

prévoir la théorie élémentaire de la fusion de surface. Cette différence entre les prévisions et les expériences nous a conduits à chercher une description plus rigoureuse des collisions qui électrisent les nuages. Nous supposons

qu'un mécanisme augmente la tendance de la glace à se liquéfier, même aux températures inférieures à sa température de fusion : une violente collision perturbe assez le réseau moléculaire solide de la glace pour produire du liquide supplémentaire, même à dix degrés (ou plus) sous la température de fusion. Les collisions, ainsi que les impuretés – tel le dioxyde de carbone, que l'on trouve en grande quantité sur la glace –, expliquent la présence d'un film d'eau épais à la surface des cristaux de glace. En raison de l'épaisseur du film, on obtient une libération de masse liquide et de charge plus importante que dans un contact ordinaire entre deux surfaces glacées.

La formation d'un liquide, après un tel impact, libère également des ions chargés négativement qui s'étaient accumulés près de la surface du cristal, à mesure qu'il grossissait. Pendant une collision, les cristaux de glace et les grêlons partagent leurs couches liquides, et les cristaux qui grossissent perdent une partie de leurs ions négatifs. Nous soupçonnons que c'est ainsi que les grêlons qui traversent la base du nuage pendant leur chute accumulent la charge négative qui produit les éclairs.



LES ECLAIRS proviennent de la base de nuages orageux, où les grêlons qui tombent accumulent une charge négative au cours de collisions avec des cristaux de glace qui montent au sein de courants ascendants (cartouche).



À l'occasion de l'année mondiale des mathématiques, revivez l'ambiance d'une époque à travers la vie et les travaux de ceux qui ont fait les mathématiques

ABEL

Un mathématicien
romantique
Code 0621-140 F
368 pages



FOURIER

Créateur de la
physique
mathématique
Code 1213-240 F
768 pages



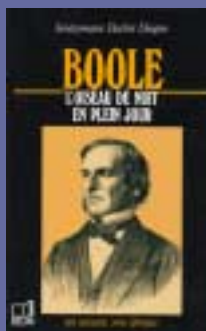
HARDY

L'apologie d'un
mathématicien
Code 0530-120 F
192 pages



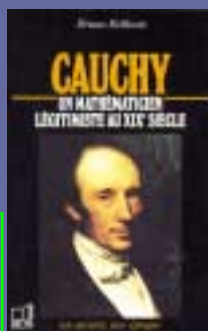
BOOLE

Le père du calcul
informatique
Code 1120-120 F
264 pages



CAUCHY

Un mathématicien
légitimiste
au XIX^e siècle
Code 0510-120 F
224 pages



KOVALEVSKAÏA

L'aventure d'une
mathématicienne
Code 1458-120 F
280 pages



BELIN

Voir bon de commande page 98

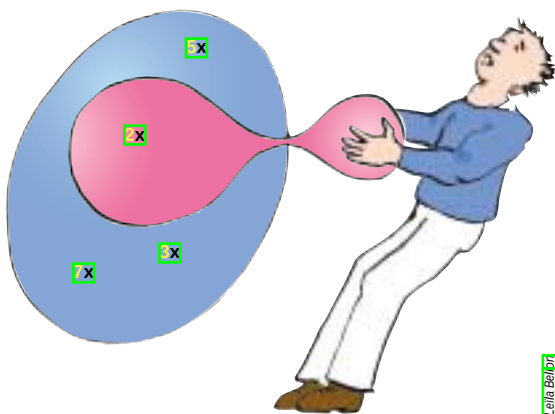
La glace, également, est couverte d'une mince couche d'eau. Plusieurs équipes ont suivi la fusion de surface de la glace en laboratoire. Toutefois, ils ne trouvent pas tous la même relation entre la température et l'épaisseur de la couche fondue. En effet, les diverses techniques utilisées ne mesurent pas les mêmes phénomènes. Les techniques optiques, par exemple, détectent des différences de densité entre la couche liquide et la glace solide à partir de différences de réflexion de la lumière. D'autre part, on obtient des informations sur la structure de la surface du cristal en mesurant la dispersion des rayons X.

Un autre phénomène est également à l'origine de différences entre les résultats d'expériences pourtant analogues : la couche liquide est fortement perturbée par les impuretés dissoutes dans l'eau. Or des impuretés de l'air ambiant, essentiellement des sels et du dioxyde de carbone, pénètrent dans les instruments et s'accumulent à la surface de la glace pendant la prise en glace. Nous commençons seulement à étudier leur influence sur la fusion de surface, mais une étude théorique réalisée par l'un de nous (J. Wettlaufer) indique que les impuretés favorisent la fusion de surface : la glace solide semble rejeter efficacement les impuretés, qui s'introduisent difficilement dans le réseau cristallin ; elles s'accumulent alors dans la couche liquide.

Ainsi, plus de 150 ans après les premières observations des minces couches de liquide à la surface de la glace par Faraday, nous commençons tout juste à clarifier les mécanismes physiques responsables du caractère glissant de la glace, de ses propriétés d'adhérence et de son énorme pouvoir de destruction. Beaucoup de questions restent ouvertes, mais nous savons qu'une meilleure connaissance de la microphysique de la glace nous permettra de mieux comprendre ses effets sur l'environnement. Le soulèvement du sol par le gel et l'électrisation des nuages ne sont que deux des phénomènes qui semblent dus à la couche liquide qui entoure la glace.

John WETTLAUFER et Greg DASH sont physiciens à l'Université de l'État de Washington.

Ice Physics and the Natural Environment, sous la direction de J.S. Wettlaufer, J.G. Dash et N. Untersteiner, NATO ASI Series I : Global Environmental Change, vol. 56, Springer-Verlag, 1999.



La stratégie des sous-ensembles

IAN STEWART

Qui trouvera la stratégie gagnante d'un nouveau jeu, qui combine la théorie des ensembles et la topologie ?

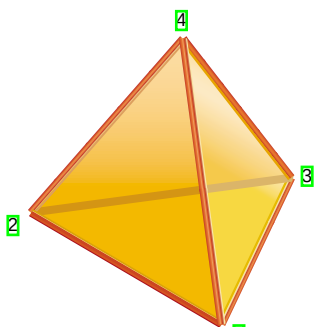
Les Babyloniens expliquaient déjà les notions mathématiques grâce à des jeux et à des énigmes : les archéologues ont retrouvé des problèmes d'arithmétique gravés sur des tablettes d'argile. Depuis, les mathématiques ont progressé, mais elles engendrent toujours des jeux. À l'Université de Berkeley, David Gale en a inventé un qu'il a décrit dans son livre *Games of no chance* (Cambridge University Press) et qui allie la théorie des ensembles et la topologie. Ce jeu devrait intéresser tous les amateurs de jeux mathématiques, car personne n'a encore découvert de stratégie gagnante.

Ce jeu considère des ensembles, c'est-à-dire des collections d'objets, nommés éléments. Lorsqu'un ensemble a un nombre fini d'éléments, on peut définir

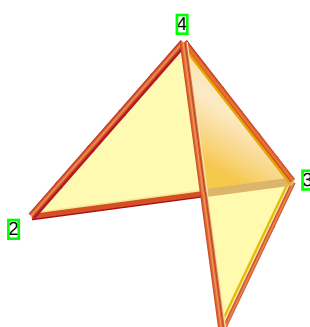
l'ensemble «en extension», par une liste. Par exemple, $\{2, 3, 5, 7\}$ est l'ensemble des nombres premiers inférieurs à 10. Un ensemble X est un sous-ensemble d'un ensemble Y quand tous les éléments de X appartiennent à Y : l'ensemble $\{3, 5, 7\}$ des nombres premiers impairs inférieurs à 10 est un sous-ensemble de l'ensemble $\{2, 3, 5, 7\}$. Chaque ensemble est un sous-ensemble de lui-même, et un sous-ensemble de Y est strict lorsqu'il est différent de Y . Un sous-ensemble peut ne contenir qu'un seul élément : $\{2\}$ est l'ensemble des nombres premiers pairs. Le sous-ensemble complémentaire de X dans Y est composé des éléments de Y qui n'appartiennent pas à X : $\{2\}$ est le complémentaire de $\{3, 5, 7\}$ dans l'ensemble des nombres premiers inférieurs à 10.

Enfin, un sous-ensemble peut n'avoir aucun élément, c'est l'ensemble vide.

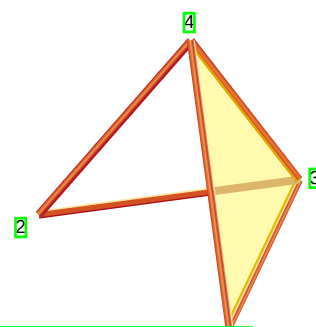
Le jeu de D. Gale est nommé «un sous-ensemble à emporter». Il se joue à partir d'un ensemble fini S , par exemple l'ensemble des entiers de 1 à n $\{1, 2, 3, \dots, n\}$. À chaque tour, un joueur enlève de S un sous-ensemble strict non vide, tel qu'il ne contienne aucun sous-ensemble déjà prélevé pendant la partie. Le premier qui ne peut plus jouer a perdu. Un moyen pratique de jouer consiste à composer un tableau à n colonnes, une par élément de S . Sur une ligne, on marque une croix dans les colonnes correspondant aux éléments du sous-ensemble pris par un joueur. Ainsi, une ligne de croix représente le choix d'un joueur.



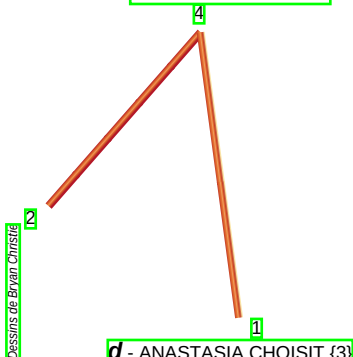
a - POSITION INITIALE



b - ANASTASIA CHOISIT $\{1, 2\}$



c - BARBARA PREND $\{2, 3, 4\}$



d - ANASTASIA CHOISIT $\{3\}$



e - BARBARA PREND $\{4\}$



f - ANASTASIA CHOISIT $\{2\}$



g - BARBARA PREND $\{1\}$

1. Le jeu du «un sous-ensemble à emporter» peut être représenté géométriquement. Pour $n = 4$, la position initiale est un tétraèdre (a). Les deux joueuses, Anastasia et Barbara, choisissent alternative-

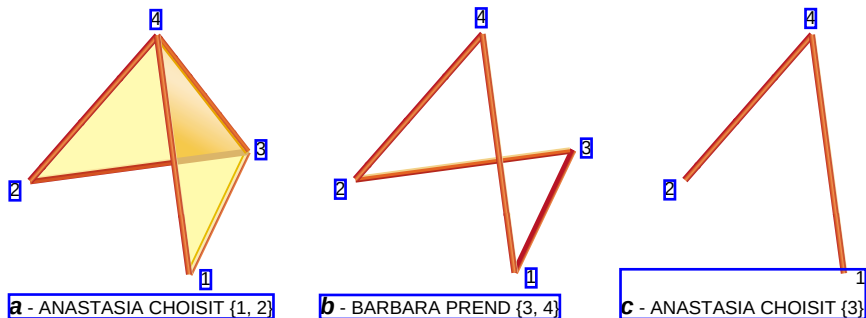
ment un sous-ensemble dont les composants correspondants du tétraèdre (sommets, arêtes et faces) sont éliminés. Le joueur, ici Barbara, qui enlève le dernier élément gagne.

