

HÉPATITE C • GRAPHOLOGIE • SOMMEIL IRRÉSISTIBLE • FOURMIS ESCLAVAGISTES



Pour la Science

■ POUR LA

SCIENCE

Février 2000

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

*Un océan
sur un satellite
de Jupiter ?*

La surface gelée
d'Europe





BLOC-NOTES

de Didier Nordon

TRIBUNE DES LECTEURS



JEU-CONCOURS

Montre de mathématicien

par Pierre Tougne



POINT DE VUE

Les fruits de l'invention

par Pierre Potier



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

La quête des origines

par Agnès Lainé



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Alerte à la listériose

par Hervé This



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ Un nouveau Maglev

■ Les plus anciens vertébrés connus...

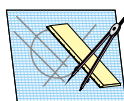
■ Connectique neuronale ■ Tomographie atmosphérique

■ Les ingrédients de la vie sur Mars?

■ Le cœur a ses raisons... ■ Régulation génétique

■ Fonte des glaces et montée des eaux

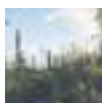
■ Les statues de l'île de Pâques



VISIONS MATHÉMATIQUES

Les théorèmes de l'impossible

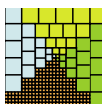
par Ian Stewart



IDÉES DE PHYSIQUE

Grandeur et décadence des arbres

par Roland Lehoucq



LOGIQUE ET CALCUL

Raccourcis dans les démonstrations

par Jean-Paul Delahaye



ANALYSES DE LIVRES

■ La vie sur Mars, de Charles Frankel

■ La sculpture du vivant, de Jean-Claude Ameisen

■ Guide des libellules d'Europe et d'Afrique du Nord (nouvelle édition), de J. d'Aguilar et J.-L. Dommanget

■ Éloge de l'odorat, d'André Holley

■ Évolutionnisme et fixisme en France. Histoire d'un combat. 1800-1882, de Cédric Grimoult



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

Quand la Terre était gelée

30

par Paul Hoffman
et Daniel Schrag

Il y a plusieurs centaines de millions d'années, la Terre aurait été couverte de glace ; puis, à la faveur d'un réchauffement par effet de serre, les organismes vivants se seraient multipliés et diversifiés.



Les défis de l'hépatite C

38

par Adrian Di Bisceglie
et Bruce Bacon

En France, un pour cent de la population est infecté par le virus de l'hépatite C, et 50 pour cent des porteurs du virus l'ignorent encore.



L'océan caché d'Europe

44

par Robert Pappalardo,
James Head et Ronald Greeley

De nombreuses structures sur la fascinante surface d'Europe, le satellite glacé de Jupiter, laissent penser qu'un océan d'eau liquide se cache sous la surface. Comment en avoir la preuve?



La narcolepsie

54

par Jerome Siegel

Lorsqu'elles sont émues, par exemple, les personnes qui souffrent de narcolepsie s'effondrent, paralysées, mais conscientes. La médecine découvre les causes de cette maladie handicapante.



La graphologie, un mal français

60

par Marilou Bruchon-Schweitzer

De moins en moins utilisée à l'étranger, la graphologie reste l'un des outils importants des organismes de recrutement français. Pourtant, elle ne décrit ni la personnalité des candidats ni leur réussite professionnelle ultérieure.



Les miroirs à retournement temporel

66

par Mathias Fink

Grâce à des réseaux de transducteurs, les physiciens renvoient un son à sa source, comme si le temps s'écoulait à l'envers.



Les reines esclavagistes

74

par Howard Topoff

Chez certaines espèces de fourmis, les invasions, les meurtres et les prises d'otages font partie de la vie quotidienne. Les reines qui mènent ces assauts pratiquent une forme de parasitisme social.



La vision : une fenêtre sur la conscience

80

par Nikos Logothetis

Afin de comprendre ce qu'est la conscience, les neurobiologistes analysent la perception visuelle et, notamment, l'interprétation des signaux optiques captés par l'œil.



Nous sommes persuadés de la vérité des résultats scientifiques, même quand nous ne pouvons en vérifier tous les attendus.

Nous pensons que le théorème de Fermat a été démontré, même si nous ne savons, faute de connaissances mathématiques, nous assurer de sa preuve : nous faisons confiance à la communauté mathématique (voir *Raccourcis dans les démonstrations*, page 96). Nous croyons en la réalité de nouvelles particules élémentaires, alors que nous sommes incapables de reproduire dans notre apprentissage les expériences qui témoignent de leur existence. Et, aussi étonnant que cela puisse paraître, nous avons le sentiment, fondé sur des modèles, que la Terre a pu être, à un moment de son existence passée, une boule de neige sale.

En revanche, nous ne croyons pas que la graphologie puisse déterminer avec fiabilité les traits de caractère d'un individu (voir *La graphologie, un mal français*, page 60), c'est-à-dire avec plus d'acuité que le bon sens peut le faire. Pourquoi? Sommes-nous injustes dans nos appréciations d'une discipline qui contient peut-être une vérité sous-jacente? Cela se pourrait. Cependant, les démarches qui prétendent prouver les affirmations des graphologues ne sont pas convaincantes. S'il est vrai que les preuves sont de nature et de force diverses dans les différentes disciplines, une démarche leur est commune : les scientifiques se penchent avec grand soin sur les faits expérimentaux ou les contre-exemples qui infirment les théories existantes.

Les experts en écriture ne suivent hélas pas cette logique, font grand cas d'arguments ou d'expériences qui vont dans le sens de leurs assertions et ignorent superbement les contre-exemples. Ils défient les «scientifiques» de prouver la non-pertinence des résultats positifs qu'ils avancent, renversant ainsi la charge de la preuve. Cette démarche ne peut faire progresser la vérité. Il y a des preuves et des preuves, mais en l'absence de rationalité critique, prétendre déterminer le caractère d'une personne apparaît peu estimable.

Philippe BOULANGER

Enigme informatique

Si quelqu'un emploie devant vous le mot «philosophie», il est philosophe : un autre dirait «philo». De même, les gens ordinaires disent «les maths» et «les mathématiques» ; seuls ces derniers sont trop respectueux d'eux-mêmes et de leur discipline pour abréger les mots qui les désignent.

Il existe une autre profession au nom interminable : informaticien. Chose curieuse, ni les membres de la profession ni ceux qui en sont extérieurs n'ont jugé bon d'en proposer une abréviation plus commode à prononcer. Pareil manque témoigne-t-il d'un phénomène de société profond ? Ou a-t-on juste calé devant une difficulté technique ? En effet, les deux façons classiques pour abréger un mot donnent ici des résultats malheureux. L'apocope mène à «un info» : les mauvais plaisants ne manqueront pas d'entendre «un nympho». Et l'aphérèse mène à un «ticien» : les mêmes mauvais plaisants entendront au choix un «p'tit chien» ou «un Ticien». Alors ? Quelle abréviation proposez-vous pour «informaticien» ?

De l'importance d'être imparfait

De l'amateur, qui joue d'un instrument une demi-heure le soir pour se détendre, et du concertiste professionnel – lequel des deux a, au cours de sa vie, commis le plus de fausses notes ? Le professionnel, bien sûr : avec un minimum obligé de 8 ou 10 heures d'instrument chaque jour, il a largement de quoi battre l'amateur dans tous les aspects de la musique, y compris la production de canards.

Du mathématicien professionnel et du collégien réfractaire aux mathématiques – lequel passe le plus de temps à sécher sur un problème de mathématiques ? Lequel est le plus affecté quand un autre résout le problème ? Le professionnel, bien sûr.

Qui a manqué un plus grand nombre de signatures de contrats juteux qu'un agent commercial ? Qui est plus souvent tombé de vélo qu'un coureur cycliste ? Personne.

Il en est de même pour toute activité. Choisir une profession revient à choisir le domaine dans lequel on connaîtra le plus de revers, le plus de déboires, le plus d'humiliations. Au lieu d'inciter les jeunes à élire une profession qui leur plaît, on devrait les orienter vers celle dans laquelle ils se sentent préparés à supporter les échecs.

Désordre imparfait

Lorsque vous rangez l'abondante paperasserie accumulée sur votre bureau depuis des mois, il existe nécessairement un papier qui reste invariant, c'est-à-dire qui occupe dans l'ordre nouveau la même place que celle qui était la sienne dans le désordre ancien.

Ce résultat vient d'être démontré par un spécialiste de cette discipline récente et en plein essor qu'est la bureaucratie théorique. Il ne surprendra pas les amateurs. Ils sauront y voir une élégante extension d'un théorème connu, le «théorème du point fixe de Brouwer», lequel dit à peu près ceci : lorsqu'on secoue l'intérieur d'une sphère, il existe nécessairement un point dedans qui ne bouge pas, un point qui reste immobile au milieu de l'agitation ambiante.

Ainsi s'explique un phénomène trop souvent constaté : on ne réussit jamais à remettre la main sur un papier égaré dans le fouillis d'un bureau. Quelle que soit l'opération effectuée – mettre un ordre méthodique ou, au contraire, tout fiche sens dessus dessous –, elle échoue. En effet, comme par un fait exprès, c'est bien sûr le papier que vous cherchez qui reste invariant au cours de l'opération. Il était caché avant l'opération ? Il est donc tout aussi caché après.

Répondez simplement SVP

On ne peut guère se poser de questions plus complexes que celles ayant trait à l'organisation de la société : comment voulons-nous vivre, pour quoi faire, quels sont nos idéaux, etc. ? À ces questions, on ne peut imaginer de réponse plus simple que de mettre dans une urne un bulletin portant le nom de Dupont ou celui de Durand. L' élu n'aura qu'à s'occuper de tout. «Faites au mieux, merci d'avance.»

Inversement, est-il question plus simple à poser que celle sur l'unicité de la parallèle à une droite donnée passant par un point donné – ni réponse plus complexe que celle apportée par les mathématiciens ?

En mathématiques comme en politique donc, il n'y a aucun lien entre la complexité d'une question et la complexité de la réponse. Autant dire que ces deux disciplines sont aussi peu satisfaisantes pour l'esprit l'une que l'autre. D'où une question : existe-t-il des disciplines satisfaisantes, c'est-à-dire au sein desquelles la complexité d'une réponse est toujours égale à la complexité de la question ? Ma question est simple, j'attends une réponse de même.

Le principe de précaution

Le «pari de Pascal» ne mérite guère plus de considération que l'attitude qui consiste à aller à la messe en disant : «Ça ne fait peut-être pas de bien, mais ça ne peut pas faire de mal.» Cette page de Pascal est très connue parce qu'elle semble apporter un remède à une vieille inquiétude : n'étant jamais certains que nos actes seront sans conséquences fâcheuses, nous sommes prêts à nous en remettre à n'importe quelle règle censée minimiser les risques.

Après avoir assuré la fortune du pari de Pascal, cette même inquiétude assure celle d'un principe que les médias font passer pour nouveau : le «principe de précaution». Si, autrefois, se déclarer hostile à la religion était dangereux, aujourd'hui, se déclarer hostile au principe de précaution est un suicide politique. Méfions-nous de ce credo qui fait l'unanimité. La précaution la plus naturelle est de se mettre systématiquement du côté du plus fort. N'appliquaient-ils pas à leur façon le principe de précaution, ceux qui collaboraient en 1940 ? Quant aux dirigeants actuels, le principe de précaution ne revient-il pas, trop souvent, à abdiquer tout courage politique face aux exigences, pas toujours justifiées, de l'opinion ? Je ne dis pas qu'il faille rejeter le principe de précaution. Mais il faut certainement l'utiliser avec... précaution.

Attention électrique

Les auteurs se donnent un mal de chien pour écrire leurs livres. Or ils n'avaient jusqu'à présent aucun moyen de rétorsion contre les lecteurs inattentifs, ceux qui se permettent de parcourir leurs textes tout en rêvassant à autre chose. Grâce au progrès, cette anomalie choquante devrait bientôt cesser. Puisque les livres sur papier, dit-on, vont disparaître, profitons-en pour incorporer dans les livres électroniques prêts à leur succéder un appareil capable de détecter toute baisse d'attention chez le lecteur, et de lui envoyer aussitôt une décharge électrique vengeresse qui le rappellera au respect dû aux œuvres de l'esprit.

Indécidable

Ces derniers mois, Jean-Paul Delahaye nous a parlé des indécidables qui existent dans les mathématiques (voir *Pour la Science*, novembre et décembre 1999). À ce sujet, j'ai l'impression que sous le terme indécidable se cachent deux sortes d'énoncés. Les «vrais» indécidables, c'est-à-dire des énoncés qui ne peuvent être démontrés dans un système axiomatique, mais qui peuvent l'être dans un autre plus vaste, comme celui de l'Hydre de Lerne dans les systèmes de Peano et de Z-F. Les «faux» indécidables, que j'aurais envie d'appeler «arbitrairement décidables». Par exemple, si l'on refuse l'axiome de l'infini, «N» n'est pas un ensemble, car, dans ce cas, il est isomorphe à la collection de tous les ensembles. Au contraire, si l'on accepte cet axiome, il le devient. Si les deux systèmes d'axiomes qui conduisent à ces deux affirmations contradictoires sont cohérents, cette affirmation est considérée comme indécidable. Le principe est le même pour l'hypothèse du continu (indécidabilité démontrée par Paul Cohen). Si l'on pose que la collection de tous les ensembles définissables par une formule est égale à celle de tous les ensembles constructibles (je crois), cette hypothèse est vraie et, sinon, elle est fausse (théorie des ensembles, J.-L. Krivine). Étant donné que la théorie Z-F ne pose en axiome ni l'un ni l'autre, on peut décider arbitrairement de sa valeur de vérité en prenant soit l'un, soit l'autre, car cet axiome est indépendant de ceux de Z-F. Il faut bien sûr pour cela que les deux systèmes en question soient cohérents, ce qu'on ne sait pas. En conclusion, j'aimerais savoir si je me trompe ou s'il y a vraiment deux sortes d'indécidables.