Avec ces règles, examinons quelques parties entre deux joueuses, Anastasia et Barbara. Anastasia joue toujours en premier. Quand $n = 1$, l'ensemble S n'a aucun sous-ensemble strict. Lorsque $n = 2$, $S = \{1, 2\}$, Anastasia ne peut que jouer $\{1\}$ ou $\{2\}$: quoi qu'elle choisisse, Barbara prend le second sous-ensemble et gagne, puisque Anastasia ne peut alors plus rien retirer.

Pour $n = 3$ et $S = \{1, 2, 3\}$, Anastasia peut choisir le sous-ensemble à deux éléments $\{1, 2\}$. Barbara prend alors le sous-ensemble complémentaire $\{3\}$. Comme Anastasia ne peut plus choisir de sous-ensemble contenant $\{3\}$, elle doit prendre un sous-ensemble de $\{1, 2\}$: le jeu est identique à celui où $S = \{1, 2\}$, et Barbara gagne encore. Le déroulement du jeu est semblable quel que soit le sous-ensemble de deux éléments pris au départ. Anastasia, qui se lasse de perdre, décide alors de commencer avec un sous-ensemble à un élément, par exemple $\{3\}$. Cependant, Barbara prend alors le complémentaire $\{1, 2\}$ et elle gagne encore. Au total, puisque Anastasia ne peut commencer qu'avec un sous-ensemble à un ou deux éléments, Barbara a une stratégie gagnante qui consiste à prendre systématiquement le complémentaire du sous-ensemble d'Anastasia. Quand n est supérieur à trois, Barbara a-t-elle encore une stratégie gagnante ?

Pour le savoir, examinons des problèmes de topologie, cette «géométrie des surfaces déformables». En topologie, on s'intéresse à des objets que l'on peut se représenter comme du caoutchouc qui pourrait se traverser, mais pas se déchirer. La représentation géométrique du «un sous-ensemble à emporter» impose une triangulation d'une surface, c'est-à-dire son fractionnement en triangles joints par leurs côtés. Cette méthode a été initialement mise au point pour des surfaces (à deux dimensions, donc), mais elle est généralisable à des objets de dimensions supérieures ; les triangles sont alors remplacés par des formes élémentaires nommées simplexes. Par exemple, un simplexe à trois dimensions, ou 3-simplexe, est un tétraèdre (voir la figure 1). Un tétraèdre a quatre sommets, quatre faces et six arêtes. Les faces sont des triangles (des 2-simplexes), les arêtes sont des segments (des 1-simplexes) et les sommets, des points (des 0-simplexes).

Ces composants du tétraèdre correspondent exactement aux sous-ensembles de $\{1, 2, 3, 4\}$: le tétraèdre est l'ensemble entier ; les faces sont les sous-ensembles de trois éléments $\{1, 2, 3\}$, $\{1, 2, 4\}$, $\{1, 3, 4\}$ et $\{2, 3, 4\}$; les arêtes sont les sous-ensembles à



2. La stratégie du complémentaire échoue dans cette partie de «ôte simplexe», car Barbara ne peut prendre le complémentaire du sous-ensemble choisi par Anastasia au deuxième tour (c).

deux éléments $\{1, 2\}$, $\{1, 3\}$, $\{1, 4\}$, $\{2, 3\}$, $\{2, 4\}$ et $\{3, 4\}$; enfin, les sommets sont les sous-ensembles à un élément $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3\}$ et $\{4\}$.

N'importe quel $(n-1)$ -simplexe représente un ensemble $S = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, et chaque simplexe de dimension inférieure à $n-1$ est un sous-ensemble strict de l'ensemble S . Le «un sous-ensemble à emporter» devient alors un nouveau jeu, le «ôte simplexe» : à partir d'un simplexe donné, chaque joueur choisit un sous-simplexe strict de n'importe quelle dimension et en élimine l'intérieur, ainsi que tous les intérieurs des sous-simplexes qui le contiennent, sans toutefois supprimer les frontières du sous-simplexe choisi, par exemple les côtés d'une face triangulaire ou les deux extrémités d'une arête.

Nous pouvons utiliser cette représentation pour analyser une partie de «ôte simplexe» avec un 3-simplexe, qui équivaut à une partie de «un sous-ensemble à emporter» pour $n = 4$. La position initiale est un tétraèdre. La figure 1 illustre une série de mouvements autorisés. Une étude systématique des parties montre que Barbara a une stratégie gagnante pour $n = 4$, $n = 5$ et $n = 6$. D. Gale n'a pas encore réussi à démontrer que Barbara a une stratégie gagnante quel que soit n . Quelle est la stratégie gagnante de Barbara pour

n supérieur à trois ? Doit-elle toujours choisir le complémentaire du choix d'Anastasia ? Quand $n = 4$, Anastasia peut choisir un sommet, une arête ou une face. Lorsqu'elle choisit un sommet, Barbara prend alors le complémentaire, et le jeu se réduit à une partie où $n = 3$: Barbara gagne. Quand Anastasia choisit une face triangulaire, Barbara, en prenant le sommet complémentaire, réduit à nouveau le jeu, et gagne encore.

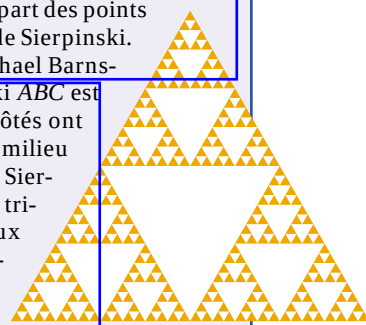
Cependant, quand Anastasia prend un segment, par exemple $\{1, 2\}$, et Barbara le complémentaire $\{3, 4\}$ (voir la figure 2), le jeu n'est pas réduit à une partie où n est inférieur. Anastasia prend ensuite $\{3\}$: Barbara ne peut choisir le complémentaire $\{1, 2, 4\}$, car c'est un coup non autorisé ; la face triangulaire correspondante a déjà été éliminée. La stratégie du complémentaire échoue ici. Certains mathématiciens ont proposé que pour tout n , Barbara a intérêt à choisir le complémentaire du coup d'Anastasia. Toutefois, cette stratégie n'est pas possible à chaque coup.

Anastasia est-elle condamnée à perdre chaque partie ? Les ordinateurs aideront à répondre à cette question pour des petites valeurs de n . Pour des n supérieurs, la réponse nécessite une approche plus fine.

Réactions

Ron Menendez, de Chatham, a découvert une propriété intéressante du triangle de Sierpinski (voir *Le triangle omniprésent*, *Pour la Science*, septembre 1999). Choisissez un point X de l'intérieur d'un triangle équilatéral ABC , puis un des sommets au hasard (par exemple, avec un dé). Le milieu du segment joignant X à ce sommet devient le nouveau point X . Répétez la procédure en choisissant à chaque fois un sommet au hasard. Pour la plupart des points initiaux, l'ensemble des points obtenus forme le triangle de Sierpinski.

La théorie des formes fractales autosimilaires de Michael Barnsley explique cet étrange résultat. Le triangle de Sierpinski ABC est composé de trois copies réduites de lui-même, dont les côtés ont une longueur égale à la moitié du triangle ABC initial. Le milieu d'un segment joignant un point quelconque du triangle de Sierpinski et l'un des sommets A , B ou C appartient aussi au triangle de Sierpinski. Cette particularité correspond aux chemins aléatoires de R. Menendez. M. Barnsley a démontré que tout chemin aléatoire de ce type converge vers le triangle de Sierpinski.





Le tatouage des images numériques

CAROLINE FONTAINE

Le tatouage des images, qui protège les créateurs, est indécélable par l'observateur : l'image de droite, tatouée, semble identique à la figure de gauche. Le tatouage est une signature qui prouve l'origine de la copie. Il n'est efficace que s'il résiste aux divers traitements de l'image, compression, ajout de bruit, changement de contraste, etc.



Le développement des réseaux de communication et des supports numériques comme le Compact Disc, le CD-ROM, le Digital Versatile Disc... entraîne une diffusion massive de documents stockés à l'aide de formats numériques, tels JPEG, MPEG, MP3. Ces techniques, qui permettent d'emmagasiner une grande quantité d'information en peu de place, facilitent aussi l'utilisation illégale des documents : il est en effet extrêmement aisé de récupérer un document sur Internet, ou sur un CD-ROM, et de le copier un grand nombre de fois avant de diffuser ces duplications. Non seulement la copie est facile, mais elle est parfaite : alors qu'un document analogique se détériore lorsqu'on le duplique, la copie numérique a exactement les mêmes qualités que l'original. Ces manipulations, si elles débouchent sur la commercialisation des copies, ou sur toute utilisation autre que privée, sont illégales tant que les droits d'auteur n'ont pas été versés à l'ayant droit du document.

L'objectif est d'associer à un document le nom du ou des ayant(s) droit associé(s) (il peut y avoir plusieurs ayants droit : le créateur, le producteur et le diffuseur, par exemple).

LA NÉCESSITÉ DE NOUVELLES TECHNIQUES

La recherche sur la protection des images a principalement débuté vers 1993, et aujourd'hui plus d'une centaine d'articles sont annuellement consacrés à ce sujet. Les premières techniques, comme le contrôle d'accès (destiné à autoriser ou

à refuser l'accès au document) ou la cryptographie (chiffrer ou signer le document) se sont révélées insuffisantes ou d'un emploi difficile. En effet, les dispositifs de cryptographie protègent l'image lors d'une transaction, mais pas au-delà : le destinataire retrouve après déchiffrement (ou vérification de la signature) la même version de l'image que celle qui précédait l'envoi, donc sans protection. Une technique complémentaire a alors été envisagée : le tatouage, dérivé de la stéganographie.

La stéganographie est l'art de cacher une information, une signature, dans un message que n'importe qui va pouvoir observer. Ce message peut être de diverses natures : texte, image, son. Une manière très simple est, par exemple, d'écrire un texte et de considérer le premier mot de chaque ligne : le texte «acrostiche» semble innocent dans sa globalité, mais la phrase constituée des premiers mots de chaque ligne peut avoir un sens tout différent. On peut aussi, dans un message électronique, placer des espaces en fin de ligne, le nombre d'espaces déterminant le «caractère» caché dans cette ligne ; on peut aussi inscrire l'information dans certaines composantes de l'image. Ainsi, toute personne non avertie ne s'apercevra pas qu'une information importante est transmise par l'intermédiaire d'un document d'apparence innocente.

L'idée est de cacher dans le document une information propre à son ayant droit sous la forme d'une marque qui ne pourra être enlevée sans une altération importante de ce document (rendant alors son

utilisation impossible). Cette marque, dénommée filigrane, devra rester imperceptible et faire suffisamment corps avec le document pour rester présente malgré les manipulations que ce dernier risque de subir. Les transformations pouvant altérer la marque sont des rotations, des changements d'échelle, des symétries, des découpages, des changements de format, l'application de filtres, l'ajout de bruit etc. La marque peut aussi être dégradée lors d'une impression/renumérisation par scanner.