Nicolas MICHEL, Caen

Réponse de Jean-Paul Delahaye

Il y a certainement de nombreuses catégories d'indécidables, et toutes sortes de classifications en ont déjà été proposées. Toutefois, celle que vous défendez entre «vrais indécidables» et «faux indécidables» est beaucoup plus philosophique que mathématique.

Ce n'est qu'une fois constaté que d'autres moyens permettent de prouver le résultat sur l'Hydre de Lerne que vous proposez de le classer parmi les «indécidables vrais».

N'importe quel énoncé indécidable dans un système devient décidable dans un système bien choisi. Pour parler d'indécidable vrai, il faut donc disposer d'un moyen d'évaluer les systèmes formels et de les classer en «systèmes formels vrais» et «systèmes formels faux». Mais on est alors revenu au point de départ ! La position philosophique appelée «réalisme ensembliste» consi-

dère qu'il y a une vérité mathématique objective concernant les ensembles et, en conséquence, concernant la grande majorité des questions mathématiques, et cela indépendamment des moyens que nous avons ou que nous n'avons pas de savoir ce qui est vrai. À partir d'une telle position, on peut justifier votre classification, mais il faut savoir qu'elle n'est pas partagée par tout le monde.

Le problème qu'indirectement vous soulevez par votre question est celui même de la philosophie des mathématiques, problème à propos duquel de nombreuses conceptions s'opposent encore aujourd'hui et qu'on ne résout pas par de simples considérations mathématiques.

Notons aussi que l'analyse non standard est née de la considération des modèles non standards de l'ensemble des entiers, c'est-à-dire de l'ajout au système formel de l'arithmétique de la négation d'un indécidable dont vous qualifiez la négation de vraie. Cela montre que, parfois, la prise en considération d'axiomes s'opposant à l'intuition engendre de nouveaux domaines mathématiques aussi intéressants que ceux obtenus en n'ajoutant que vos «indécidables vrais». Le monde mathématique est riche dans toutes sortes de directions et il n'est pas impossible que tout système cohérent soit intéressant même si, dans un premier temps, il apparaît contraire à l'intuition.

Recherche et liens

L'article sur la «Recherche intelligente sur l'Internet» (voir *Pour la Science*, août 1999) présente une approche digne d'intérêt en proposant d'utiliser les liens hypertexte afin d'améliorer la performance des moteurs de recherche sur Internet. Si l'argumentation théorique présentée semble convaincante, la réalité et les expériences empiriques semblent dévoiler une toute autre perspective.

En effet, depuis plusieurs années, de nombreux efforts ont été consentis pour mettre au point des collections de documents pour lesquelles on dispose d'un ensemble de requêtes et, pour chaque requête, la liste des documents pertinents dans le corpus considéré. Nous pouvons ainsi évaluer une stratégie de dépistage en utilisant ces collections afin de vérifier expérimentalement si une stratégie s'avère meilleure qu'une autre. Malheureusement, rares sont les collections qui possèdent des liens entre documents (par exemple, les liens de citation bibliographique) ou des liens hypertexte.

En ce qui concerne les liens de référence bibliographique, nous avons constaté, dans le meilleur des cas, une augmentation de 5 à 8 pour cent de la qualité de réponse d'un moteur

de recherche. Certes, ces expériences ont été menées sur une collection de taille réduite de 3 204 documents et avec 50 requêtes. Ainsi, cette première expérience tend à démontrer les limites dans le recours aux liens de référence bibliographique, liens que l'on peut estimer comme de meilleure qualité ou portant une information plus précise et pertinente sur la relation entre deux documents que les liens hypertexte du Web. En effet, ces derniers sont très souvent des aides à la navigation et, dans ce cas, n'ont pas la vocation d'établir un rapprochement sémantique entre des pages Web.

Mais le Web, par sa taille et ses très nombreux liens, n'est-il pas une collection très différente ? Les stratégies de recherche habituelles fonctionneraient-elles aussi bien dans un tel environnement ? Et les liens, dans ce cas précis, ne seraient-ils pas plus utiles au dépistage de l'information ? Une première réponse vient d'être apportée par la dernière conférence TREC qui s'est déroulée en novembre 1999. Sur la base d'une collection de 247 491 pages Web, accompagnée de 100 requêtes, une vingtaine d'équipes de recherche ont proposé différentes approches.

Les conclusions obtenues indiquent en premier lieu que les modèles de dépistage de l'information fonctionnant bien sur d'autres corpus apportent des réponses de bonne qualité pour le Web. Deuxièmement, les liens hypertexte du Web n'augmentent pas de manière significative la qualité de la réponse obtenue. Troisièmement, les moteurs de recherche utilisant exclusivement les liens hypertexte ont une qualité de réponse significativement moins bonne qu'une stratégie classique de recherche. En résumé, les liens hypertexte actuels n'augmentent pas la performance des moteurs de recherche. Ainsi, si une page est pointée par de nombreuses autres pages, on peut inférer que cette page appartient à un site populaire, mais on ne peut pas en induire qu'elle contient des informations de bonne qualité ni qu'elle doit être favorisée dans l'extraction de l'information du Web. Cette constatation ne nous empêche pas d'imaginer d'autres stratégies de recherche recourant aux liens hypertexte ou d'utiliser ces derniers dans d'autres buts (classification automatique, recherche de communautés d'intérêt, etc.).

Jacques SAVOY, Neuchâtel (Suisse)

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

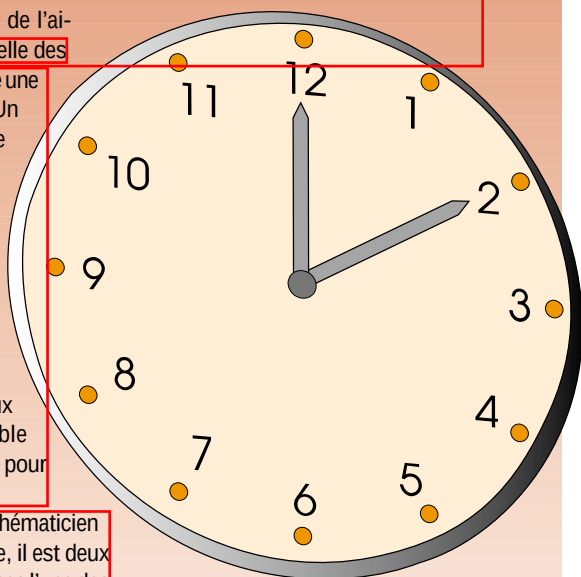
JEU-CONCOURS N° 68

PIERRE TOUGNE

Montre de mathématicien

L'inégalité de la longueur de l'aiguille des heures et de celle des

minutes dans une montre est-elle une nécessité ou une commodité ? Un mathématicien dont l'œil avait une acuité telle qu'il pouvait mesurer parfaitement les angles que faisaient les deux aiguilles identiques m'a affirmé qu'avec cette montre spéciale il pouvait connaître l'heure exacte entre minuit et midi (exclu), sauf dans certains cas en nombre fini où il y avait une ambiguïté entre deux heures possibles. Cet ensemble de mesure nulle était négligeable pour le mathématicien...



En effet, si la montre du mathématicien indique l'heure comme ci-contre, il est deux heures et non 0h10, car dans ce cas l'une des deux aiguilles ne peut se trouver exactement sur 12. Comment fait le mathématicien pour connaître l'heure ? Combien y a-t-il de positions ambiguës entre minuit et midi ? Quelles sont, dans ces cas particuliers, les ambiguïtés minimale et maximale ?

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

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 66

Chaque enfant doit recevoir neuf tonnes et $(9 \times 1 + 9 \times 2 + 9 \times 3 + 9 \times 4)/5 = 18$ quarts de tonneaux de vin. Si l'on désigne par x, y, z, t, u les nombres de tonneaux de chaque type (plein, trois quart plein, demi-plein, au quart plein et vide), que reçoivent respectivement les héritiers. Nous devons avoir :

$$4x + 3y + 2z + t = 18 \text{ et } x + y + z + t + u = 9.$$

La résolution de ce système de deux équations à cinq inconnues en nombres entiers différents de zéro conduit aux huit solutions représenté sur le tableau ci-dessous.

Parmi ces huit solutions, nous devons en choisir cinq différentes, mais comme nous ne disposons que de neuf tonneaux

de chaque sorte, il faut que les sommes des x, y, z, t et u de ces cinq solutions valent 9. Nous pouvons tout de suite éliminer la solution E, car $z = 5$ et qu'il n'y a pas quatre autres solutions avec $z = 1$. Les sommes par colonne des sept solutions restantes sont 12, 13, 13, 13, 12, donc il nous faut éliminer deux solutions dont les sommes par colonne sont 3, 4, 4, 4, 3. La solution A ne peut être éliminée, car $x = 3$. Enfin, il n'est pas difficile de voir que seules B et H, C et G et D et F remplissent la contrainte précédente. Nous avons, par conséquent, aux 120 permutations près entre les enfants, trois solutions fondamentales seulement : (A, C, D, F, G) (A, B, D, F, H) et (A, B, C, G, H).

SOLUTIONS	x	y	z	t	u
A	3	1	1	1	3
B	2	1	2	3	1
C	2	1	3	1	2
D	2	2	1	2	2
E	1	1	5	1	1
F	1	2	3	2	1
G	1	3	1	3	1
H	1	3	2	1	2



Les fruits de l'invention

PIERRE POTIER

La rétribution des chercheurs inventifs réduit comme peau de chagrin.

Doit-on expliquer longuement pourquoi l'Etat a intérêt à promouvoir la découverte et l'invention ? La question essentielle est plutôt de savoir comment inciter les chercheurs, ingénieurs et autres inventeurs et découvreurs potentiels à chercher, trouver, puis protéger leurs inventions, et à récolter, éventuellement, le fruit de leurs travaux. Le parcours est long, jusqu'à la prise de brevets, et plus encore jusqu'à la perception de redevances, en cas d'exploitation. Il doit donc être facilité.

Si l'industrie a la responsabilité de ses innovations, l'invention par la recherche publique doit faire l'objet de débats. La France dispose d'un système de recherche publique important : le budget civil de recherche et de développement atteint 55 milliards de francs. Quelle est l'efficacité du système ? Elle se mesure à la quantité de connaissances nouvelles obtenues, et aux royalties des brevets d'invention. Choisissons arbitrairement d'évaluer la recherche de connaissance au nombre de prix scientifiques notables, tel le prix Nobel : si la physique connaît quelques succès, ainsi que la chimie, la biologie n'a pas fait ses preuves au cours des années récentes. D'autre part, le « retour sur investissement » est très faible, en termes de royalties, alors que les potentialités sont considérables dans les industries chimiques, pharmaceutiques, électroniques...

D'où la question initiale : comment promouvoir l'invention et la découverte ? Le pays et, notamment, l'administration de la recherche feraient une grave erreur s'ils se contentaient de proclamer *urbi et orbi* que les chercheurs doivent collaborer avec l'industrie ; les campagnes d'information doivent être soutenues par de puissantes incitations financières.

Il y a quelques décennies, alors que la France cherchait déjà des moyens d'augmenter la force d'innovation de sa recherche publique, 60 pour cent des redevances de brevets étaient allouées aux chercheurs ; le laboratoire recevait 20 pour cent des sommes perçues, et le CNRS les 20 pour cent restants. En 1978, le pré-

sident de la République de l'époque, Valéry Giscard d'Estaing, et le gouvernement avaient jugé cette incitation insuffisante, et ils avaient promulgué une loi, dite « loi Foyer » (Jean Foyer était alors Garde des Sceaux), qui prévoyait que les revenus de la propriété industrielle, représentés par les redevances perçues par l'exploitation de brevets, seraient taxés au régime fiscal préférentiel des « plus values à long terme » (comme les revenus d'actions) et non au régime de droit commun (celui de l'impôt sur le revenu des personnes physiques), moins favorable.

À l'époque, la différence de traitement était considérable : le taux des plus values à long terme était de 16 pour cent, et celui de l'impôt sur le revenu des personnes physiques pouvait, selon un barème progressif, atteindre plus de 45 pour cent (depuis, la pression fiscale a considérablement augmenté : le taux supérieur de l'impôt sur le revenu atteint 54 pour cent, et les prélèvements sociaux qui atteignent 10 pour cent se sont ajoutés au taux de 16 pour cent des plus values à long terme).