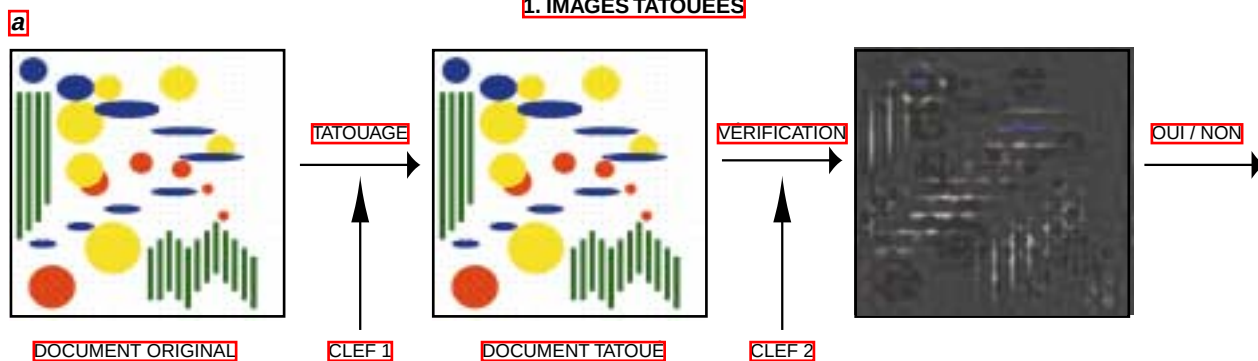
Ces manipulations peuvent avoir pour but la destruction de la marque, ou tout simplement une utilisation facilitée de l'image (compression JPEG ou changement d'échelle, par exemple). On doit reconnaître la marque même quand le contenu numérique de l'image a changé.

Un système de tatouage dépend du contexte de son utilisation ; les spécialistes prennent en considération les contraintes des ressources informatiques (temps d'exécution des programmes de tatouage et de vérification, mémoire disponible) et les impératifs de la sécurité (environnement ouvert, fermé, qui va avoir accès à quoi, qui va exécuter les programmes de tatouage, de vérification).

LE PRINCIPE DE VÉRIFICATION

L'algorithme de tatouage, supposé connu de tous, est paramétré par une clé qui reste secrète : il n'est pas raisonnable de faire reposer la sécurité du système sur l'idée que personne ne connaît l'algorithme, car on sait bien que, dans la

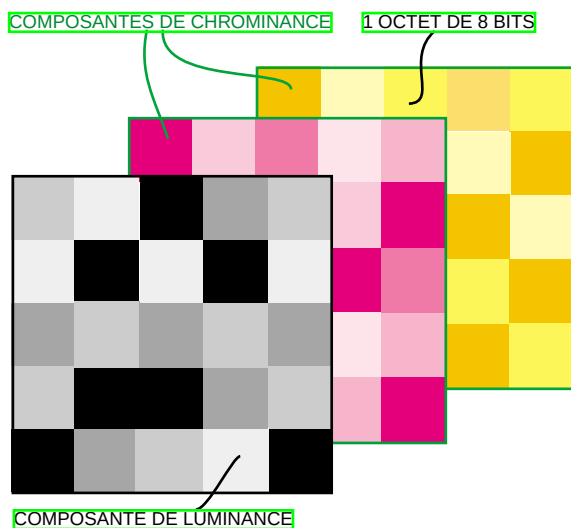
1. IMAGES TATOUÉES



Dans un système de tatouage (a), l'incrustation du filigrane est paramétrée par une clé ; l'algorithme de vérification dit si cette clé a bien servi à tatouer le document, et donc si la personne détentrice de la clé est propriétaire des droits du document. Exemple d'image tatouée (b) par l'algorithme mis au point à l'Université catholique de Louvain (Belgique)

avec, de gauche à droite, l'image originale, l'image tatouée, le tatouage "différence". Le tatouage, invisible à l'œil, exploite la nature de l'image : l'information cachée est insérée dans les zones où les variations d'intensité sont notables, car le changement sera moins perceptible, alors que dans les zones uniformes toute modification est patente.

2. LE STOCKAGE DES IMAGES NUMÉRIQUES



Il existe de nombreux formats de stockage des images numériques : bitmap, pixmap, gif, tiff, ppm... Une image est un tableau de pixels, ces derniers étant souvent codés sur trois octets (1 octet, égal à 8 bits, peut prendre 256 valeurs, de 0 à 255 ; le bit de poids faible de l'octet désigne celui qui code la parité du nombre représenté : 1 si le nombre est impair, 0 s'il est pair). Ces octets peuvent désigner les proportions de Rouge, Vert et Bleu, ou bien de manière équivalente une composante de luminance (intensité lumineuse) et deux composantes chromatiques (couleur). Certains formats, comme JPEG, correspondent à une version compressée de l'image. La compression minimise l'espace mémoire occupé dans le disque : la quantité d'information contenue dans l'image compressée est inférieure à celle de l'image initiale, et la quantité d'information perdue, paramétrée par l'utilisateur, détermine la qualité de l'image compressée. Cette compression peut altérer le tatouage et le rendre inopérant.

pratique, il ne reste pas longtemps secret. On suppose ici que chaque clé est propre à un ayant droit, clé qui permet de l'identifier. Parallèlement, on met au point un système de gestion des clés, reposant sur un « tiers de confiance ». Ce dernier est une entité sécurisée et angélique qui ne triche ni ne ment jamais : c'est elle qui va gérer les clés et opérer les vérifications. Cette opération délicate ne peut être confiée, ni à l'ayant droit présumé du document, car il pourrait mentir, ni à quelqu'un d'autre, car il faut la clé pour opérer cette vérification, et si celle-ci est révélée au grand jour, les marques qu'elle a produites deviennent très vulnérables.

Revenons aux techniques d'incrustation proprement dites. Le tatouage est engendré par des techniques de traitement du signal. Nous envisagerons ici le tatouage des images fixes (les contraintes du tatouage de la vidéo sont légèrement différentes : une image vidéo étant de moins bonne qualité, il est plus facile d'y camoufler une marque, mais, d'un autre côté, l'algorithme de tatouage doit être très rapide).

L'évolution des algorithmes de tatouage proposés depuis cinq ans est très nette : on est passé de solutions simples, naïves et peu résistantes à des techniques complexes et plus robustes. Ces dernières reposent sur la modification des coefficients de la transformée de Fourier (bidimensionnelle) de l'image (voir la figure 3). Ces approches engendrent des filigranes de bonne résistance. La détection du filigrane repose en général sur la présence ou non d'une structure particulière dans l'image ; on cache par exemple un signal présentant des propriétés de corrélation très spécifiques (voir la figure 4). La conception d'un algorithme de tatouage/vérification commence donc par le choix de la structure de modification de l'image ; ce choix est contraint par la spécificité de l'utilisation (degré d'invisibilité, robustesse, rapidité d'exécution, mémoire utilisée).

Le tatouage impose un certain nombre de compromis entre la quantité d'information cachée, l'invisibilité et la robustesse de la marque. Il faut également tenir compte, lors de la concep-

tion de l'algorithme de vérification, des risques de non-détection (l'ayant droit présumé est réellement le propriétaire du document, mais l'algorithme n'arrive pas à le prouver) et de fausse alarme (on identifie une personne comme étant l'ayant droit du document, alors que c'est faux). Il convient aussi de définir si la présence de l'image originale est nécessaire à la vérification.

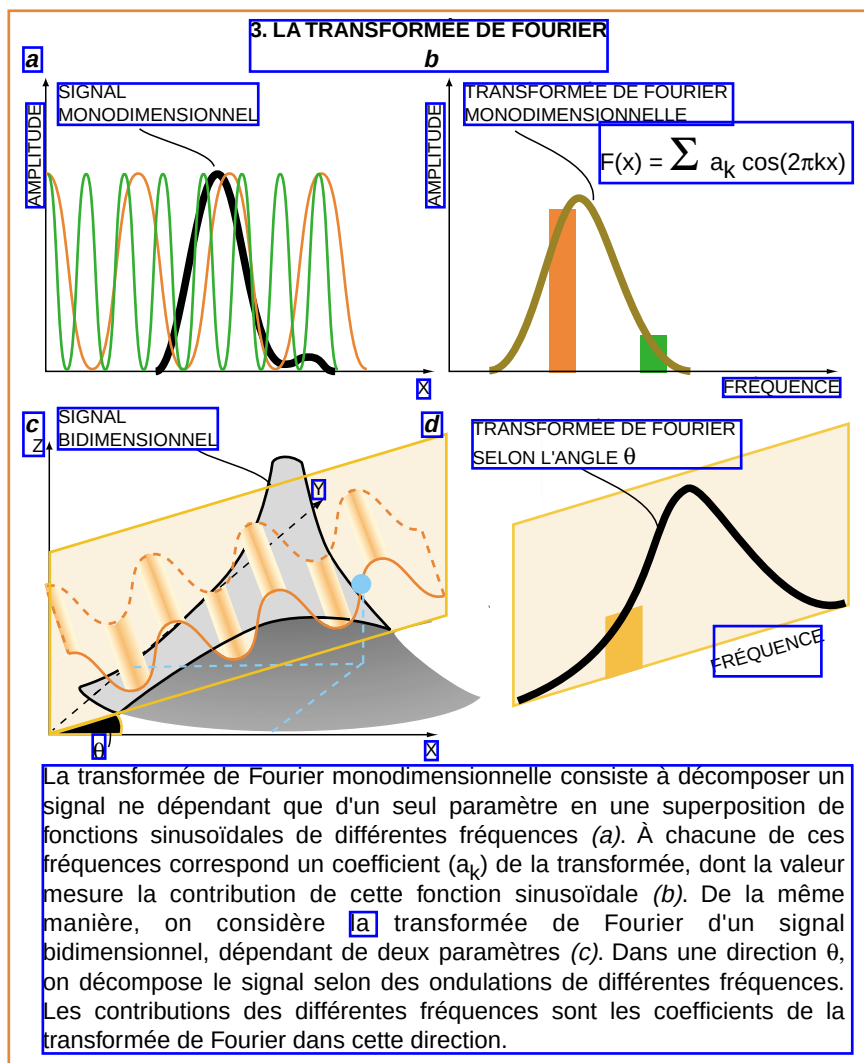
Les techniques d'incrustation se répartissent en deux catégories : les « spatiales » qui modifient directement les pixels (un pixel est un élément d'image), et les « fréquentielles » qui changent les coefficients des transformées de Fourier. Les algorithmes présentés ci-après donnent un panorama des techniques employées et des concepts qui entrent en jeu. Ces algorithmes opèrent uniquement sur la luminance (intensité lumineuse par unité de surface) des pixels (voir la figure 2).

LA PROGRESSION DES TECHNIQUES

La première technique proposée est simple : une clé secrète détermine, dans une zone de l'image, l'emplacement de pixels. La luminance de chacun d'entre eux est codée par une valeur comprise entre 0 (en binaire 00000000), et 255 (en binaire 11111111). Le bit de poids faible de l'écriture binaire, le dernier, est celui qui a le moins d'influence sur la valeur de la luminance. Statistiquement ces bits de poids faible ont une probabilité 1/2 de valoir 0, et 1/2 de valoir 1. On cache l'information en introduisant un biais dans cette proportion : pour ce faire, on impose la valeur 1 aux bits de faible poids de certains pixels, choisis selon la clé. Cette modification sera imperceptible pour l'œil car la luminance de ces pixels aura varié d'au plus 1. On vérifie alors, sur l'image modifiée, la présence ou non d'un tatouage, en analysant les bits de poids faible correspondant aux pixels associés à la clé : si ces bits sont égaux à 1, alors l'image a été tatouée avec la clé (et elle appartient à l'ayant droit associé à cette dernière) sinon, elle n'a pas été tatouée avec cette clé (et n'appartient pas à cet ayant droit).

Malheureusement, les bits de poids faible des octets sont modifiés quand on applique la moindre transformation à l'image, en particulier lors d'une compression avec JPEG.

En 1995, W. Bender et ses collègues de l'Institut de technologie du Massachusetts ont proposé un algorithme dénommé *Patchwork*, qui repose sur la différence de luminance observée entre deux ensembles de pixels. Il est fondé sur l'analyse statistique suivante : si l'on considère deux grands ensembles A et B de



pixels répartis dans une image, alors la moyenne des différences de luminance entre les pixels de A et ceux de B est très proche de 0. Dans ce tatouage, on choisit des ensembles A et B (suivant une clé secrète), puis on modifie leur luminance : on augmente celle des pixels de A d'une quantité c, et l'on diminue celle des pixels de B de la même quantité c.

Pour vérifier la provenance de l'image, on détermine les ensembles A et B à l'aide de la clé, puis on mesure la moyenne des différences de luminance des pixels. On obtient une moyenne proche de 2 c si l'image a été tatouée avec la clé, une moyenne proche de 0 sinon. Ce type de filigrane résiste mieux que le précédent à certaines manipulations de l'image, mais, hélas, il n'est toujours pas satisfaisant face à une compression JPEG (remarquons cependant que les modifications des propriétés statistiques d'ensembles de pixels, ou de coefficients, sont souvent utilisées et peuvent donner des filigranes résistants).

LA COMPRESSION

Revenons sur le principe de la compression JPEG : les trois composantes de luminance et de chrominance sont traitées séparément et de la même manière. Une composante de l'image numérisée est découpée en blocs contigus de taille 8×8 , soit 64 pixels (si l'image n'a pas une taille adéquate, elle est complétée par des octets nuls) et l'on applique une transformée de Fourier bidimensionnelle (voir la figure 3) : on obtient ainsi 64 coefficients de Fourier qui correspondent à 64 paires d'orientation et de fréquence différentes. On modifie ensuite les coefficients correspondant aux hautes fréquences, modification d'autant plus importante que l'on accepte une diminution de la résolution. On effectue ensuite la transformation de Fourier inverse pour retrouver un bloc image de 8×8 pixels.

Les octets de luminance ont été changés et leur bit de poids faible, sensible à la moindre variation, a pris une valeur aléatoire : c'est pour cette raison que toute technique de tatouage reposant sur la valeur des bits de poids faible est mise en défaut par une compression JPEG.

Afin d'être sûrs de créer un filigrane résistant à la compression JPEG, E. Koch et J. Zhao, travaillant au *Franhofer Institute for Computer Graphics*, à Darmstadt, ont décidé, en 1995, de mettre au point un algorithme de tatouage qui tient compte de l'algorithme de compression JPEG. On ne peut cacher l'information dans les coefficients de Fourier de haute fréquence car ceux-ci sont modifiés lors de la compression ; on ne peut, non plus, changer les coefficients de basse fréquence qui se

4. AUTOCORRELATION DES SUITES

Une technique de tatouage consiste à disposer dans l'image une suite de bits de façon qu'elle soit clairement identifiable. Pour cela il importe que la fonction d'autocorrélation, que nous allons examiner, soit de valeur élevée, et que les fonctions de corrélation avec des suites décalées soient faibles. Examinons deux suites où chaque terme est égal à +1 ou -1 : la corrélation de ces deux suites est égale au nombre de fois où deux chiffres de même rang coïncident, moins le nombre de fois où ils diffèrent, c'est-à-dire à la somme des produits des termes de même rang.

Suite 1	1	-1	1	1	-1
Suite 2	-1	-1	1	-1	-1

Corrélation : $-1 + 1 + 1 + -1 + 1 = 3 - 2 = 1$

L'autocorrélation d'une suite est mesurée par toutes les corrélations entre cette suite et ses versions décalées (permutations circulaires).

Suite initiale	1	-1	1	1	-1	Corrélation : $5 - 0 = 5$
Suite décalée de 1	1	1	-1	1	1	Corrélation : $1 - 4 = -3$
Suite décalée de 2	1	-1	1	-1	1	Corrélation : $3 - 2 = 1$
Suite décalée de 3	1	1	-1	1	-1	Corrélation : $3 - 2 = 1$
Suite décalée de 4	-1	1	1	-1	1	Corrélation : $1 - 4 = -3$
Suite décalée de 5 = suite initiale						

Une suite, dite M-séquence, présente une autocorrélation optimale (un pic très net, et les autres valeurs presque nulles) :

Suite initiale	-1	-1	1	-1	1	1	1	Corrélation : $7 - 0 = 7$
Suite décalée de 1	1	-1	-1	1	-1	1	1	Corrélation : $3 - 4 = -1$
Suite décalée de 2	1	1	-1	-1	1	-1	1	Corrélation : $3 - 4 = -1$
Suite décalée de 3	1	1	1	-1	-1	1	-1	Corrélation : $3 - 4 = -1$
Suite décalée de 4	-1	1	1	1	-1	-1	1	Corrélation : $3 - 4 = -1$
Suite décalée de 5	1	-1	1	1	1	-1	-1	Corrélation : $3 - 4 = -1$
Suite décalée de 6	-1	1	-1	1	1	1	-1	Corrélation : $3 - 4 = -1$

De telles suites sont très utilisées en télécommunications. Ici, elles vont servir de structures de référence et seront garantes de la présence du tatouage.

traduisent sur l'image par des zones homogènes où toute modification est visible. Aussi les chercheurs changent-ils, selon une règle préétablie, les valeurs des coefficients de Fourier, pour des fréquences moyennes. Les blocs 8×8 ainsi transformés sont déterminés par la clé secrète. Le filigrane enfoui dans l'image résiste alors bien à une compression JPEG ; il est néanmoins très vulnérable aux manipulations géométriques et à l'impression/renumérisation.

LE PIC CACHE

Nous l'avons vu, l'objectif du tatouage est de transmettre une information à travers un support (l'image), bien que cette image subisse des transformations. Il est alors naturel d'utiliser des techniques qui ont fait leurs preuves dans les télécommunications. L'exemple le plus flagrant que nous allons examiner est celui de l'étalement de spectre. L'idée est de plaquer sur l'image un signal bidimensionnel ressemblant à une tôle ondulée ; la transformée de Fourier de ce signal a la forme d'un pic centré autour de la fréquence d'ondulation et décroît fortement autour

de ce pic. La clé est la structure de la tôle, c'est-à-dire sa fréquence spatiale et la direction d'ondulation.

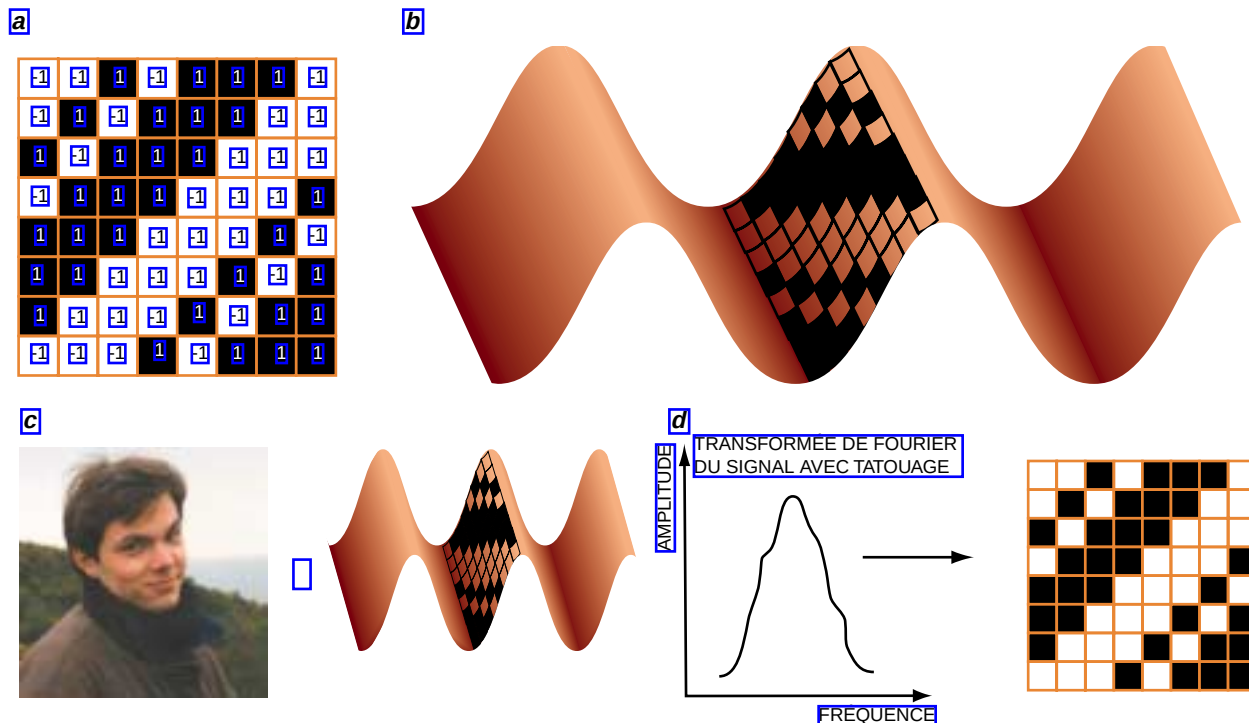
Imaginons maintenant que vous désiriez prouver la provenance d'une image tatouée, en l'absence de l'image originale. Vous prenez la transformée de Fourier de l'image tatouée et vous en extrayez, grâce à la clé, le signal caché (voir la figure 5). Reste alors à vérifier si celui-ci contient bien la structure adéquate.

LES M-SÉQUENCES

Un tatouage bien identifiable est obtenu à l'aide de suites binaires, appelées «M-séquences», qui présentent une très faible corrélation avec toutes leurs versions décalées ; à titre d'exemple (voir la figure 4), une version décalée à droite d'un cran de (1, -1, 1, -1, -1) est (-1, 1, -1, 1, -1).

L'analyse de la courbe de corrélation de ce pic permet de l'identifier même s'il a été déformé. La vérification est plus probante qu'une comparaison de la suite initiale de bits et de cette suite altérée. Cette technique a été employée, entre autres, par l'équipe «télé» de l'Université catholique de Louvain, qui a mis au point

5. LE TATOUAGE PAR ÉTALEMENT DE SPECTRE



a) Le signal à cacher est une grille-image constituée de carrés de pixels "noirs" ou "blancs", dont l'ordre est celui d'une m-séquence. b) On superpose à cette image le tatouage placé sur un "tôle ondulée" de fréquence et de direction données par une clef secrète. c) Ce tatouage est surimposé à l'image : en fait les pixels "noirs" (resp. "blancs") correspondent à une augmentation (resp. diminution) de la luminance de l'image. Lors de cette étape, la grille est modifiée afin de préserver l'invisibilité du tatouage, surtout dans les parties homogènes de

l'image. d) Pour vérifier la présence du tatouage, on extrait de la transformée de Fourier de l'image tatouée le signal caché, localisé autour de la fréquence et de la direction données par la clef secrète. On prend la transformée de Fourier inverse et l'on réobtient la grille de départ, ou plutôt une version altérée de celle-ci. Malgré la modification des pixels de cette dernière, on peut estimer grâce à une mesure de corrélation, si elle a bien été obtenue à partir d'une M-séquence, et donc si l'image a bien été tatouée avec la clef en question.

en 1996 un algorithme de tatouage incrustant un filigrane robuste. Utilisant une modélisation du système de vision humaine, les chercheurs déterminent l'invisibilité du filigrane et analysent à l'aide de filtres perceptifs, à quels endroits le filigrane peut être plus important (en général dans les zones de fortes variations de luminance). On obtient ainsi un tatouage qui résiste très bien à la suppression de quelques lignes sur le bord de l'image, à la compression JPEG, à l'addition de bruit blanc, à l'application d'un filtre passe-bas, ainsi qu'à une impression/renumérisation par scanner. Mais les changements d'échelle, symétries, rotations, découpages peuvent toutefois détruire le tatouage.