Que s'est-il passé depuis ? La situation n'a cessé d'empirer. Lorsque je fus nommé directeur général de la Recherche et de la Technologie, en juillet 1994, je découvris qu'aucun décret d'application de la « loi Foyer » n'avait été publié : 16 ans après ! Alors que le Conseil d'État a jugé, depuis longtemps, que l'État devait s'astreindre à publier tout décret d'application d'une loi au plus tard deux ans après la promulgation de celle-ci.

D'autre part, la fonctionnarisation des chercheurs, en 1983, a eu des conséquences néfastes pour l'incitation à l'innovation. En effet, à l'époque de la promulgation de la « loi Foyer », la plupart des chercheurs et ingénieurs du secteur public étaient des agents contractuels de l'État ; ils relevaient d'un régime d'enrichissement analogue aux chercheurs de l'industrie. La fonctionnarisation s'est accompagnée d'une réflexion de l'administration des finances sur la façon dont

ces nouveaux agents de l'État pouvaient s'enrichir. Cette administration a décidé de prendre des mesures dérogatoires pour traiter les revenus d'invention, qui ont été transformés en primes d'intéressement, déclarables en revenus. Pis encore, les taux de 60, 20 et 20 pour cent évoqués précédemment ont été respectivement changés (par des décrets pris en octobre 1996) en 25, 25 et 50 pour cent !

Plus généralement, l'administration des finances a fait prendre à l'État une série de mesures qui, de manière insidieuse, ont vidé la « loi Foyer » d'une grande partie de sa substance. L'État, devenu pingre, a démotivé les chercheurs, qui ont réduit leur activité industrielle.

Face à cette situation démotivante, un groupe interacadémique (entre l'Académie des sciences et l'Académie des sciences morales et politiques, dont fait notamment partie Jean Foyer) vient d'être constitué avec l'appui du ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie, et de son ministre, notre confrère Claude Allègre. Depuis qu'il est aux « affaires », C. Allègre a manifesté un intérêt constant pour tout ce qui touche à la créativité et aux applications de la science, mais le reste de l'appareil de l'État est-il convaincu qu'il faut appliquer et amplifier ces décisions de grand bon sens, et non les freiner ?

Il y va de l'intérêt supérieur du pays. Tant mieux si les chercheurs s'enrichissent ; simultanément ils polliniseront le tissu industriel, touristique, etc., et l'activité suscitée par leurs travaux conduira à la création ou au maintien d'emplois ! Depuis que les Phéniciens ont inventé le papier monnaie, la juste rétribution des efforts est possible. Hélas, l'administration n'est pas phénicienne : par jalousie ?

Pierre POTIER dirige l'Institut de chimie des substances naturelles, à Gif-sur-Yvette. Il est président de la Fondation de la Maison de la chimie, membre de l'Académie des sciences et Médaille d'or du CNRS.

■ 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.



Harlinque-Viollet

La quête des origines

AGNÈS LAINE

Certains anthropologues ont longtemps cherché des critères «scientifiques» pour valider de très anciennes convictions racistes, justifiant ainsi l'entreprise de colonisation des sociétés africaines.

Jusqu'à une date récente, la reconstitution de l'histoire ancienne des Africains a été faite par des Occidentaux. Elle a été l'occasion d'un **déploiement de scénarios étonnants et**, malgré l'entrée de ce continent dans le «concert des nations», la pensée scientifique se débarrasse difficilement de cet héritage. Aujourd'hui, la science, l'Afrique et l'Occident ont tout à gagner d'une critique historique de ces scénarios.

Depuis la découverte des charniers d'Auschwitz et leur intégration progressive dans la mémoire collective, les pays d'Europe ont voulu croire que les hommes en avaient fini avec le besoin d'affirmation par la race. Or, malgré les affirmations des généticiens et des anthropologues selon lesquelles les races humaines biologiques n'existent pas, le concept reste prégnant. Parmi les arguments utilisés par les tenants du racisme, certains sont d'origine scientifique, et l'on s'interroge : comment en est-on arrivé là ? Pour tenter de répondre à cette question, nous avons réexaminé les travaux d'anthropologie relatifs aux caractères génétiques des populations ; au milieu du ^{xx}e siècle, la recherche de critères génétiques distinctifs avaient pris le relais sur l'étude de la morphologie et du squelette.

Sur le continent africain habitent des hommes que les Occidentaux, depuis le Moyen Âge, considéraient comme des créatures appartenant aux limites du monde humain : mondes lointains des

limites de la mer, monde de l'étrange, de l'inconnu, du monstrueux. Dès cette époque, Bible en main, on s'interroge sur leur filiation depuis Adam ou Abraham. Au ^{xviii}e siècle, le siècle des grandes explorations maritimes à travers le monde, on étudie les rapports entre Blancs, Jaunes et Noirs ; on cherche à classer l'homme, aussi bien que l'on classe les milliers d'espèces de plantes et d'animaux décrites alors. Les caractères morphologiques, l'interfécondité des groupes, les comportements individuels et sociaux, ou encore les dispositions psychologiques, morales et intellectuelles sont observés, recensés, classés et étudiés en tant que signes d'identité ou d'altérité.

Le volume et la forme des crânes deviennent au ^{xviii}e siècle, mais plus encore au ^{xix}e, des «indices» de l'intelligence humaine. Puis, avec les théories de l'évolution, qui s'imposent progressivement en Europe et aux États-Unis à la fin du ^{xix}e siècle ou au début du ^{xx}e, la question de la «mesure» de l'intelligence se pose à nouveau. Toutefois, quelle que soit la théorie à laquelle on adhère, les Noirs sont toujours considérés comme inférieurs, physiquement selon des critères esthétiques, mais aussi intellectuellement et moralement, ce que démontre leur retard technologique, aune à laquelle l'Occident s'est habitué à évaluer le degré de civilisation. Cette représentation péjorative est le fruit des

conditions imposées aux Noirs par les Occidentaux, du ^{xv}e au ^{xix}e siècle : traite, esclavage et colonisation. Les esclavagistes et les colons cherchent à justifier leur entreprise par des arguments «scientifiques» (la race inférieure), moraux (la mission civilisatrice), politiques (le droit du plus fort) et économiques (recherche de matières premières). Les Occidentaux des ^{xix}e et ^{xx}e siècles sont convaincus que l'«infériorité» des Noirs résulte d'une évolution différente et séparée de celle des Européens. On cherche à donner à ces convictions l'objectivité de la science.

Du milieu du ^{xix}e siècle au début du ^{xx}e, une nouvelle discipline scientifique, la biométrie, vise à répondre aux questions posées par la théorie darwinienne de l'évolution : comment les caractères se transmettent-ils ? Comment varient-ils d'une génération à l'autre ? Peut-on améliorer les «races» humaines par une politique de sélection ? Quelques-uns des principaux pionniers de cette discipline, notamment le biologiste Francis Galton, cousin de Charles Darwin, le mathématicien Karl Pearson et le biologiste Ronald Fisher puisent dans la théorie darwinienne et dans l'étude de la transmission des caractères héréditaires la justification de la théorie eugéniste.

GROUPES SANGUINS ET HIÉRARCHIE RACIALE

Nourrie des principaux apports de la génétique, la biométrie devient la génétique des populations. De son côté, l'immunologie progresse. Elle met à la disposition des généticiens et des mathématiciens un nouvel outil pour leurs analyses : les groupes sanguins. Les anthropologues rejoignent les généticiens, convaincus que des classifications raciales judicieuses préciseraient les circonstances de l'évolution humaine et la préhistoire des populations modernes. Les groupes sanguins, découverts en 1900 par Karl Landsteiner semblent être l'outil nécessaire à l'étude de l'évolution (Landsteiner avait observé que le sérum



3

L'anthropologie physique décline les humains en races, sous-races et types, mais il y a autant de classifications que d'auteurs.

de certains prélèvements sanguins agglutinent les hématies d'autres échantillons de sang ; il en déduit qu'il existe trois types de sang (A, B, O) qui contiennent des substances spécifiques).

En 1919, un médecin de l'armée serbe, Ludwig Hirschfeld, publie un article considéré comme l'acte de naissance de l'anthropologie génétique, où il étudie les réactions d'agglutination du sang de soldats de cette armée, d'origines diverses. Constatant que plus les soldats viennent de l'Est, plus ils ont de chances d'être du groupe B, et plus ils viennent de l'Ouest, plus ils ont de chances d'être du groupe A (au centre, les proportions sont intermédiaires), il conclut – bien prématurément ! – que l'espèce humaine a deux origines : l'une orientale, l'autre occidentale. Les analyses montrent aussi que les Africains sont plus souvent que les autres du groupe O : certains y voient l'indice d'une race antérieure aux mutations aboutissant aux groupes A et B.

Au cours des années suivantes, on étudie la répartition des groupes sanguins, puis des groupes rhésus, découverts dans les années 1930. Or l'Afrique est très peu représentée dans l'ensemble des enquêtes. Les informations proviennent des États-Unis, où les tests sont réalisés sur des Américains d'origine africaine, ou bien d'Afrique du Sud : la génétique appliquée à l'étude des « races » intéresse surtout les pays confrontés à la présence simultanée, sur leur territoire, de plusieurs grandes ethnies.

Quelques études sont réalisées en Afrique du Nord, notamment en Égypte, mais aucune en Afrique subsaharienne. Pourtant, des cartes de répartition des groupes sanguins sont tracées sur tout le continent africain ! En fait, ces lacunes reflètent des conceptions anthropologiques antérieures. On se représente le continent habité par des Blancs chamitiques au Nord, des « Nègres », dont l'origine est discutée, et par une souche primitive (Hottentots, Bochimans et Pygmées, parfois désignés par le terme de Négrilles) disséminée en Afrique centrale et australe.

Les Noirs d'Afrique ont d'abord été considérés comme les descendants de Cham, que son père Noé a maudit pour lui avoir manqué de respect. Puis, au XIX^e siècle, un réaménagement biblique a fait de Cham l'ancêtre des Blancs d'Afrique. Les populations chamitiques étaient considérées par l'historiographie coloniale comme les descendants d'une branche aryenne descendue vers l'Afrique à une époque indéterminée, aujourd'hui mélangée, mais dont la supériorité raciale leur aurait permis de créer des foyers de civilisation en Égypte, en Éthiopie, mais aussi dans divers royaumes, tel le

Rwanda. L'historiographie africaniste reste prisonnière, pendant des décennies, de ce thème chamitique des invasions blanches civilisatrices, mais elle permet aux colons européens de se présenter comme la dernière vague de civilisateurs. Selon certains anthropologues, les Bantous seraient le fruit d'un métissage entre des Bochimans et des Nègres, avec, à plusieurs reprises, quelques apports de sang provenant de la vallée du Nil. Selon d'autres, les Nègres seraient venus d'Asie par l'océan Indien.

UNE HOMINISATION... AFRICAINE

Or, après avoir longtemps situé l'origine des premiers hommes en Europe ou en Asie centrale, le regard des chercheurs se déplace vers l'Afrique. La transition a lieu dans les années 1950, après que les découvertes successives des australopithèques, d'*Homo erectus* et d'*Homo habilis*, éventuellement associés à des outillages lithiques très primitifs, rendent plausible l'hypothèse que le processus d'hominisation a eu lieu en Afrique. Comment peut-on concilier cette origine géographique du genre humain avec une évolution séparée des « races » humaines ? Cette question est à l'arrière-plan de nombreux travaux sur la biologie des peuples africains actuels qui sont devenus des fils d'Ariane remontant vers la préhistoire. Bien sûr, l'absence de connaissances sur les étapes intermédiaires du peuplement africain a laissé une place prépondérante à l'imaginaire.

Après 1950, les travaux sur la diversité humaine en Afrique se multiplient. Nous avons recensé les articles portant sur l'étude génétique des populations africaines publiés de 1945 à 1984, soit 898 références bibliographiques. En étudiant les différents supports de publication, les titres publiés, leur date de publication, la nationalité des auteurs, le lieu d'édition, notamment, nous avons montré que les principaux pays publiant sur ce sujet sont les puissances coloniales ou ex-coloniales (la Grande-Bretagne, la France, le Portugal, la Belgique et l'Espagne), auxquelles s'ajoutent l'Afrique du Sud, les États-Unis et la Suisse. Ces huit États publient 77 pour cent des titres. Les 208 communications

restantes sont rédigées par divers États de l'Afrique (le Kenya, Madagascar, le Zimbabwe, l'Égypte), de l'Occident ou, plus récemment, de l'Asie (Japon). Près de la moitié de ces travaux sont publiés dans des revues de médecine, surtout les revues de pathologie tropicale françaises, belges et anglaises. Les autres paraissent dans des revues de génétique, d'hématologie et d'anthropologie physique. Les chercheurs qui publient sont essentiellement des médecins coloniaux, et des médecins de spécialités diverses exerçant en milieu hospitalier, dans le cadre de la coopération. Ce sont très rarement des anthropologues.