En 1997, J. J. K. O'Ruanidh et T. Pun, de l'Université de Genève, ont proposé une technique combinant l'étalement de spectre avec des considérations d'invariance par rotations, changements d'échelle et translations. Leur tatouage résiste ainsi à ces manipulations, à la compression JPEG ainsi qu'à l'extraction d'une grosse portion de l'image. Citons

aussi d'autres familles d'algorithmes de tatouage qui reposent sur des schémas de compression utilisant diverses techniques comme la transformation par ondelettes ou les techniques fractales. Les filigranes ainsi produits n'offrent pas de résistance particulière, excepté face aux techniques de compressions sur lesquelles ils reposent.

On sait donc camoufler des filigranes invisibles et assez robustes dans les images fixes. Néanmoins de nombreux problèmes restent posés : des découpages en petits morceaux de l'image, l'ex-

traction d'un détail de l'image (qui peut donner lieu à un montage), la suppression de lignes ou de colonnes au «milieu» de l'image détruisent les filigranes actuels. Dans l'ensemble les résultats restent expérimentaux et l'on ne dispose pour l'instant que d'un embryon de formalisation théorique du tatouage : quelle quantité d'information peut-on réellement cacher dans une image, pour un algorithme de tatouage donné ? Comment atteindre cette limite ? Les tatoueurs cherchent maintenant à chausser les bottes de géant du mathématicien Shannon.

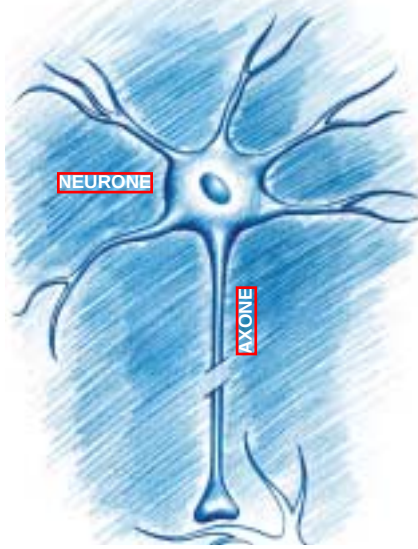
Caroline FONTAINE est maître de conférences à l'Université de Lille 1. Son site web est : <http://www.lifl.fr/~fontaine/>

<http://www.rocq.inria.fr/codes/Watermarking/> (en français : définitions et présentation du tatouage).

<http://www.ima.enst.fr/~maitre/enst-ens.html> (en français : liste de pointeurs sur le tatouage).

<http://www.cl.cam.ac.uk/~fapp2/steganography/> (en anglais : ce site, traitant de la stéganographie et du tatouage, est très complet).

Identification and Protection of Multimedia Information, in *Proceedings of the IEEE*, numéro spécial, vol. 87, n° 7, juillet 1999. (en langue anglaise : un bon bilan de la recherche actuelle sur le thème du tatouage : textes, images, son).



La propagation de l'influx nerveux

ROLAND LEHOUCQ

Les vertébrés ont surtout des fibres nerveuses couvertes de myéline où la propagation de l'influx nerveux est plus rapide que sans cette substance.

Souvent, on assimile le système nerveux à un vaste réseau de fils électriques qui permettrait aux signaux électriques de se propager entre le cerveau et les organes. La réalité est bien différente. Alors que l'électricité se propage dans un fil de cuivre à une vitesse proche de celle de la lumière (300 000 kilomètres par seconde), l'impulsion nerveuse est transportée par une fibre à une vitesse au plus égale à 100 mètres par seconde. Par ailleurs, la résistance au passage du courant électrique d'une fibre nerveuse est 100 millions de fois supérieure à celle d'un fil de cuivre, et elle est bien mal isolée de son environnement : la membrane qui la renferme est un million de fois plus perméable au courant électrique que la gaine d'un bon câble électrique.

Comment l'influx nerveux se propage-t-il alors que la fibre nerveuse est un si piètre conducteur électrique ?

La propagation de l'influx nerveux le long d'une fibre nerveuse, ou axone, est entièrement déterminée par sa structure. Les axones les plus simples sont formés d'un liquide, l'axoplasme, entouré d'une membrane cylindrique épaisse d'environ sept nanomètres et constituée d'une double couche de lipides (voir la figure 1). L'axoplasme et le liquide cellulaire qui baigne l'axone contiennent un grand nombre d'espèces chimiques chargées, notamment des ions chlorure (Cl^-), calcium (Ca^{2+}) et sodium (Na^+).

D'une part, ces charges ont des signaux

différents et, d'autre part, leur concentration de chaque côté de la membrane diffère, de sorte que lorsqu'on mesure la différence de potentiel entre l'axoplasme et le liquide extérieur, on trouve une valeur comprise entre -40 et -100 millivolts, selon les espèces animales. La membrane est donc soumise à un champ électrique intense d'environ 10^7 volts par mètre (le quotient de la différence de potentiel et de l'épaisseur de la membrane).

Le signe de la différence de potentiel entre les deux côtés de la membrane traduit le fait qu'il y a un excès de charges négatives sur la paroi interne de la membrane. Comment en estimer la densité ? En assimilant une tranche de membrane à un condensateur : chaque côté de la membrane représente une plaque du condensateur et la membrane figure l'isolant entre les plaques.

Cependant, l'isolant du «condensateur membranaire» n'est pas parfait. Tout se passe comme si une résistance, montée en parallèle du condensateur, le vidait en une milliseconde environ. Autrement dit, si l'on assimile la membrane à un condensateur chargé, la différence de potentiel ne resterait pas constante : des charges doivent se déplacer pour conserver la différence de potentiel mesurée au repos.

Par ailleurs, l'axoplasme est lui aussi conducteur électrique, mais un mauvais conducteur. Au-delà d'une longueur d'environ un millimètre, la résistance mem-

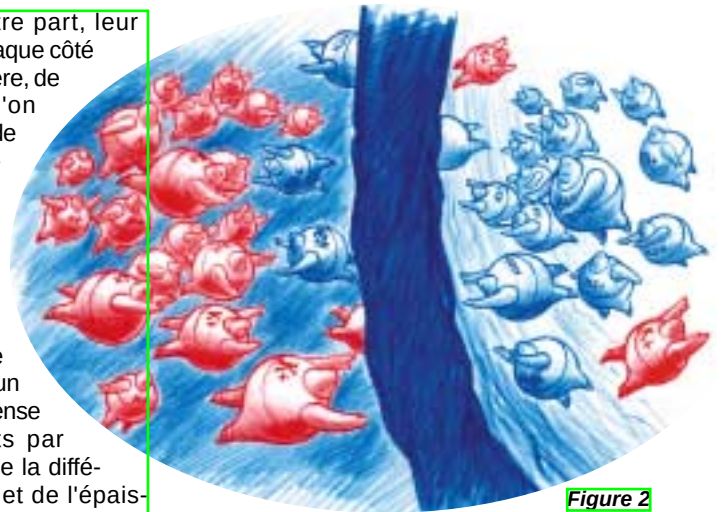


Figure 2

branaire perpendiculaire à la fibre est inférieure à la résistance de l'axoplasme : le courant s'écoule donc plus facilement dans la membrane et l'axoplasme se vide de son courant (la résistance membranaire le long de la fibre est très élevée, de sorte que le courant ne peut se propager le long de la membrane). Ainsi, il est impossible de transmettre un signal électrique par simple conduction dans l'axoplasme sur des distances supérieures à un millimètre. Là encore, c'est le transfert de charge au travers de la membrane qui va venir au secours de la piètre conduction de l'axoplasme.

TRANSFERT SALUTAIRE

Les fluides baignant la membrane transportent des ions. Dans une fibre au repos, les différences de concentration en ions sont très importantes entre l'extérieur et l'intérieur : dans l'axoplasme, les ions sodium Na^+ et chlorure Cl^- sont déficitaires, alors que les ions potassium K^+ sont en surnombre. Ces différences engendrent un flux ionique à travers la membrane, qui tendra à équilibrer les concentrations. Le flux d'ions est donc dirigé vers l'extérieur pour K^+ et vers l'intérieur pour Na^+ et Cl^- .

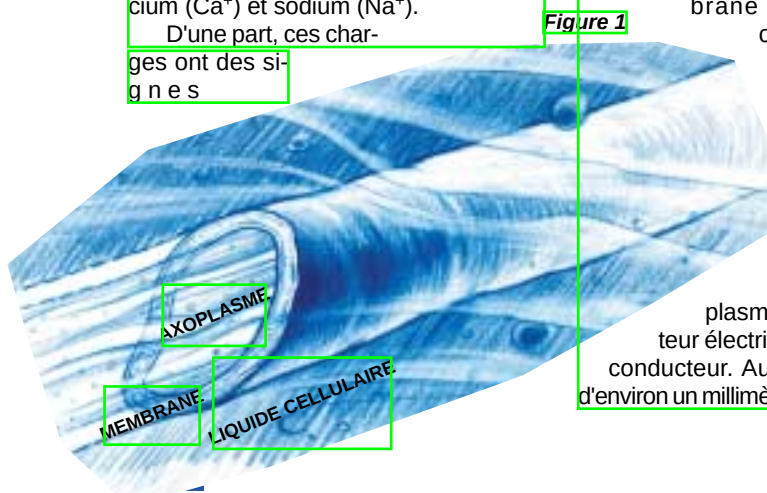


Figure 1

D'autre part, la différence de potentiel transmembranaire engendre une force électrique qui fait également migrer les ions à travers la membrane dans un sens qui dépend à la fois du champ électrique membranaire et de la charge de l'ion. Ce flux est dirigé vers l'intérieur pour les ions Na^+ et K^+ et vers l'extérieur pour les ions Cl^- .

Au total, les flux dus aux effets physiques sont la somme des flux dus à la différence de concentration et de ceux qui sont dus au champ électrique. Ces flux s'équilibrent pour les ions Cl^- et le flux global de cet ion est quasiment nul. Pour les ions K^+ , le flux global est très faible et dirigé vers l'extérieur (ces ions sont hors équilibre), alors que le flux d'ions Na^+ est grand et dirigé vers l'intérieur de l'axone. Ainsi, en prenant uniquement en compte les effets physiques, l'axone se viderait de K^+ et se remplirait de Na^+ (voir la figure 2). Quel mécanisme contrebalance ces flux, incompatibles avec les concentrations constantes au repos et avec une différence de potentiel transmembranaire constante ? La «pompe Na-K». Ce mécanisme biologique agit à l'inverse de l'effet physique : il transporte les ions Na^+ vers l'extérieur de l'axone et les ions K^+ vers l'intérieur.

Ce pompage est assuré par une protéine membranaire, et son énergie résulte de l'hydrolyse de l'adénosine triphosphate. Si la membrane était également perméable aux ions Na^+ et aux ions K^+ , il ne serait pas possible d'obtenir un état permanent pour lequel les ions K^+ sont assez peu hors équilibre et les ions Na^+ très loin de l'équilibre. En pratique, la membrane est environ 25 fois plus perméable aux ions K^+ qu'aux ions Na^+ . Il est donc possible de pomper efficacement les ions Na^+ hors de l'axoplasme, leur retour étant inhibé par la mauvaise perméabilité de la membrane à ces ions. Au final, dans la fibre nerveuse au repos, les mécanismes biologiques et physiques agissent conjointement pour assurer les concentrations d'équilibre. Que se passe-t-il lorsque l'on excite cette fibre par un courant électrique ?

L'EXCITATION

L'axone ne réagit à une excitation électrique que si celle-ci est supérieure à 20 millivolts. À partir de ce seuil, il se produit une impulsion de tension dans la membrane, nommée potentiel d'action, qui dure environ une milliseconde et durant laquelle le potentiel transmembranaire passe de sa valeur de repos de -70 millivolts (chez l'homme) à +40 millivolts, avec un retour rapide à la situation antérieure. Ce potentiel d'action se propage

le long de la membrane. La forme et la vitesse du potentiel d'action sont indépendantes de l'amplitude de la tension excitatrice, pourvu qu'elle dépasse le seuil de 20 millivolts.

Lorsque la membrane est soumise au potentiel d'action, sa perméabilité aux ions Na^+ augmente brusquement : cet ion entre dans l'axone, ce qui engendre une charge positive à l'intérieur. Ensuite, les «portes» du sodium se ferment et la membrane devient très perméable au potassium (K^+), qui sort de l'axone : l'intérieur de l'axone redevient négatif et la différence de potentiel transmembranaire retrouve sa valeur au repos.

Ainsi, en même temps que le potentiel d'action se propage le long de la membrane, un signal électrique se propage à l'intérieur de l'axoplasme qui ne correspond pas à un déplacement de charges, mais au déplacement d'un surcroît de densité de charges positives. Ce signal ressemble à une onde mécanique qui se déplace le long d'une corde : au bout de la corde, on reçoit un signal, même si les atomes de la corde ne se sont pas déplacés à l'intérieur de celle-ci. La vitesse de propagation de ce signal est proportionnelle à la racine carrée de son diamètre. Par exemple, le long d'une petite fibre de cinq micromètres de diamètre, elle est voisine de quatre mètres par seconde et elle est dix fois supérieure pour une fibre de 0,5 millimètre de diamètre. De tels axones existent chez les invertébrés, mais ne constituent pas la solution idéale au problème de la propagation rapide.

ISOLER LA MEMBRANE

Chez les vertébrés, la membrane de la plupart des axones est entourée d'une gaine de myéline, une sorte de graisse, interrompue environ tous les millimètres en des points nommés nœuds de Ranvier. Cette épaisse couche de myéline rend impossible la propagation de proche en proche par variation de la perméabilité de la membrane, comme dans le cas sans myéline, car les espèces chargées ne peuvent traverser cette graisse. En revanche, la myéline est un bon isolant, qui multiplie par 300 la résistance membranaire. Autrement

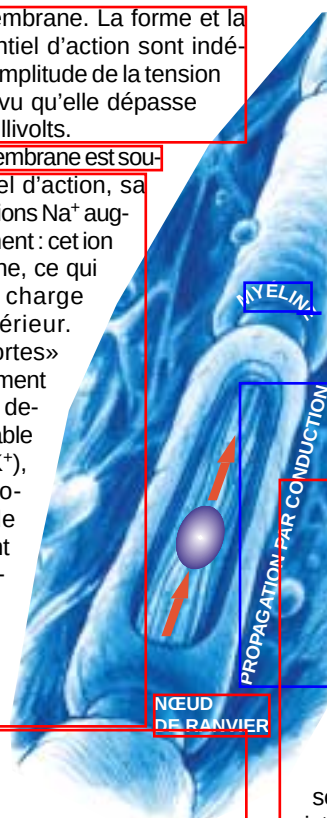


Figure 3

dit, le câble conducteur est bien meilleur que sans myéline et la conduction dans l'axoplasme peut se faire sur une dizaine de millimètres. Sur cette longueur, le signal électrique se propage comme dans un câble électrique, quasiment à la vitesse de la lumière. De surcroît, le signal n'est que faiblement atténué le long d'un segment myélinisé.

Cette atténuation est compensée au nœud de Ranvier : le signal qui arrive à un nœud, où la membrane est libre, possède une différence de potentiel supérieure au seuil de 20 millivolts, de sorte qu'un nouveau potentiel d'action démarre. À chaque nœud de Ranvier, une nouvelle excitation électrique régénère le signal. Le signal se propage maintenant sur un mode mixte : conduction classique avec déplacement de charges dans les segments de fibre recouverts de myéline et propagation d'un potentiel d'action aux nœuds de Ranvier. La vitesse de propagation est désormais proportionnelle au diamètre de la fibre, ce qui permet d'atteindre des vitesses de propagation de plusieurs dizaines de mètres par seconde pour un encombrement réduit.

L'efficacité des axones myélinisés s'illustre par une expérience simple : en contact avec un objet chaud, la main se retire vivement en raison d'une violente sensation de douleur et non à cause d'une sensation de forte chaleur. La raison en est que les cellules thermoréceptrices de la peau sont connectées à la moelle épinière par l'intermédiaire de fibres nerveuses sans myéline, alors que les cellules sensibles à la douleur le sont par des fibres myélinisées. Dans les premières, la vitesse de propagation est de quelques mètres par seconde, 50 fois moindre que dans les secondes. C'est pourquoi on a mal avant d'avoir chaud !

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

P.F. BAKER, *The Nerve Axon*, in *Scientific American*, p. 74, mars 1966.

R.K. HOBBI, *Nerve Conduction in Pre-medical Physics Course*, in *American Journal of Physics*, vol. 41, p. 1176, 1973.

A.C. SCOTT, *The Electrophysics of a Nerve Fiber*, in *Reviews of Modern Physics*, vol. 47, p. 487, avril 1975.

Zoologie

Dictionnaire du règne animal

Sous la direction de Simon Tillier.
Éditions Larousse, 1999
(509 pages, 130 francs).

L'encyclopédie de la nature

Doris Kinderley. Éditions Milan, 1999
(304 pages, 198 francs).

Nombreux sont les ouvrages que l'on trouve en librairie ou en grandes surfaces, dont les titres annoncent qu'ils familiariseront leurs lecteurs avec la diversité de la nature et le vocabulaire qui la décrit. En voici deux récemment parus : l'un est un dictionnaire, un peu austère d'aspect, l'autre est une encyclopédie, thématique, illustrée de belle façon. L'un fut confectionné sous l'autorité de scientifiques du Muséum d'histoire naturelle de Paris, l'autre par son pendant d'outre-Manche, le Natural History Museum, anciennement British Museum. Ils ont des buts différents et trouveront sans doute chacun des clients.

Tout scientifique qui consulte un dictionnaire «ordinaire» a assez régulièrement les bras qui lui tombent, et ce n'est pas le poids de l'ouvrage qui est en cause : l'indigence des définitions qui sont proposées pour les mots de la nature et les erreurs grossières sont à chaque tour de page. Pis encore, le vocabulaire qui figure est en général assez pauvre. Il est vrai que, depuis deux siècles, les scientifiques ont proposé de nombreux néologismes pour décrire la diversité du monde animal et tenter de le classer ; de surcroît, au fur et à mesure que s'approfondissaient les recherches, bien des définitions ont été modifiées. C'est là l'une des difficultés majeures que l'on rencontre lorsque l'on veut rédiger un dictionnaire de la nature : des concepts à première vue aussi simples que mammifères ou oiseaux sont compris bien différemment de l'acception qu'ils avaient voici seulement quelques années. Il ne serait donc pas superflu que paraissent régulièrement des mises à jour d'un *Grand dictionnaire de la nature*. Contentons-nous pour l'heure de ce petit Larousse.

J'ai remarqué que la plupart des textes que propose cet abécédaire de la nature sont issus du remaniement d'un précédent ouvrage paru chez un autre éditeur (*Encyclopédie du règne animal*, Bordas, 1992), mais avec un découpage

différent et quelques amendements, mais, surtout, sans aucune des illustrations contenues dans la précédente édition. Les changements concernent en particulier les nombreux articles qui détaillent ces mammifères dont nous sommes. Cette mise à jour n'est pas toujours bien venue. Ainsi apprend-on que la famille des Gliridés (loirs et lérôts) a été rayée des cadres au bénéfice de celle des Myoxidés : faux, car la rigoureuse et sévère Commission de nomenclature zoologique a rendu voici deux ans son verdict, et officialisé les Gliridés. Pour expliciter les principaux concepts classificatoires on trouve des arborescences à la mode cladiste, mais il n'est fait nulle part allusion à la philosophie de cette démarche, ni à son champ d'application. Ainsi le lecteur n'a-t-il aucune chance de décoder ces arborescences et de réellement pouvoir les lire. À propos des mammifères en particulier, il ne saura pas que le cladogramme présenté à la page 279 est né, pour l'essentiel, de l'étude de quelque 4 000 genres fossiles, dont les plus anciens ont 200 millions d'années d'âge. Ici on ne nous présente qu'une classification tronquée, puisque ne sont pris en compte que les mammifères actuels (un millier de genres). De surcroît, on ne retrouve pas d'allusion, dans les définitions des ordres de mammifères qui sont données dans l'abécédaire, aux relations de parenté qui justifient le cladogramme général : au paragraphe «Lagomorphes» il n'est pas dit que cet ordre est le groupe frère des rongeurs, comme montré page 279, alors que le raccourci qui traduit les ressemblances des deux ordres est singulièrement réducteur, puisqu'il ne fait allusion qu'au nombre différent d'incisives que portent les uns et les autres.

En conclusion, et alors que l'utilité et la nécessité d'un tel glossaire sont évidentes, on peut regretter que, pour le confectionner, on ait choisi un court chemin. Regrettons aussi qu'il ne soit complété d'aucune bibliographie, même sommaire.

Passons maintenant à l'*Encyclopédie de la nature*. Son introduction commence par une présentation de la biosphère, de l'origine de la vie et de l'évolution : dès la page 14, le lecteur consultera avec profit l'ouvrage précédent pour apprendre qui sont les géospizes (faussement nommés pinsons de Darwin, sic) ! Biologie, écologie, classification, végétaux et animaux sont les cinq grandes rubriques qui organisent le livre. Dans chacune, une double page est l'occasion de présenter en quelques phrases et, surtout, par des illustrations, un milieu, un groupe animal ou végétal, une fonction. Des renvois en bas de page, un glos-

saire et un index facilitent la consultation. Il n'est pas certain que l'âge minimum requis pour le consulter soit huit ans, comme le prétend le dos de couverture, mais peut-être les cobayes qui me furent confiés pour expérimenter la question n'étaient-ils pas dans la moyenne.