La grande majorité des travaux a été réalisée après l'indépendance des États, de sorte que les données n'ont pas été dictées par la nécessité de justifier la colonisation. Toutefois, si cela est vrai de la production des données génétiques et sérologiques, qu'en est-il des



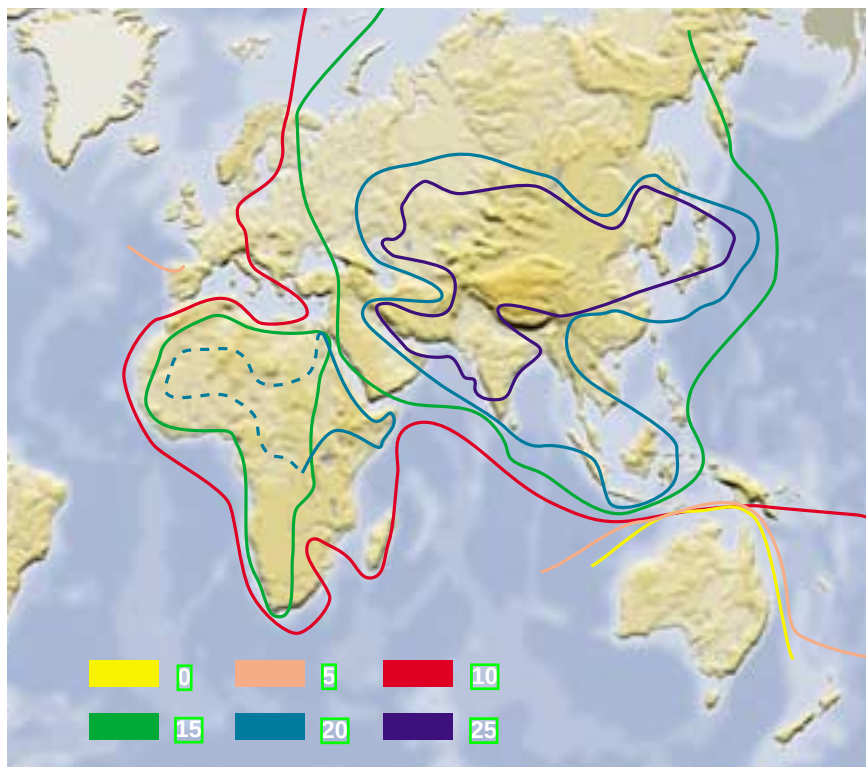
Les Pygmées ont été très étudiés par les anthropologues du XIX^e siècle. Leurs mensurations étaient considérées comme reflétant un stade infantile de l'humanité.

interprétations? Durant les années 1950-1970, diverses hypothèses sur l'origine de l'homme ou des peuples d'Afrique ont été avancées, alors que l'on ignorait les innombrables polymorphismes génétiques (certains gènes existent sous plusieurs formes qui codent des protéines ayant la même fonction, mais qui sont légèrement différentes) et leur répartition. Ces synthèses étaient prématurées, mais reflétaient les interrogations et les mentalités de l'époque.

En 1954, le médecin anglais Arthur Mourant, membre du laboratoire de recherche sur le sang, à Londres, publie des tables qui rassemblent les données recueillies depuis le début de l'hémostase. Ces tables, plusieurs fois remises à jour, sont la référence des chercheurs de cette période. Un ouvrage publié en 1954 sur la répartition des groupes sanguins montre que l'Afrique subsaharienne abrite des populations qui se distinguent des autres populations du monde par des fréquences caractéristiques de certains gènes (et, par conséquent, d'une fréquence élevée du groupe sanguin O et du groupe rhésus cDe). Par ailleurs, on constate également une grande homogénéité des populations subsahariennes, ce qui met à mal les typologies ethno-raciales antérieures. On doit admettre que les groupes sanguins n'autorisent pas une discrimination des populations chamitiques ; on ne peut retrouver leurs origines ni leur apport spécifique dans le peuplement originel de l'Afrique.

HÉMOGLOBINE ET TYPOLOGIE

Cette frustration stimule la recherche d'autres polymorphismes. À côté des groupes sanguins, l'hémoglobine attire l'attention des généticiens. En effet, on avait repéré les effets pathologiques de certaines hémoglobines sur des Américains d'origine africaine : l'hémoglobine de type S est responsable de maladies génétiques, la drépanocytose (les globules rouges ont une forme anormale) et la bêta-thalassémie (une anémie grave due à une insuffisance de la synthèse de la globine, qui entre dans la composition de l'hémoglobine). Or la répartition de ces hémoglobines est hétérogène, et certains chercheurs pensent alors que les disparités coïncident avec les grandes classifications anthropologiques. En 1949, le médecin britannique Hermann Lehmann, en exercice en Ouganda, révèle des chiffres étonnants à partir desquels il propose un scénario pour d'anciennes migrations, une théorie ultérieurement qualifiée de classique. La proportion de porteurs d'hémoglobine HbS semble très



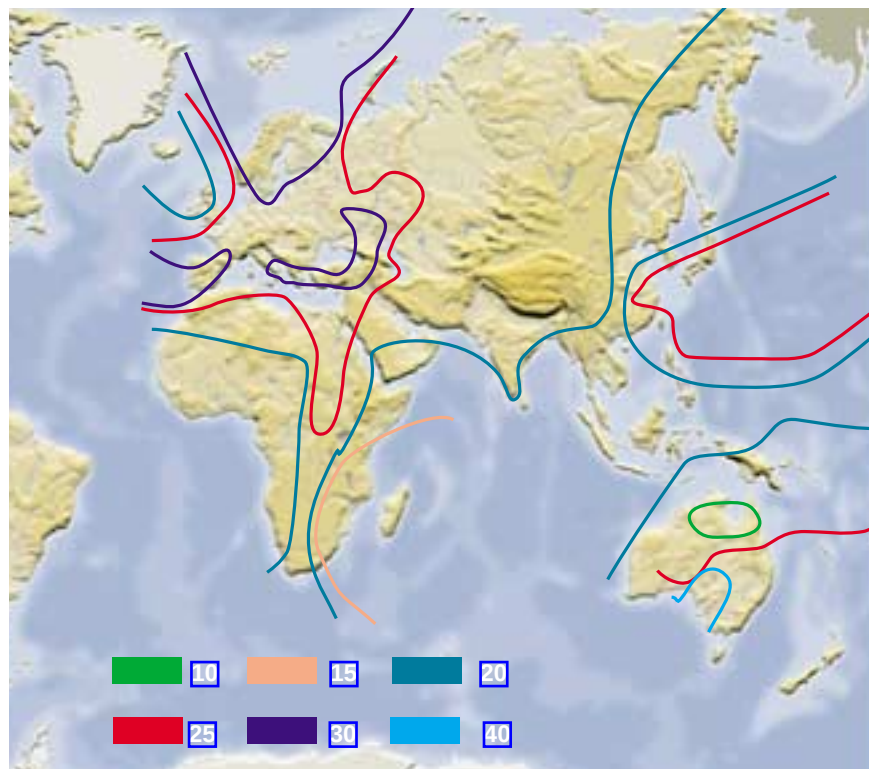
La répartition des groupes sanguins (groupe A, à gauche, et groupe B, à droite) a été considérée, pendant un temps, comme un moyen de remonter à l'origine de l'homme. La répartition de ces groupes a été progressivement précisée (la fréquence est exprimée en pourcentage). On a

faible dans les tribus chamitiques, très élevée et homogène chez les Nilotés (des populations du haut Nil), très variable chez les Bantous, maximale chez les Pygmoides Baamba des monts de la Lune. En somme, plus on est noir ou primitif, plus on a d'hémoglobine HbS.

En 1952, Lehmann rapporte les premières données sur l'existence de l'hémoglobine HbS dans des populations du Sud de l'Inde. Il en déduit que l'hémoglobine HbS a été importée en Afrique par des populations du Sud de l'Inde dont les représentants actuels seraient les Baambas. Curieusement, Lehmann ne recherche pas ailleurs cette hémoglobine, par exemple dans le Nord de l'Inde, plus facile d'accès et où elle est abondante. Lehmann cherche ensuite cette hémoglobine en Australie, mais il ne l'y trouve pas. L'hypothèse de Lehmann a été invalidée, car on sait aujourd'hui que la répartition de l'hémoglobine HbS résulte de plusieurs mutations indépendantes, et des fortes pressions sélectives exercées par le paludisme (la composition biochimique des globules rouges contenant cette hémoglobine confère une certaine résistance au paludisme). En fait, Lehmann se sert des marqueurs génétiques pour conforter ses convictions : le statut des systèmes sanguins, encore très fragile, ne peut infirmer des convictions issues de dizaines d'années de racisme fondé sur l'anthropométrie.

Aussi les données sanguines ne sont-elles reconnues que lorsqu'elles confirment les acquis. Dans le cas contraire, les discordances sont mises au compte des aléas de la dérive génétique, ou encore d'une pression de sélection indéterminée. C'est pourquoi les systèmes sanguins ne remettent pas en cause les classifications antérieures. De surcroît, les représentations des populations africaines qu'élaborent les Occidentaux forment un corpus intouchable qui fait partie intégrante d'un système politique fonctionnel au sein duquel chaque catégorie occupe une place précise. Transformer ces représentations porterait atteinte au système tout entier. Ce n'est pas un hasard si elles changent lorsque les États acquièrent leur indépendance.

En 1958, l'anthropologue américain Frank Livingstone publie un article sur les conséquences anthropologiques de la répartition des gènes de la drépanocytose en Afrique de l'Ouest. La génétique des peuples africains y paraît résulter, pour la première fois, d'une confrontation avec un environnement façonné par l'homme. Les années 1960 marquent une transition : on abandonne progressivement les thèmes raciaux, ainsi que les grandes synthèses simplistes, et l'on prend conscience de la complexité des équilibres entre l'homme et son milieu. Les analyses globales



représenté ici la répartition telle qu'elle était établie en 1950. Contrairement à ce que ces cartes laissent penser, les données pour l'Afrique étaient quasi inexistantes. Les quelques données disponibles pour les Noirs provenaient d'Américains d'origine africaine et de Sud-Africains.

sur les distances génétiques entre populations prennent le pas sur l'étude des marqueurs isolés. Les monographies régionales ou ethniques se multiplient. Les deux décennies suivantes confirment cette rénovation. On étudie de nouveaux polymorphismes (notamment ceux des enzymes et des anticorps) et l'on s'interdit désormais les classifications hâtives. Puis une nouvelle période s'amorce avec le début des publications portant sur la typologie de fragments d'ADN. Le marqueur devient le gène lui-même.

Nous avons examiné la production scientifique dans trois grandes régions, l'Afrique orientale britannique et belge, et l'Afrique occidentale sous diverses administrations ; nous avons montré que l'anthropologie biologique, qui, dans diverses régions, visait à affirmer la suprématie du colon sur l'indigène, a également servi les besoins de l'ordonnement colonial quand les colons déléguèrent leur pouvoir : dans certaines régions, ils pratiquaient une forme de gestion indirecte des populations en s'appuyant sur une élite indigène, à laquelle ils octroyaient des privilèges particuliers ; ce fut le cas en Ouganda, au Soudan, au Rwanda, au Burundi, à Madagascar et au Nigeria. Cette organisation découlait d'un souci de gestion efficace. Par la suite, les travaux scientifiques ont surtout entretenu les savoirs

établis, devenus constitutifs d'une culture coloniale locale ; les ethnologues – qui étaient au service de l'administration coloniale – en étaient devenus les dépositaires et garantissaient la cohésion du système. Cette situation eut de lourdes conséquences surtout dans les territoires sous administration belge, qui allaient devenir le Rwanda et le Burundi.

DE L'ORIGINE DES CONFLITS AU RWANDA

Avant la colonisation, ces deux royaumes étaient dirigés par des lignages Tutsi, et les Belges les maintiennent au pouvoir : ils sont considérés comme de lointains descendants de pasteurs migrants chamitiques venus des marges de l'Éthiopie ou de la vallée du Nil, supérieurs en race et en civilisation, car d'origine blanche ou méditerranéenne. Les colons les assimilent à une élite, au détriment des autres catégories de la population, Hutu et Twa. Bien qu'ils aient les mêmes caractères linguistiques et culturels que les Hutu, leur origine chamitique a longtemps été un dogme bien ancré. Les premiers doutes sont apparus à la fin des années 1950, notamment après les travaux de l'anthropologue français Jean Hiernaux. Formé à la typologie du squelette, Jean Hiernaux a été l'un des premiers anthropologues sur le ter-

rain à utiliser les groupes sanguins pour les confronter aux classifications anciennes. Or, durant quelques années, héritier de la raciology antérieure, à laquelle il adhère pleinement, on le voit tenter d'adapter à tout prix ses conclusions aux conceptions établies. Cela est encore possible au début des années 1950, car les connaissances sur les marqueurs sanguins sont encore balbutiantes, mais les connaissances progressent et le doute s'installe : les Tutsi sont génétiquement identiques aux autres Africains de la région, notamment aux Hutu. Toutefois, cette identité ne deviendra explicite qu'au moment de l'indépendance de ces territoires. Dès les élections de 1959, qui ont porté au pouvoir un parti hutu, les Tutsi rwandais fuient le pays par milliers. Jusqu'au génocide de 1994, les membres du parti hutu ont considéré les Tutsis comme des envahisseurs étrangers, des « Blancs en puissance », et ces thèmes ont largement alimenté la propagande raciste appelant au meurtre et à l'extermination.

Cet exemple illustre l'étroite dépendance de l'anthropologie biologique et du contexte politique, et la trop grande part de l'imaginaire dans les reconstructions de l'histoire lointaine. Elle montre la nécessité d'une critique fondamentale, historique et méthodique des travaux passés et présents, et du contexte qui les a produits. Les conclusions souvent erronées de ces travaux constituent l'une des assises sur lesquelles se sont construites les identités des peuples africains, des nations et des minorités ethniques.

Aujourd'hui, certains intellectuels africains, américains d'origine africaine ou antillais publient des thèses sur l'histoire de l'Afrique. Elles représentent une révision de l'histoire en réaction à l'histoire raciale écrite par les Blancs, en d'autres temps. Selon ces thèses, confortées par la théorie de l'Ève africaine, l'humanité, à l'origine noire, aurait peuplé le monde et engendré les premières grandes civilisations de l'Antiquité – l'Égypte en tout premier lieu qui a influencé le monde hébreu et grec. Ces thèses ont redonné confiance aux communautés noires dans leurs capacités et dans leurs destinées. Toutefois, par un mécanisme de balancier, elles ont tendance à construire l'identité de ces communautés par opposition aux Blancs en conservant un antagonisme qui s'est toujours révélé excessif.

Agnès LAINÉ est chercheur associée au Centre de recherches africaines, CNRS-UPRESA 8054, dans l'équipe Mutations africaines dans la longue durée.



Alerte à la listériose

HERVÉ THIS

Les alertes alimentaires témoignent des progrès de la microbiologie.

Les cas de listériose sont dramatiques. Peuvent-ils être évités ? Les accidents, parfois mortels, sont d'autant plus choquants que l'hygiène publique n'a jamais été aussi bonne. Toutefois cette sécurité est trompeuse, et des accidents surviennent chez les personnes fragiles, constituant les groupes à risque : les femmes enceintes, les personnes âgées, les jeunes enfants et les personnes immunodéprimées. Tandis que les alertes sont déclenchées à la suite d'enquêtes épidémiologiques rétrospectives, par une comparaison de souches isolées des victimes et des produits incriminés, le travail de fond des microbiologistes débouche progressivement sur une meilleure connaissance des *Listeria* et des autres micro-organismes de l'alimentation.

La première étude, la plus urgente, est l'identification des souches pathogènes. C'est seulement quand on les connaît que l'on peut identifier les populations à risques, puis tester les aliments commercialisés. Au laboratoire INRA de pathologie infectieuse et immunologie de Nouzilly, Patrick Pardon et ses collègues étudient la virulence des *Listeria*. Les souches isolées dans les filières agro-alimentaires ont des pathogénicités variables. Comment distinguer les souches dangereuses de celles qui ne

le sont pas ? Ces dernières années, les microbiologistes avaient déjà appris à distinguer deux types de *Listeria* : les *Listeria monocytogenes*, considérées comme toujours pathogènes, et les *Listeria innocua*, inoffensives. Toutefois même cette classification affinée (qui a évité des alertes intempestives) restait insuffisante. Les techniques actuelles ne permettent pas de caractériser la virulence exacte des diverses souches.

De surcroît, la virulence des souches était naguère étudiée sur des animaux de laboratoire (principalement des souris) à qui on inoculait les micro-organismes que l'on voulait tester. Toutefois la méthode est longue, coûteuse (elle impose l'entretien d'animaleries) et son usage est injustifiable quand d'autres méthodes sont validées. Les microbiologistes de Nouzilly mettent aujourd'hui au point un test *in vitro*, qui utilise les cellules faisant office de porte d'entrée dans l'organisme : les cellules intestinales humaines. Pour tester la pathogénicité d'une souche bactérienne, on dépose une suspension de ces bactéries sur une culture de telles cellules, et l'on observe l'apparition de trous dans le tapis cellulaire, en fonction de la dose de bactéries utilisées.

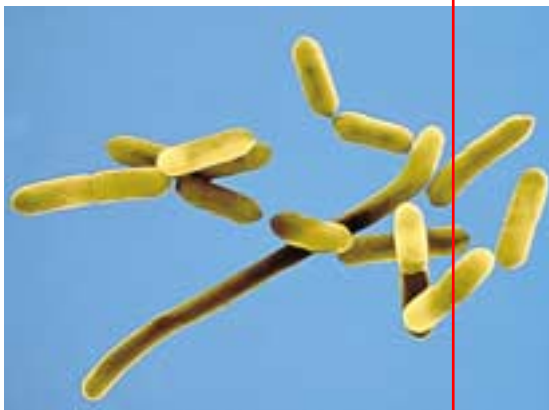
Lors de la validation de ce test, les biologistes ont confirmé que le groupe *Listeria monocytogenes* n'est pas homogène : certaines souches sont peu ou pas virulentes (les résultats ont été confirmés sur des animaux de laboratoire), ce qui a conduit à une poursuite de l'étude par des analyses du génome et des protéines de ces bactéries. Un programme national sur trois ans est maintenant lancé : plusieurs équipes passent en revue une banque d'environ 400 souches de *Listeria monocytogenes*. Afin d'affiner ultérieurement la détection des souches pathogènes, les

gènes et les protéines des souches peu ou pas virulentes seront comparées à ceux de souches très virulentes.

Le travail s'accompagnera d'une recherche des diverses souches dans les filières alimentaires ; on veut identifier quels produits et quelles méthodes conduisent aux souches pathogènes, et quelles fabrications sont susceptibles de produire des *Listeria* dangereuses : on identifiera les taux d'humidité, les températures, les acidités, les durées de conservation qui sont associées à un risque de contamination, afin de perfectionner les autocontrôles industriels (obligatoires et d'une fréquence qui dépend des produits) ou les contrôles effectués par les services officiels.

La publication des informations parmi les fabricants et les consommateurs inquiète. Elle s'impose, parce qu'elle prévient des accidents, en conduisant au retrait d'aliments contaminés, mais il n'empêche que le choix du type de nourriture suscite une interrogation sociale. Certaines nourritures présentent plus de dangers que d'autres. Faut-il les interdire ? Selon P. Pardon, l'objectif n'est certainement pas d'interdire la vente de produits où des *Listeria* risquent d'apparaître – on ne privera pas la France de ses rillettes ni de ses fromages au lait cru – mais de mettre en garde les populations à risques : on ne laisse des enfants traverser seuls une rue que s'ils ont été avertis des risques et des précautions à prendre. De surcroît, le résultat serait dramatique pour l'industrie alimentaire, et aussi pour le goût du public, qui risquerait de s'approvisionner en produits interdits par des voies parallèles moins sûres.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le lundi 28 février 2000, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Les bactéries *Listeria* ne sont pas toutes dangereuses.

Un nouveau Maglev

Des aimants permanents pour faire léviter un train.

L'avatar moderne du tapis volant est le *Maglev*, le train qui lévite grâce à des forces magnétiques. Dans les années 1970 et 1980, l'Allemagne et le Japon en ont construit des prototypes, mais ces systèmes sont restés beaucoup plus coûteux que les trains à grande vitesse français. Au Laboratoire Lawrence Livermore, le physicien Richard Post et ses collègues relancent l'idée, avec un nouveau principe de sustentation magnétique plus stable et meilleur marché.

Le *Maglev* japonais utilisait un équipement cryogénique coûteux, embarqué, pour refroidir les aimants supraconducteurs à la température de cinq kelvins (-268°C). Le *Maglev* allemand utilisait des électro-aimants classiques, mais le système était instable, parce qu'il était fondé sur une attraction constante des rails et du train. De surcroît, chaque wagon devait être équipé de capteurs et de circuits de rétroactions, qui détectaient en temps réel la distance entre les électro-aimants des wagons et les rails, afin d'ajuster les forces magnétiques nécessaires à la sustentation.

Au Laboratoire Lawrence Livermore, le nouveau dispositif provient de recherches sur des batteries pour voitures et pour camions : les physiciens avaient étudié le stockage de l'énergie sous forme cinétique de rotation dans un volant d'inertie, dont ils réduisaient les frottements en remplaçant les classiques roulements à billes par des paliers magnétiques en sustentation. Ils ont compris qu'on pourrait dérouler leurs systèmes afin de créer un nouveau type de sustentation pour train.

Le dispositif obtenu, nommé *Indutrack*, ne comporte ni aimant supraconducteur, ni électroaimant : les patins des wagons sont une enfilade d'aimants permanents classiques, disposés alternativement dans la direction des rails et dans la direction perpendiculaire (voir la figure). Quand les aimants sont ainsi disposés en «réseaux de Hallbach» (du nom de leur inventeur, Klaus Hallbach), les lignes de champ magnétique se renforcent sous le réseau, tandis qu'elles s'annulent, au-dessus.

Les rails, d'autre part, sont composées d'une série de bobines de fil conducteur ; chaque



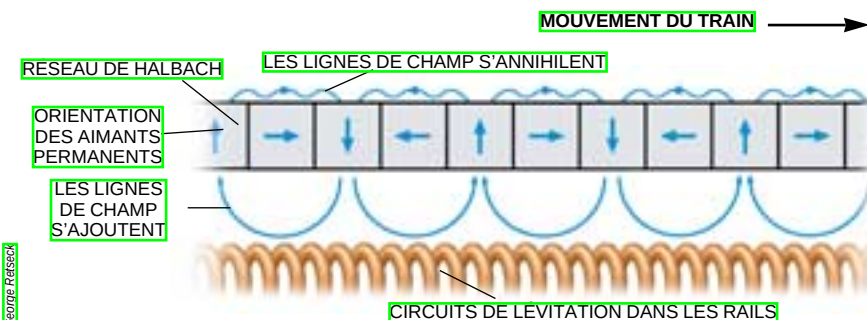
Le prototype du train à sustentation magnétique américain.

bobine est fermée. L'*Indutrack*, comme son nom l'indique (*track* signifie «rail», en anglais) exerce une force de lévitation parce que les aimants permanents embarqués, quand ils sont en translation au-dessus des bobines des rails, y «induisent» des courants électriques ; ces courants induits engendrent alors un champ magnétique qui repousse le réseau d'aimants. Le champ magnétique agit ainsi comme un ressort comprimé : la force de lévitation augmente exponentiellement quand la distance diminue, de sorte que l'*Indutrack* est stable, sans

circuits de contrôle. Les physiciens ont calculé que l'*Indutrack* serait suffisant pour repousser le train à quelques centimètres au-dessus des rails dès les vitesses supérieures à la vitesse d'un homme qui marche.

Ayant perfectionné ce principe, les physiciens américains ont fabriqué un petit prototype et, sur 20 mètres de rails, ils ont fait léviter un chariot pesant 22 kilogrammes. Au départ, le chariot roulait sur des roues rétractables, qui l'ont accéléré jusqu'à une vitesse de 40 kilomètres à l'heure ; puis, à cette vitesse, le chariot a levité et fait la preuve de ses performances.

Un train équipé de ce système coûterait un tiers de moins que le *Maglev* allemand ; il resterait de construction plus coûteuse qu'un train à grande vitesse, mais l'énergie consommée pour le propulser serait bien inférieure à celle d'un train classique. Tandis que des équipes étudient ce projet de train, la NASA envisage d'utiliser l'*Indutrack* pour accélérer des fusées sur une rampe inclinée, jusqu'à 0,8 fois la vitesse du son ; les moteurs des fusées prendraient alors le relais, ayant économisé leur carburant.



Dispositif de lévitation mis au point au Laboratoire Lawrence Livermore.

Les plus anciens vertébrés connus...

... sont des poissons chinois datant de 540 millions d'années.

L'histoire des principaux groupes d'animaux est suivie au travers des découvertes fossiles jusqu'au début de l'ère primaire, au Cambrien (de 480 à 550 millions d'années). Hélas, les gisements fossilifères aussi anciens sont rares. L'un des plus connus est celui du schiste de Burgess, au Canada, qui a livré les restes pétrifiés d'éponges, d'arthropodes, d'échinodermes, de possibles céphalocordés, etc. Ce gisement, ainsi que celui de Chengjiang, en Chine, que nous évoquons ici, montrent qu'il existait déjà une grande diversité d'animaux pluricellulaires au Cambrien inférieur et moyen.