Ouvrage traduit, il en a les défauts. C'est ainsi que, page 140, il est expliqué longuement que beaucoup utilisent le terme «animal» pour désigner les seuls mammifères, mais que, de fait, ce mot a une acception beaucoup plus large, puisqu'il désigne aussi bien les éponges que les vertébrés. Cette remarque est parfaitement fondée s'il s'agit du mot anglais *animals*, mais de notre côté de la Manche, «animaux» désigne bien tous les êtres vivants qui bougent. Dans l'ensemble, l'ouvrage n'est pas pédant, et il évite les termes diaphoires (aux géospizes près, bien sûr). Il n'hésite pas à utiliser des mots communs tels reptiles, ou poissons, honnis, comme on le sait, des scientifiques huppés.

La lecture de certains entrefilets désarçonne parfois, par exemple lorsqu'on apprend, photographie à l'appui que «les crottes d'éléphant renferment des déchets issus de la digestion des aliments». Ou que l'on présente comme une «extinction naturelle» la mort de ces deux millions d'oiseaux, poissons et mammifères tués par l'éruption du mont Saint Helens. Ces raccourcis ravageurs sont aussi, en quelque sorte, la rançon d'un propos compacté à l'extrême : chaque double page illustre un sujet présenté en dix lignes, illustré par une bonne douzaine de photographies, cartes ou diagrammes légendés d'une ligne, et commenté de quelques paragraphes de trois à quatre phrases. Pour revenir à l'exemple cité précédemment, le contenu de l'encadré «Extinction naturelle», fait partie d'un chapitre «L'homme et la nature». Une courbe de croissance démographique, extrapolée à l'horizon 2050, propose que les populations humaines friseront alors les dix milliards d'individus. Un texte rappelle que la vie sur Terre existe depuis 3,5 milliards d'années, que de «nombreux êtres vivants se sont éteints, suite à des phénomènes naturels, comme des éruptions volcaniques et des pluies de météorites» (il semble que, pour les auteurs, les causes d'extinction ne sont pas multiples, et, surtout, ils n'évoquent pas la principale : la compétition entre espèces). Dans les lignes qui suivent, l'éruption du mont Saint Helens est évoquée à titre d'exemple, précisant qu'elle tua deux millions d'oiseaux de reptiles et de mammifères. Et les mouches ? Et les papillons, pourrait-on demander, alors qu'en regard de ce texte on trouve une photographie

des pentes désolées du Kilauea (îles Hawaïi), ce qui est bien normal puisque les pentes du Saint Helens sont maintenant reboisées... par les mêmes essences qu'avant la catastrophe! Plus bas seront évoqués le réchauffement planétaire et son inmanquable trou d'ozone, les pluies acides, la pollution des eaux, la chasse commerciale et les méfaits du tourisme «nature» sur les vies et mœurs des visités. Pour compléter ses connaissances, le lecteur est invité à consulter quatre autres doubles pages (animaux en danger, cycles écologiques, écologie, milieux en danger). La nature serait-elle à la fois menace et menacée? La rubrique «Écologie» est de ce point de vue éclairante : après une introduction d'écologie générale (les cycles écologiques et les chaînes alimentaires), ce sont douze milieux (de l'océan aux régions polaires) qui sont présentés ; la domestication, l'homme et la nature viennent ensuite, suivis des doubles pages «fléaux naturels», puis celles des animaux et végétaux et des milieux en danger, pour s'interroger enfin sur les moyens qu'il faut se donner pour protéger la nature. C'est là le premier tiers de l'ouvrage. Pour le reste, il propose, avec le cadre de la systématique comme guide, de broser le tableau de la diversité animale et végétale de la biosphère. C'est sans doute cette partie que les jeunes publics consulteront avec le plus de profit, encore que l'aide de tuteurs pour sa consultation serait bien venue. La richesse iconographique qui illustre chacun des grands rameaux de la classification des plantes et animaux fait la réussite du livre. Ce qui ne veut pas dire que je choisis entre le choc des images et le poids des mots!

La réalisation d'ouvrages du type dictionnaire ou encyclopédie n'est pas un travail aisé, car le vocabulaire savant et les concepts qu'il véhicule sont difficiles à exposer, surtout si l'on est soumis à une contrainte éditoriale commune de nos jours : il faut être bref, pour des raisons de coût, mais aussi pour éviter de lasser le lecteur, du moins est-ce l'argument le plus souvent avancé par les spécialistes de la communication. La recherche de la concision, qui n'est pas la brièveté, demande du temps. La solution serait de réunir en conclave des spécialistes de différents horizons pour participer à une entreprise éditoriale de ce type. À moins que, le marché aidant, on cherche à améliorer, d'édition en édition, ces produits de consommation dont le public est somme toute friand. Dans ce cas aussi, les consommateurs pourraient aider à faire progresser la qualité de cette nourriture intellectuelle.

Jean-Louis HARTENBERGER

Entomologie

Les insectes en 1 000 photos

Patrick Glémas. Éditions Solar, 1999 (128 pages).

Les insectes et les hommes

Michel Lamy. Éditions Albin Michel, 1999 (416 pages).

Plus de 80 pour cent de l'ensemble des espèces animales sont des insectes. Comment les entomologistes ne multiplieraient-ils pas les ouvrages qui leur sont consacrés? Patrick Glémas et Michel Lamy n'ont pas résisté à l'appel ; leurs objectifs sont différents.

Le premier veut charmer en présentant, par des images, les insectes que l'on rencontre dans les milieux les plus variés, mais aussi les plus familiers (forêts, campagne, jardins aquatiques, maisons, collines et montagnes). Ils se développent par une série de métamorphoses dont on montre quelques exemples, comme la naissance d'un papillon. Leur régime alimentaire est varié : omnivore, phytophage (suceurs de sève et de nectar, dévoreurs de bois...), hématophage (suceurs de sang), entomophage (mangeurs d'autres insectes), recycleurs, etc. Pour survivre, ils utilisent le camouflage, mais aussi des armes étonnantes. Leurs mœurs et leurs formes sont d'une extrême diversité. Les relations avec les hommes sont parfois profitables, parfois conflictuelles. Bien que n'étant pas des insectes, les scorpions et les araignées terminent la galerie.

Cet album d'images commentées voudrait familiariser le grand public avec les insectes, mais la vulgarisation ne doit pas amener à des abus de langage excessifs ou à insister sur des aspects étranges sans les expliquer : les papillons *Charaxes* sont présentés comme carnivores, parce que les adultes se rencontrent sur des cadavres dont ils aspirent, avec leur longue trompe, des humeurs suintantes, alors que des papillons qui sont de véritables suceurs de sang (*Calpe...*) sont ignorés ; ailleurs, on montre une mouche domestique sous un aspect inhabituel sans préciser son invasion par un champignon entomophyte.

Le second livre a un titre qui a des accents de déjà-vu. Michel Lamy présente un livre qui, en quelques centaines de pages, brosse un tableau des rapports du monde des insectes avec l'espèce humaine.

Il y a 350 millions d'années, les premiers insectes apparaissent à la surface du Globe : ce sont de petits animaux à six pattes, sans ailes. Au cours de leur longue évolution, ces ancêtres se diversifient et s'adaptent à tous les milieux. Ils conquièrent d'abord l'espace aérien : ils sont les premiers êtres volants avec des ailes, bien avant les oiseaux, puisqu'ils s'élèvent dans les airs au Carbonifère (il y a environ 300 millions d'années). Puis les organes du vol se perfectionnent, deviennent plus efficaces.

Afin de mieux triompher de l'instabilité des climats et de mieux prendre possession des innombrables biotopes qui s'offrent à eux, ils développent un système de croissance par métamorphoses qui, au début, chez les insectes primitifs, passe insensiblement de l'état larvaire à l'état adulte. Cette transformation aboutit, chez les formes plus évoluées, à des métamorphoses complètes, avec le cas des papillons. De l'œuf éclôt une chenille



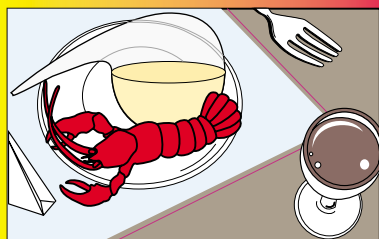
Les métamorphoses des papillons (ici un Paon de jour) leur permettent de mieux s'adapter aux variations climatiques.

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours
sur **France Info**
à 15 heures 41,
17 heures 10,
20 heures 12,
22 heures 12,
et 23 heures 42



Les prochains
résultats présentés
dans la rubrique
Science et Gastronomie
seront annoncés sur
France Info
le 25 avril 2000.



qui, après s'être alimenté, se transforme en chrysalide immobile où l'adulte s'élabore. Après quelques jours, celui-ci sort, et c'est le papillon qui se reproduira.

Il y a seulement deux millions d'années, lorsque l'homme s'individualise, il est confronté à ce monde bien établi des insectes. Dès les premiers temps, il les remarque : dans les grottes, à côté des grands animaux, il grave une sautelle cavernicole ou peint la collecte de miel des abeilles sauvages. Les civilisations anciennes n'ignorent pas non plus les insectes, leur donnant même valeur de symbole (le scarabée des Égyptiens), quand elles ne les redoutent pas (les criquets de la huitième plaie d'Égypte). C'est alors que l'on se penche sur ces êtres et qu'en Grèce Aristote, dans son *Histoire des animaux*, les regroupe sous le nom d'*entoma*. Depuis, l'entomologie a pris son essor, chaque siècle apportant son lot de connaissances : ce sont les avancées d'Aldrovandi, de Rédi, Swammerdam, Linné, Réaumur, Latreille, Fabre... Toute cette pléiade de naturalistes fait progressivement connaître l'extraordinaire organisation morphologique et physiologique des insectes, la prodigieuse diversité de leurs mœurs, les particularités de leurs nuisances, tant contre les cultures que contre notre espèce, et leur rôle irremplaçable comme éboueurs, pollinisateurs, auxiliaires...

La lutte contre la minorité d'insectes qui nous lèsent est difficile, malgré les nombreuses méthodes mises en œuvre (chimiques, biologiques, etc.). En effet, grâce à leur grande plasticité, les insectes trouvent souvent des parades (résistances, mutations...). C'est cependant l'activité humaine, liée à l'agriculture, à l'industrialisation, à l'urbanisation, qui est responsable de la limitation et, parfois même, de la disparition de populations entomologiques. Dans cette perspective, il faudrait éviter de commettre l'erreur stratégique de déclarer, pour détruire quelques espèces nuisibles, une guerre totale aux insectes, dont le rôle est indispensable dans les écosystèmes qui nous entourent.

Pour survivre, l'insecte a pu, pendant des millions d'années, s'adapter au milieu en se modifiant. À l'inverse, l'homme a tenté d'échapper aux contraintes extérieures en se protégeant : vêtements, domestication du feu, outils, agriculture, élevage, transports, télécommunications... sont quelques-unes des facettes de cette faculté d'invention inhérente à la nature humaine. Deux solutions (l'une organique, l'autre technique) à la survie et à la maîtrise du monde.

En réalité, l'avenir de notre planète impose une cohabitation essentielle entre l'homme et les insectes.

Jacques d'AGUILAR

Mathématiques

Supermath

Pierre Bornsztein. Éditions Vuibert, 1999 (340 pages, 159 francs).