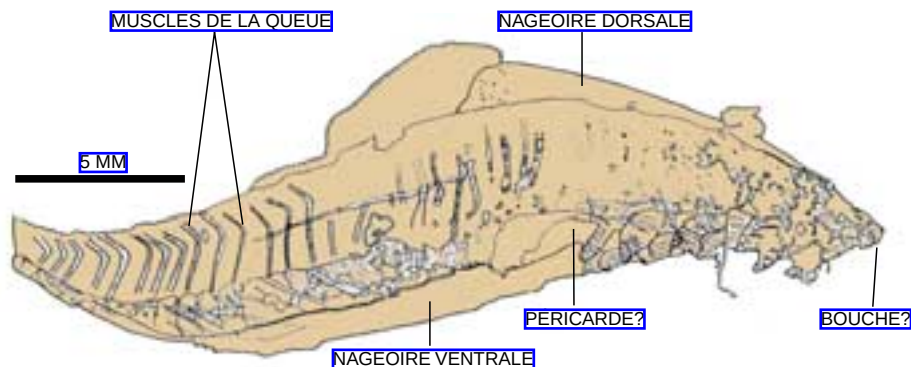
Jusqu'en 1999, un des grands groupes semblait pourtant absent de cette «explosion cambrienne» : les vertébrés. Cet embranchement, dont l'espèce humaine fait partie, était connu avec certitude depuis l'Ordovicien (de 435 à 480 millions d'années). Quelques restes, parmi lesquels des euconodontes, petits fossiles en forme de denticules, dont la parenté est longtemps restée mystérieuse et qui sont aujourd'hui rapprochés des vertébrés, et de petits fragments de carapaces ont été trouvés dans des roches du Cambrien supérieur. Toutefois, les relations de parenté entre ces organismes et les vertébrés sont objet de controverses et ne nous donnent pas d'image précise des premiers poissons.

La situation a évolué grâce à une publication récente, dans la revue *Nature*, de deux chercheurs, chinois et anglais, où sont décrites deux nouvelles espèces de vertébrés provenant du Cambrien inférieur de Chine (~540 millions d'années). La localité fossilifère, Chengjiang, dans le

Yunnan, avait déjà livré d'exceptionnels fossiles dont les tissus mous avaient été partiellement préservés. De probables chordés primitifs, un large groupe qui comprend les vertébrés et l'amphioxus, un petit animal en forme de ver, avaient été signalés dans ce gisement. Cette fois, les nouveaux fossiles découverts se sont révélés être ceux de véritables vertébrés ; il s'agit de deux petites empreintes de moins de trois centimètres de long, où les structures anatomiques apparaissent sous forme de légères traces dans le sédiment. On y observe les muscles de la queue constituant des ensembles en forme de zigzag, un crâne apparemment cartilagineux, des arcs branchiaux, un cœur de grande taille, peut-être enfermé dans un péricarde, et, sur un des deux spécimens au moins, des rayons soutenant les nageoires, autant de caractères typiques des vertébrés.

Comme c'est souvent le cas quand on découvre des fossiles d'espèces très primitives, certains des détails observés sur les deux nouveaux poissons soulèvent des questions inopinées. La première des deux espèces, *Mylokunmingia fengjiaoa*, ou «le joli poisson de Kunming», montre apparemment une double nageoire ventrale en forme de ruban, alors que les paléontologues supposaient jusqu'alors que cet organe était apparu bien plus tard dans l'évolution des poissons. La seconde espèce, *Haikouichthys ercaicunensis* (son nom fait référence à deux localités proches du lieu de la découverte) présente des rayons soutenant sa nageoire dorsale qui sont étrangement orientés vers l'avant, alors qu'ils sont généralement orientés vers l'arrière chez les autres poissons (voir les deux figures). Est-ce une spécialisation propre à cette espèce, un caractère primitif des vertébrés ou une déformation *post mortem*?

L'extrême rareté des fossiles de vertébrés dans le gisement de Changjiang par rapport aux autres organismes indique que ces petits poissons étaient probablement capables de nager pour échapper aux coulées de boue qui ont recouvert les organismes avant leur fossilisation.



BRÈVES

Une pléiade de pommes de terre

À la fin du mois de juin, les villageois du Pérou et de Bolivie scrutent le ciel, et particulièrement l'amas des Pléiades, dans la constellation du Taureau. Plus la luminosité de ces étoiles est faible, plus la plantation des pommes de terre, sensibles à la sécheresse, est retardée. Superstition? Non, empirisme que des climatologues de l'Université de Columbia ont confirmé en comparant la couverture nuageuse au-dessus des Andes, l'abondance des récoltes, les précipitations et les oscillations climatiques dues au phénomène El Niño : pendant les années de sécheresse, les nuages d'altitude sont plus nombreux : presque invisibles, ils diminuent néanmoins la visibilité des Pléiades.



La solitude du trou noir

À l'aide du télescope spatial *Hubble*, enfin réparé, les astronomes ont découvert le premier trou noir isolé. Jusqu'ici, tous les trous noirs connus étaient dans des systèmes doubles. Ainsi, conformément aux théories stellaires, les trous noirs n'auraient pas besoin d'interaction avec un compagnon pour se former. Lors de leur formation, ces trous noirs solitaires sont éjectés à grande vitesse et passent devant quantité d'étoiles. C'est un effet de microlentille gravitationnelle due au passage du trou noir devant une étoile, qui se trouve alors momentanément plus lumineuse, qui a permis cette découverte. La chasse aux trous noirs solitaires est ouverte. Dans quelle mesure contribuent-ils à la matière noire de notre Galaxie?

Les hormones du père

Au cours des neuf mois que dure sa grossesse, une future mère subit des transformations hormonales notables, mais... le futur père aussi. Chez la future mère, les concentrations sanguines en prolactine, qui déclenchera la lactation, en cortisol, qui favorise l'instinct maternel, et en œstradiol, hormone femelle, augmentent, pour diminuer après la naissance. L'étude de prélèvements sanguins de futurs pères a révélé que les concentrations hormonales évoluent aussi au cours de la grossesse de leur compagne : moins, mais dans le même sens. La testostérone chute notablement après la naissance. Est-ce un signe du renforcement du comportement paternel?

Des traces moléculaires

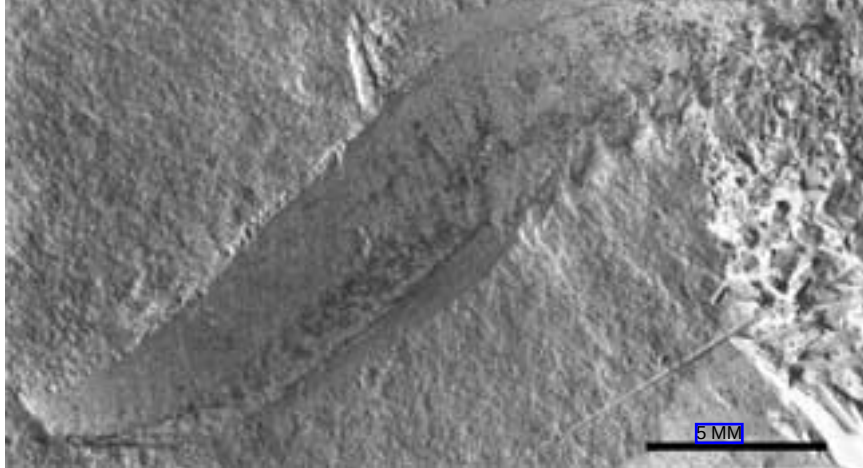
Selon des archéologues de l'Université de Philadelphie, les convives du banquet funèbre de Midas, roi de Phrygie au VIII^e siècle avant notre ère, avaient bon appétit. En analysant les traces de molécules organiques présentes sur la vaisselle retrouvée dans la tombe du roi malmené par les légendes, ils ont reconstitué le menu : la nature et la quantité des triglycérides et des acides gras saturés et insaturés indiquent une viande de mouton et de chèvre grillée, désossée avant d'être assaisonnée. Dans les verres, l'acide tartrique, l'oxalate de calcium et la cire d'abeille attestent un mélange fermenté de raisin, de bière d'orge et d'hydromel, le *kykeon*.

Remède de grand-mère

L'huile de foie de morue a été une panacée pendant des décennies. Si les enfants qui l'ingurgitaient avec dégoût avaient connu ses vertus, la cuillerée aurait été plus facile à avaler. Une équipe anglaise vient de montrer que l'huile de foie de morue contient des substances qui inhibent la douleur et les phénomènes inflammatoires liés à l'arthrite ; l'huile contient des acides gras qui lui sont spécifiques et qui inhibent l'activité de certaines enzymes dans le cartilage, notamment d'une enzyme responsable de la synthèse de substances inflammatoires et qui entretiennent la douleur. Heureusement, aujourd'hui l'huile de foie de morue est disponible sous forme de comprimés.

Clonage d'un primate

Le premier primate cloné, un petit singe rhésus, vient de naître. C'est une femelle, nommée Tétra, qui est en bonne santé. D'autres mammifères ont déjà été clonés, notamment des souris et la brebis Dolly, mais Tétra est plus proche de l'homme. Elle a été obtenue à partir d'un embryon de huit cellules qui ont été disloquées mécaniquement. Chaque groupe de deux de ces cellules a été introduit dans un œuf dépourvu de son contenu, lequel a été implanté sur une mère porteuse. Deux des quatre embryons identiques se sont implantés, mais seul un jeune a vu le jour. Même si le taux de réussite est assez faible, cette méthode donnera des modèles animaux très proches de l'homme, qui permettront de combler le fossé qui sépare la souris transgénique de l'homme malade.



Les poissons forment un ensemble hétérogène de vertébrés. Aujourd'hui, la majorité d'entre eux est classée dans le groupe des gnathostomes, les vertébrés à mâchoires. Les seules exceptions sont les myxines et les lamproies, qui ont une bouche sans mâchoire articulée, et constituent le groupe primitif des agnathes. À l'ère primaire, les agnathes étaient beaucoup plus abondants et diversifiés qu'aujourd'hui, et c'est sans surprise que les deux petits poissons chinois entrent dans ce groupe. Or l'étude plus précise des relations de parentés montre qu'une de ces deux formes, *Haikouichthys ercaicunensis*, serait plus proche des lamproies que de n'importe quel autre type de poissons. Ce résultat étonnant indique que le groupe des lamproies se serait individualisé extrêmement tôt dans

l'histoire des poissons et, par conséquent, que l'origine commune de l'ensemble des vertébrés est à rechercher encore plus loin dans le passé. Mais des organismes aussi anciens, dépourvus de squelette ou de carapace dure propice à la fossilisation, sont extrêmement rares.

On connaît quelques gisements fossilifères du Précambrien supérieur, notamment celui d'Édiacara, en Australie, où des organismes très étranges ont été décrits. Le malheur pour le paléontologue est qu'aucun d'entre eux n'a été actuellement reconnu comme un ancêtre possible des vertébrés. L'image de cet ancêtre est pour l'instant une construction de l'esprit, une sorte de chimère alliant des caractères de larve de lamproie et d'amphioxus.

Lionel CAVIN

Connectique neuronale

Outre les connexions entre relais visuels, des connexions silencieuses «horizontales» modulent en permanence l'activité du cortex.

Comment naît la perception ? Dans son *Traité de l'Homme*, René Descartes imagine que les organes des sens, notamment la rétine, dans le cas du système visuel, se projettent «verticalement», par l'intermédiaire de relais cérébraux, jusqu'au siège ultime de la perception visuelle. La formation d'une image neuronale se ferait par une projection ordonnée respectant, à chaque étape du traitement, l'ordre défini dans la rétine.

Au contraire, d'autres philosophes envisagent un mécanisme collectif, réparti dans l'écorce cérébrale sensorielle, et résultant de la comparaison et de la sommation «horizontale» d'activités locales. De cette façon, le système visuel reconnaît un objet quel que soit la localisation

de son image sur la rétine. Yves Frégnac et ses collègues de l'Équipe Cognisciences, à l'Institut Alfred Fessard, au CNRS de Gif-sur-Yvette, qui étudient *in vivo* les mécanismes cellulaires responsables du traitement des informations sensorielles, ont mis en évidence qu'au cours de la perception visuelle, ces deux processus coexistent. La stimulation d'un point de la rétine active une région précise du cortex, puis donne lieu à une vague d'activation qui se propage dans le cortex et qui autorise l'établissement de relations privilégiées entre des neurones analysant des régions éloignées du champ visuel.

Lorsque le cerveau s'ouvre au monde visuel afin de restituer son environnement, il analyse les informations issues de milliers d'images passant simultanément à travers des filtres qui sélectionnent, les uns la couleur, les autres la forme, l'orientation ou encore la texture. Chacune de ces caractéristiques est à son tour subdivisée selon des critères plus précis : pour la détection de la forme, certains neurones sont sélectivement activés par l'orientation particulière d'un contour (verticale, horizontale ou oblique). Ce sont les neurones du cortex visuel

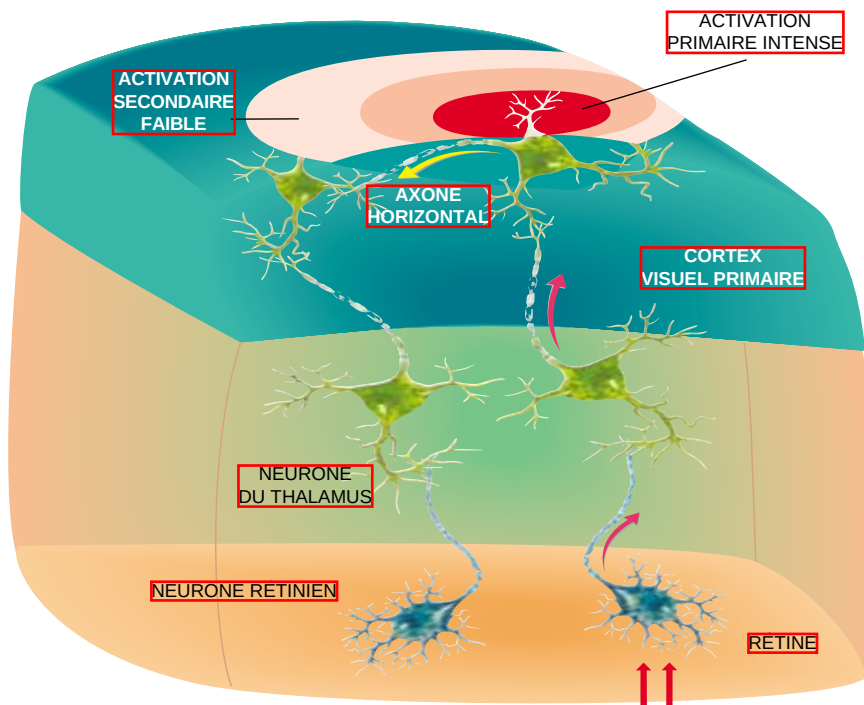
primaire, qui sont responsables de cette décomposition sélective et qui codent les différents attributs visuels d'une image.

Quel est le chemin suivi par une information visuelle au sein du cerveau ? Toute image qui parvient à l'œil est captée par la rétine, laquelle traduit les photons en un message nerveux. Ce message, constitué par des signaux électriques, nommés potentiels d'action, émis par les cellules ganglionnaires de la rétine, se propage le long du nerf optique et parvient, après un passage dans le thalamus, jusqu'aux aires visuelles primaires du cortex, en se transmettant de neurone à neurone par les synapses (les connexions entre neurones).

Le cortex lui-même comporte plusieurs couches de neurones ; chaque neurone ne transmet qu'une brique de l'information, caractéristique du groupe dont il fait partie (et qui est dédié à la détection d'un trait ou d'une orientation, ou à l'extraction d'un contour sur le fond, par exemple). L'ensemble des neurones corticaux concernés par un caractère commun (la détection de l'orientation, par exemple) forme une colonne. Ainsi, à chaque point de la rétine, sont associés une zone corticale et un ensemble de colonnes, dont chacune traite un caractère spécifique. De surcroît, par l'intermédiaire de leurs axones (les longs prolongements issus des corps cellulaires et le long desquels les potentiels d'action sont propagés jusqu'aux terminaisons synaptiques), les neurones d'une colonne établissent aussi des liens à longue distance avec des neurones du cortex visuel primaire qui ont des compétences fonctionnelles voisines, et qui fournissent le cadre visuel global à l'information traitée localement.

EXCITATIONS ET RUMEURS

Pour visualiser l'action du réseau global sur un neurone, les physiologistes de Gif-sur-Yvette sélectionnent, dans les aires corticales visuelles primaires de vertébrés, un neurone cortical analysant la fovea (la zone centrale de la rétine) ; ils observent *in situ* les réactions de ce neurone à la lumière, au moyen d'électrodes implantées dans le cortex cérébral. Les unes pénètrent dans le corps cellulaire du neurone et mesurent les signaux électriques résultant d'une excitation supérieure à un certain seuil. Les autres électrodes adhèrent à la membrane du corps cellulaire ou d'une dendrite, et détectent des courants très faibles qui reflètent la «rumeur synaptique» de l'ensemble du réseau. L'influence du réseau est généralement insuffisante pour déclencher un potentiel d'action dans la cellule étudiée : le



Lorsqu'un stimulus active un neurone de la rétine, le signal est transmis au thalamus, puis au cortex visuel primaire. Cette activation (flèches rouges) résulte en une projection point par point qui respecte l'arrangement topographique rétinien. L'information se propage alors (flèche jaune) au sein du cortex par le biais d'axones «horizontaux» qui se prolongent dans les couches du cortex. Les liaisons horizontales permettent de lier les informations provenant d'objets spatialement éloignés.

réseau reste «silencieux», mais il est en état de veille.

Y. Frégnac et ses collègues ont ainsi établi des cartes d'activation visuelle qui montrent les diverses zones du champ visuel (donc de la rétine) qui agissent sur le neurone observé. Le champ récepteur de chaque neurone englobe la zone de la rétine où l'application d'un stimulus déclenche un potentiel d'action, ainsi qu'une zone périphérique silencieuse, où l'on observe des fluctuations de faible amplitude du potentiel de membrane, qui ne déclenchent aucun potentiel d'action. Ces régions «silencieuses» autour du champ de décharge modulent le potentiel de membrane du neurone étudié, d'autant plus qu'elles en sont proches. Ces modulations prennent naissance dans le cortex et sont transmises par des axones corticaux.

Quand la valeur du signal global résultant de ces modulations est supérieure au seuil de réaction du neurone, le réseau autorise le renforcement de la réaction et une salve de potentiels d'action se déclenche ; au contraire, quand la valeur du signal global reste inférieure à ce seuil, il n'y a pas d'émission de potentiel d'action. Les différentes expériences de l'équipe de Gif-sur-Yvette sont les premiers travaux d'électro-physiologie qui démontrent, *in vivo*, au niveau synaptique, l'existence d'une activité sensorielle silencieuse, liée à des connexions

locales et/ou horizontales dans le cortex visuel, qui module la décharge des neurones corticaux.

Ainsi, l'intervention du réseau confère à chaque neurone un champ d'activation beaucoup plus étendu qu'on ne le soupçonnait. Cette coopération des neurones corticaux opérant de concert laisse espérer des voies thérapeutiques qui pallieraient les déficits profonds dus à des atteintes rétinienues. Lorsque les neurones du cortex sont privés des liaisons directes verticales, comme dans le cas de la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) qui inactive la transmission des informations issues du centre de chaque rétine, la collecte horizontale constitue la seule source d'informations pour les neurones corticaux qui analysent normalement cette région ; encore faut-il que cette information soit efficace, c'est-à-dire qu'elle déclenche un signal. Dans la mesure où les neurones sont dotés d'une certaine plasticité, on peut espérer qu'un jour, des techniques d'apprentissage performantes chez les personnes atteintes de dégénérescence maculaire liée à l'âge permettront une activation préférentielle de certaines voies horizontales et restaureront l'activité des neurones fonctionnellement déconnectés en leur permettant d'analyser les informations en provenance de la bordure de la zone dégénérative.

Marie-Thérèse Landousy

Du nouveau contre le prion

On ne dispose encore d'aucun traitement de la maladie de Creutzfeldt-Jakob, ni de sa nouvelle forme qui serait due à la consommation de viande contaminée par la maladie de la vache folle. La maladie serait due à la transformation irréversible d'une protéine anodine en une protéine pathogène. Pourtant, des équipes européennes et américaines ont réussi, sur des cultures de cellules, à rendre à une protéine PrP anormale une structure et une activité biochimique comparables à celles de la protéine normale. Pour ce faire, ils ont utilisé une petite molécule (un peptide) qui rompt certaines liaisons intramoléculaires. De surcroît, quand ils ont injecté ce peptide à des souris malades, ils ont ralenti le développement de la maladie et diminué notablement le pouvoir infectieux de la protéine pathogène.

Le réchauffement menace les ours

Les ours polaires risquent de mourir de faim à cause des changements climatiques qui réduisent la superficie de la banquise. La saison des glaces, notamment dans certaines régions du Canada, dure trois semaines de moins qu'il y a 20 ans. Or, les ours se nourrissent principalement des phoques qui vivent sur la banquise : ils ont moins de temps pour chasser, perdent du poids, et les femelles ont moins de petits. Les gaz à effet de serre, surtout le gaz carbonique, sont responsables de la fonte des glaces. Ils ont entraîné une hausse des températures moyennes des océans de 0,6 degré depuis le début du XX^e siècle. Si ce réchauffement se poursuit, la surface de la banquise se réduira encore et la menace qui pèse sur les ours polaires se renforcera.



Abeilles mitées

Jusque dans les années 1950, les abeilles européennes vivaient tranquilles. Puis, les acariens parasites *Varroa jacobsoni* sont arrivés du Sud-Est asiatique, introduisant avec eux un virus fatal aux abeilles. Devant l'inefficacité des pesticides employés (ils donnent mauvais goût au miel et les mites y sont de plus en plus résistantes), des mathématiciens anglais ont entrepris de modéliser les interactions des deux espèces d'insectes en l'absence d'intervention humaine. Ils espèrent ainsi déterminer l'état d'équilibre – s'il existe – des deux populations : les apiculteurs jugeront alors d'agir, ou à l'inverse, de laisser la nature suivre son cours.

Tomographie atmosphérique

Comment corriger les effets des perturbations atmosphériques pour tout le ciel?

En été, sur une route chauffée par le soleil, observez les voitures qui arrivent au loin : leur image est floue, déformée par les perturbations de l'atmosphère. Similairement, les perturbations atmosphériques altèrent l'observation astronomique. Comment les corriger? En déformant les miroirs de télescope par une technique d'optique adaptative. Une équipe d'astronomes italo-espagnols vient de tester une nouvelle méthode d'optique adaptative qui, contrairement aux méthodes classiques, est applicable à l'intégralité du ciel.

En théorie, la résolution d'un télescope, c'est-à-dire la taille des plus petits détails discernables, est limitée par la tache de diffraction. Pour un télescope, c'est environ le rapport de la longueur d'onde d'observation et du diamètre du télescope. En pratique, la résolution est moins bonne que cette limite, car les mouvements d'air de l'atmosphère altèrent la qualité de l'image.

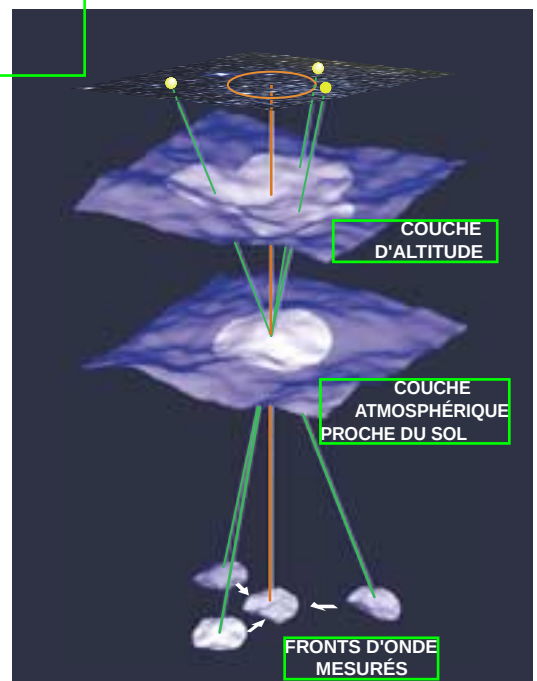
Pour limiter ces perturbations, les astronomes placent leurs télescopes sur des montagnes : non pas pour se rapprocher des étoiles, mais parce que l'air est moins sujet aux perturbations. Le ciel que l'on observe au sommet des volcans d'Hawaii, à plus de 4 000 mètres d'altitude, est ainsi réputé pour être le meilleur du monde : le *seeing*, c'est-à-dire la taille des perturbations dues aux turbulences peut être, par temps calme, meilleur que 0,5 seconde d'angle. Cela reste près de 30 fois supérieur à la résolution théorique d'un télescope de huit mètres de diamètre qui observe à une longueur d'onde de 0,5 micromètre, dans le visible. Comment aller au-delà, ou comment améliorer la résolution dans les zones où le *seeing* n'est pas aussi bon? Grâce à l'optique adaptative.

L'optique adaptative corrige les perturbations atmosphériques en modifiant la forme du miroir à l'aide de petits vérins commandés par ordinateur. Pour

corriger ces perturbations, encore faut-il les connaître. En principe, c'est possible grâce à des étoiles guides, des étoiles brillantes dont on connaît l'image qu'elle devrait former en l'absence de perturbation. En surveillant les déformations de l'image de ces étoiles, on déduit les déformations dues à cette turbulence. Ainsi, on corrige en temps réel la forme du miroir, de sorte que l'image des étoiles voisines de ces étoiles guides est corrigée.

Malheureusement, ces compensations de l'image ne s'appliquent qu'à des régions situées très près des étoiles guides : on estime que moins de un pour cent de la partie du ciel au voisinage d'une étoile brillante bénéficie de l'optique adaptative. De surcroît, même dans le voisinage immédiat de ces étoiles guides, la correction n'est pas uniforme.

L'une des manières de pallier cette difficulté consiste à créer des étoiles artificielles à l'aide de lasers. En éclairant les couches supérieures de l'atmosphère à une longueur d'onde adéquate, la lumière laser excite des atomes de sodium, qui s'y trouvent ; ceux-ci qui se dés excitent en émettant de la lumière, créant une étoile artificielle. Malgré la difficulté de mise en œuvre de ces techniques, notamment l'obtention de lasers suffisamment puissants à des coûts raisonnables, plusieurs systèmes d'optique



La lumière des étoiles est perturbée par la turbulence de toutes les couches de l'atmosphère. On a ici représenté deux couches, l'une près du sol et l'autre en haute altitude. En observant la lumière de trois étoiles situées à proximité de la ligne de visée du télescope (lignes vertes), on obtient trois mesures de la déformation du front d'onde, à partir desquelles on reconstruit la perturbation dans la direction de la ligne de visée (ligne rouge), où aucune étoile de référence n'est présente.

adaptative muni de petits lasers ont démontré la faisabilité de la technique.