Les Olympiades de mathématiques réunissent des équipes de lycéens, à qui sont soumis des problèmes qui s'apparentent à ceux du Concours général. Ou, plutôt, le Concours général propose aujourd'hui des problèmes qui se rapprochent de ceux des Olympiades de mathématiques. En tout cas, les participants sont les mêmes : ce sont tous les jeunes qui s'amuse à résoudre des problèmes mathématiques «neufs», c'est-à-dire où tout est à construire, y compris, parfois, les outils qui serviront à la résolution. Évidemment, les amateurs de problèmes mathématiques, une fois passé l'âge de participer à ces épreuves, conservent souvent le goût de la recherche mathématique.

Les problèmes des Olympiades de mathématiques ont été publiés plusieurs fois, mais ce sont des sources sans cesse renouvelées de réflexion. Et l'originalité des corrigés qui sont donnés avec les énoncés (pour le commun des mortels, ces corrigés sont indispensables : les problèmes proposés sont difficiles, d'où le titre de «supermath») contribue beaucoup à la qualité d'un ouvrage sur les problèmes d'Olympiades.

Ici, Pierre Bornsztein présente 250 problèmes : il a corrigé des erreurs commises lors de la rédaction des énoncés et propose des problèmes dans la même veine. Il prétend que la résolution des problèmes est ludique : les non-mathématiciens le suivront difficilement ; pourtant il est exact que l'éclair de la compréhension mathématique, comme le disait Martin Gardner (célèbre auteur de jeux mathématiques plus simples que les problèmes proposés ici), procure un plaisir original, renouvelé à chaque problème résolu. Et, pour ceux qui auront «séché», la compréhension de la solution offre l'occasion d'admirer la puissance du raisonnement, en même temps que l'originalité de la solution proposée.

Les problèmes de *Supermath* font particulièrement ressentir ces deux plaisirs, notamment parce que les énoncés sont très épurés, avec très peu de repères, d'indications de résolution : l'explorateur doit ouvrir son chemin. Souvent il découvre, derrière une question qui semblait anodine, une vaste théorie ; l'auteur de ce livre donne des indications pour poursuivre les explorations.

Revenons sur la difficulté annoncée des problèmes proposés. P. Bornsstein indique dans son avant-propos que chacun de ces problèmes possède une solution élémentaire et élégante : «Il suffit souvent de maîtriser les relations géométriques dans le triangle et l'arithmétique élémentaire (en particulier, le langage des congruences) et de savoir manier les inégalités classiques (IAG, Cauchy-Schwartz). Le reste est affaire d'astuce... ou presque.» Ce «ou presque» s'imposait, car, on le verra, certaines solutions présentées utilisent des mathématiques complexes.

Un exemple de problème ? «Dans un plan, on donne 127 roues dentées numérotées 1, 2, ..., 127. La roue 1 est accouplée à la roue 2, la roue 2 à la roue 3, ..., la roue 127 à la roue 1. Un tel système peut-il tourner ?» Ou bien, en analyse : «Une fonction f définie sur R et à valeurs réelles vérifie, pour tout x et tout rationnel r , l'inégalité : $|f(x) - f(r)| \leq 7(x-r)^2$. Déterminer toutes les fonctions f possibles.»

Pour les solutions, rendez-vous dans **Supermath**.

Albert MECCHI

Biologie

Clin d'œil à la vie. La grande aventure HLA

Jean Dausset. Éditions Odile Jacob, 1998 (310 pages, 150 francs).

Le livre de Jean Dausset raconte une histoire récente : ce *Clin d'œil à la vie* est une autobiographie qui présente l'itinéraire remarquable d'un médecin qui voulait améliorer les techniques de transfusion sanguine, pendant la Seconde Guerre mondiale. Ses études l'ont conduit sur la piste du système HLA, découverte majeure de notre siècle qui a valu le prix Nobel de médecine et physiologie (1980) à son auteur. Le système HLA (*Human Leucocytes Antigens*, soit «antigènes leucocytaires humains») est composé des antigènes du soi, c'est-à-dire des molécules qui agissent comme de petites antennes chimiques, à la surface des cellules humaines. Ces molécules sont la marque de la spécificité individuelle et jouent un rôle clé dans la défense immunitaire, fondée sur la reconnaissance du soi et du non-soi. La bonne connaissance du système HLA détermine le succès des greffes. Et l'histoire de cette découverte n'est pas banale.

Elle résulte, selon J. Dausset, d'une intense collaboration internationale, afin

de perfectionner la transplantation d'organes, alors débutante. L'auteur associe d'ailleurs à cet exploit scientifique et technique ses professeurs, collègues, élèves et collaborateurs, ainsi que de nombreuses personnes volontaires pour participer aux expériences médicales. L'histoire de la découverte fut, comme souvent dans l'histoire des sciences, jalonnée de fausses pistes et de révolutions conceptuelles, les chercheurs progressant par essais et élimination des erreurs dans l'interprétation des observations.

L'importance de la découverte fut à la hauteur du problème considéré. La prise en compte de la complexité des phénomènes immunitaires a eu de nombreuses retombées, non seulement en génétique, et donc en médecine humaine, mais aussi en biologie en général, puisque J. Dausset utilisa ses travaux pour compléter la théorie synthétique de l'évolution.

J. Dausset n'est pas seulement l'un des grands biologistes contemporains. En 1945, il fonde une galerie d'art d'avant-garde, qui est alors un haut lieu du surréalisme parisien. Simultanément, il est ministre de l'Éducation nationale dans le gouvernement de Pierre Mendès-France et contribue à la réforme de la médecine qui a conduit à la création des Centres hospitaliers universitaires (CHU). Fondateur de *France-Transplant*, il dirige ensuite, pendant 20 ans, cet organisme qui procure aux malades les organes disponibles. Participant depuis toujours aux débats sur la bioéthique, il développe la médecine prédictive et milite activement pour la détection des prédispositions génétiques des maladies héréditaires.

J. Dausset a une haute idée de la responsabilité scientifique : «Il ne faut pas cependant nous cacher qu'il y a des situations ambiguës lorsqu'il y a conflit d'intérêt entre celui de l'individu et celui de la collectivité. Dans ce type de situation, deux critères peuvent aider à trancher : l'intérêt de l'enfant venant avant celui des progéniteurs et l'intérêt des générations futures venant avant celui des générations présentes.»

Le livre de J. Dausset témoigne d'un profond humanisme. Ses nombreux clin d'œil à la vie nous indiquent comment les connaissances issues de la biologie doivent inciter chacun d'entre nous à lutter pour la liberté et le droit à la différence. Car lorsqu'ils s'étudient eux-mêmes, de façon lucide et rationnelle, les hommes apprennent les avantages de la solidarité face à la maladie et à la mort : «Ensemble, ils peuvent ne plus subir leur sort et assumer pleinement leur vie, l'orienter vers un avenir réfléchi, avant de la quitter en lui faisant un sympathique clin d'œil.»

Cédric GRIMOULT

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), Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulennec (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gudsorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Leïla Bellon, Paul Decaix, M. Dégardin, Christian Frégnier, Sylvie Labbé, Bernard Labedau, Marie-Thérèse Landousy, Valérie Martin-Rolland, Claude Olivier, Christophe Pichon, Claude Puech.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhushree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer : Joachim Rossler. Vice-President : Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Jean-François Guilloin,
jf.guilloin@pourlascience.fr
8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Anne-Claire Ternois : 01 55 42 84 04

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Christophe Vitiello : 01 55 42 84 81.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-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 de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

Histoire des sciences

Herborisations en zigzag. Journal d'un botaniste : Charles Flahault

Présenté par Jean-Marie Emberger. Les Presses du Languedoc, 1999 (222 pages, 130 francs).

Le ^{xx}e siècle achevé, beaucoup de scientifiques décident d'ignorer les disciplines de terrain. On observe la végétation par satellites interposés, et l'on regarde pousser les plantes sur les ordinateurs : c'est la modélisation. Les systématiciens n'osent plus s'appeler zoologistes ou botanistes. Leur caste résiduelle (presque celle des intouchables du sous-continent indien) est essentiellement cantonnée dans la «réserve» du Muséum national d'histoire naturelle, où elle tente de survivre et de détourner l'attention des esprits malintentionnés (qui la pensent disparue) en parlant de biodiversité et de la nécessité de recenser les espèces menacées.

Qui ose encore avouer qu'un insecte livre ses secrets au cours d'une dissection habile, avant l'exploration de son ADN ? Qui, voulant préparer des planches d'herbier, ose encore parcourir des vallons obscurs où une plante rare continue à pousser discrètement ?

Dans ces difficiles conditions, où la disparition des dinosaures attriste plus que la survie des botanistes de terrain, le témoignage de Charles Flahault (1852-1935) suscitera l'ahurissement des jeunes générations. Un professeur «dogmatique à l'excès», qui entraîne ses élèves sur des chemins difficiles et par tous les temps, commençant ses herborisations à quatre heures du matin, après une nuit dans quelque grange à foin : voilà de quoi surprendre ! Chaussures de marche, cartes et carnet de notes, boîtes pour stocker les plantes, et une organisation toute militaire : Flahault, le «fourrier» (celui qui, dans l'armée, règle les problèmes de cantonnement et d'approvisionnement), est certes un mandarin, sévère dans ses jugements et figé dans ses valeurs morales. Paternaliste avec ses élèves (ses «enfants»), se gardant de toute dérive morale, il est un fils totalement dévoué à sa mère. On peut s'étonner de ses lettres quotidiennes, lors de ses

déplacements : «Une seule chose me manque, c'est vous ; mais le monde n'est pas parfait...» (il a 27 ans), «Je m'endors en pensant à vous» (il a 40 ans).

On l'aura compris, les textes réunis par Jean-Marie Emberger, petit-fils de Flahault (qui s'est marié à l'âge de 46 ans avec une femme dévouée qui gèrera les stages de terrain de son mari), relèvent d'une chronique plus familiale que scientifique, et il manque cruellement à ce livre l'analyse critique de l'œuvre par un historien des sciences.

Peu importe que le vent emporte le chapeau du botaniste ; les carnets de route sont hélas trop aimablement descriptifs : on y parle plus d'intendance que de plantes. Ce n'est pas dans *Herborisations en zigzag* que l'on apprendra que Flahault, professeur à Montpellier à partir de 1883, est le précurseur de la phytosociologie (description des communautés végétales, ou phytocénoses), en particulier de l'école montpelliéro-zurichoise (à cause de la double origine du chef de file, M. Braun-Blanquet).

Sans être lui-même à l'origine d'une méthode, Flahault eut l'idée de faire des inventaires floristiques, de mettre en évidence des groupements végétaux et de déterminer les espèces caractéristiques de telle ou telle association végétale. Il a également compris les relations entre les climats et les végétaux. À l'occasion de voyages en Scandinavie et des herborisations dans les environs de Montpellier, dans les Pyrénées ou dans les Alpes, Flahault évoque de façon incidente les plantes typiques des endroits traversés, ainsi que les problèmes de la déforestation due au surpâturage. Il s'intéresse aussi aux résultats des essais de reforestation.

Le lecteur sera amusé par le style démodé de ses relations épistolaires, le randonneur reconnaîtra certains itinéraires, l'enseignant universitaire se dira que les étudiants d'autrefois étaient bien dociles et que les temps ont bien changé, mais le botaniste croisera peu de plantes, et en retirera une indéniable déception.

Récit de voyage ne rime pas ici avec œuvre scientifique.

Michèle FEBVRE

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>