Si, à terme, l'utilisation d'une étoile guide artificielle permettait d'étendre l'utilisation de l'optique adaptative à l'ensemble du ciel, elle n'éliminerait pas la dégradation de la correction lorsque l'on s'éloigne de l'étoile guide. L'optique adaptative tomographique résout ce problème. Alors qu'avec les systèmes d'optique adaptative classique, un seul miroir est déformé afin de compenser les distorsions de la lumière en provenance d'une unique étoile guide, dans l'optique adaptative tomographique, plusieurs miroirs sont déformés afin de corriger la turbulence atmosphérique dans les trois dimensions. Cette technique compense de manière uniforme la turbulence sur un champ de vue bien supérieur à celui qui est obtenu avec les techniques classiques.

La méthode requiert des mesures de distorsion optique de plusieurs étoiles guides (naturelles ou artificielles), chacune fournissant une mesure de la turbulence dans une direction différente. En utilisant trois étoiles guides dans la constellation de l'Aigle, les astronomes de l'équipe italienne ont obtenu une image de très bonne qualité de la partie du ciel située entre les trois étoiles. Cette approche tomographique a ainsi permis de corriger 92 pour cent des perturbations atmosphériques. L'obtention d'une résolution égale à la limite de diffraction pour l'ensemble du ciel est maintenant envisageable.

Pour un télescope de huit mètres de diamètre, un système avec trois miroirs déformables et cinq étoiles guides multiplierait par un facteur supérieur à dix la surface du champ de vue compensé par rapport au système d'optique adaptative classique et améliorerait considérablement l'uniformité de la correction sur ce champ de vue. Les miroirs et les capteurs optiques sont au point. Deux difficultés retarderont l'adoption immédiate de ce système : les lasers ne sont pas encore adaptés, et les calculs en temps réel nécessaires à la tomographie atmosphérique sont encore 15 fois trop lents, mais les progrès sont prometteurs.

La tomographie atmosphérique pourrait être une technique importante pour les très grands télescopes d'une surface équivalente à celle d'un télescope de 30 mètres, voire de 100 mètres de diamètre, dont les principes sont aujourd'hui envisagés. Si, comme on le pressent, la séparation angulaire entre étoiles guides augmente avec la taille du télescope, un télescope de 100 mètres de diamètre n'aura même plus besoin d'étoiles artificielles pour profiter de la tomographie atmosphérique, mais pourra utiliser des étoiles naturelles.

Les ingrédients de la vie sur Mars ?

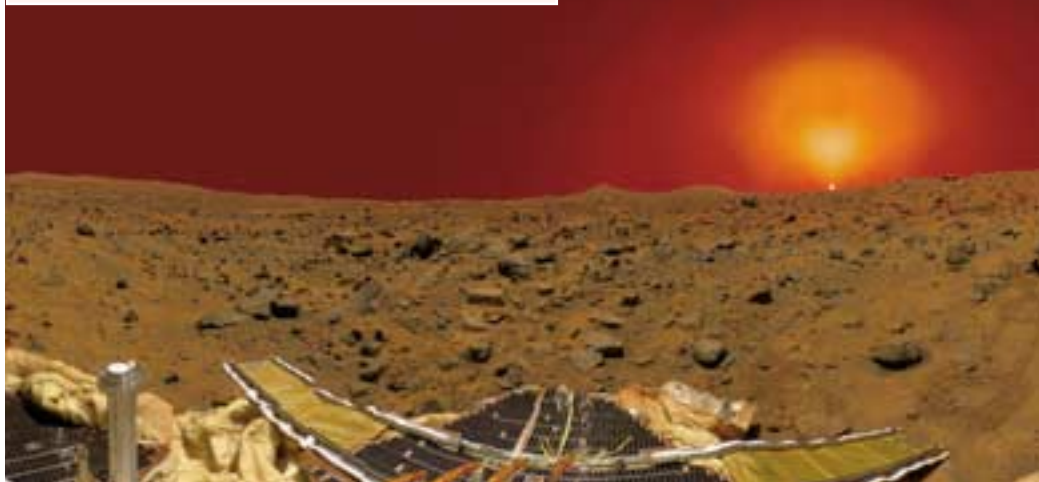
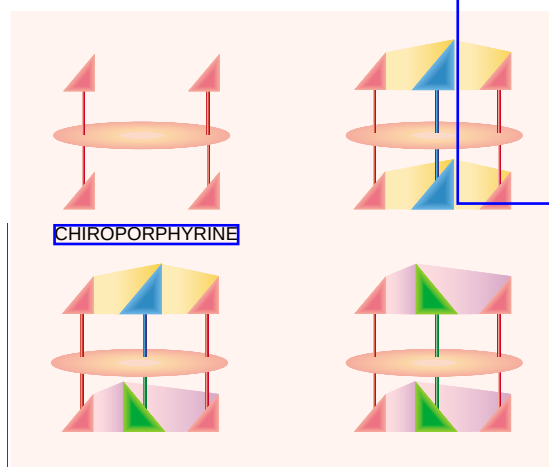
Une nouvelle méthode d'analyse des molécules asymétriques.

Sur Terre, chez tous les organismes vivants, les acides aminés (les briques élémentaires des protéines) ont une même propriété : ils ne sont pas superposables à leur image dans un miroir. Ainsi, ils pourraient exister sous forme droite ou gauche, comme la main humaine et comme la coquille des escargots, qui s'enroule vers la droite ou vers la gauche. Pourtant, dans la nature, on rencontre presque uniquement des acides aminés de forme

gauche, que ce soit chez les êtres humains, les animaux ou les plantes.

Jean-Claude Marchon et ses collègues du Laboratoire de chimie inorganique et biologique du Commissariat à l'énergie atomique de Grenoble ont synthétisé une nouvelle classe de molécules, les chiroporphyrines, qui permettent de mesurer les proportions d'acides aminés droits et gauches dans un échantillon. Grâce à ces mesures, on espère déduire les caractéristiques de la vie... sur d'autres planètes.

Ces molécules sont dérivées des porphyrines, omniprésentes chez les organismes vivants sous forme de complexes contenant un métal : par exemple les porphyrines de magnésium et de fer sont présentes respectivement dans la chlorophylle et dans l'hémoglobine. J.-C. Marchon et ses collègues ont attaché un groupe d'atomes droit à une porphyrine de cobalt. Cette chiroporphyrine réagit avec des acides aminés pour former des complexes. La réaction est quantitative (chaque chiroporphyrine réagit avec deux acides aminés) et irréversible (la liaison chimique formée est stable). Le complexe obtenu est



Sur Mars (en bas), deux sondes spatiales collecteront des échantillons en 2003 et en 2005. Une ressemblance entre des molécules qu'elles rapporteront et celles des organismes vivants terrestres conforterait l'idée que la vie serait venue de l'espace. Ces molécules seraient notamment des acides aminés, pour lesquels une nouvelle méthode d'analyse par résonance magnétique nucléaire a été mise au point. Les acides aminés droits (en haut, en bleu) et gauches (en haut, en vert) réagissent avec la chiroporphyrine pour donner trois complexes dont aucun n'est l'image de l'un des deux autres dans un miroir : les interactions (en jaune et en violet) des acides aminés et de la chiroporphyrine diffèrent. Grâce à cette différence, la nouvelle méthode détermine les proportions des complexes, puis des deux formes (droite ou gauche) des acides aminés.

constitué de trois parties : l'une (correspondant à la chiroporphyrine) est droite, et les deux autres (correspondant aux deux acides aminés) sont soit droites, soit gauches. On obtient au total trois complexes différents en fonction de la forme des acides aminés (voir la figure) : aucun n'est l'image de l'un des deux autres dans un miroir. Grâce à cette propriété, on les distingue par résonance magnétique nucléaire (RMN). Cette technique permet d'identifier des molécules placées dans un champ magnétique, par l'analyse des signaux émis par leurs atomes d'hydrogène. Comme la RMN est aussi une méthode d'analyse quantitative, on détermine les proportions des trois complexes, c'est-à-dire des formes droites et gauches d'acide aminé.

On utilise couramment la chromatographie chirale (où les molécules droites et gauches sont séparées selon leur vitesse de migration sur un substrat, sous l'effet de la pression), mais certains acides aminés ne sont pas séparés d'autres constituants de l'échantillon. La nouvelle méthode est plus fiable, car elle permet d'identifier chaque molécule. Sa sensibilité, encore assez faible, sera améliorée par l'utilisation de champs magnétiques intenses.

Grâce à cette méthode, on espère répondre à une question encore ouverte : les acides aminés ont-ils une origine extra-terrestre ? En 1997, John Cronin et ses collègues ont mesuré, dans la météorite de Murchison, les proportions des deux formes d'un acide aminé qui n'existe pas sur la Terre, ce qui élimine les erreurs éventuelles dues à une contamination par la biosphère : ils ont trouvé un excès de la forme gauche, de l'ordre de dix pour cent. Or, en 1998, Jeremy Bailey et ses collègues ont découvert une source de lumière polarisée dans la nébuleuse d'Orion. Une telle lumière détruit préférentiellement certaines molécules droites, mais laisse les gauches intactes. Ainsi, un mécanisme photochimique pourrait enrichir en formes gauches les acides aminés qui se forment spontanément à partir de molécules simples dans certaines régions de l'espace interstellaire.

En 2003 et 2005, des engins spatiaux prélèveront et rapporteront des échantillons martiens. À leur retour sur Terre, en 2008, ils seront mis en quarantaine, afin d'éviter toute contamination. Les chimistes de Grenoble espèrent en obtenir un fragment, afin de l'analyser avec la méthode qu'ils ont mise au point. Contiennent-ils des acides aminés, en majorité de forme gauche ? Une telle découverte éclairerait les théories des origines de la vie, car elle suggérerait que les acides aminés terrestres sont venus de l'espace.

Le cœur a ses raisons...

Le cœur pourrait-il s'auto-protéger contre l'infarctus ?

Chaque année, en France, les maladies cardio-vasculaires tuent plus de 150 000 personnes, dont près de 50 000 pour le seul infarctus du myocarde (le muscle cardiaque). Lors d'un infarctus, l'arrêt de la circulation sanguine dans une artère entraîne la nécrose par privation d'oxygène des différents tissus, notamment du cœur. Dans notre laboratoire, nous avons montré qu'après un chauffage préalable des organes, des infarctus du myocarde déclenchés chez des rats étaient moins prononcés que sans chauffage.

Dans les années 1980, l'équipe de K. A. Remier et Robert Jennings, à l'Université Duke, a montré que, chez l'animal, le cœur a la capacité de s'auto-protéger contre l'ischémie (le manque d'oxygénation) et les dommages qu'elle engendre. Pour ce faire, ils ont déclenché un mini-infarctus chez certains animaux et comparé les conséquences d'un infarctus chez ces animaux et chez d'autres qui n'avaient pas été prétraités. Ils ont établi qu'un court arrêt de la circulation protège le myocarde contre une ischémie de plus longue durée (l'ischémie de longue durée est délétère, contrairement à l'ischémie de courte durée, bénéfique). Ce phénomène, nommé «préconditionnement ischémique», se traduit par une diminution de la taille de la partie nécrosée et par une meilleure récupération de la fonction cardiaque.

De la même façon, on pensait que le stress thermique prémunissait également le myocarde contre les conséquences d'une ischémie. Le stress thermique est de surcroît un bon modèle de stress, facile à mettre en œuvre et à quantifier. Nous avons d'abord élevé la température de lapins et de rats de 37 à 42 °C pendant 10 à 15 minutes à l'aide d'une lampe d'incubation. Après

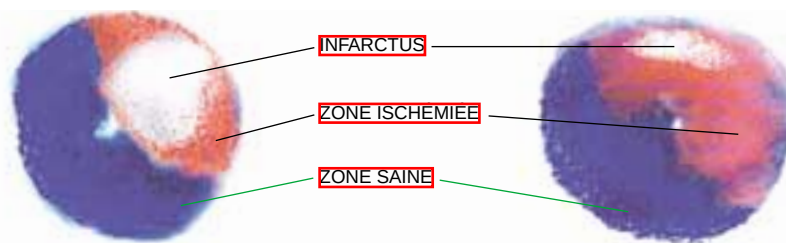
24 heures, nous avons provoqué un infarctus chez ces animaux par occlusion de l'artère coronaire et étudié leur cœur. La protection myocardique engendrée par le stress thermique préalable est spectaculaire : la taille de l'infarctus est réduite de moitié chez les animaux ayant subi l'hyperthermie par rapport aux animaux non chauffés (voir la figure). Ainsi, l'hyperthermie active un mécanisme d'auto-protection. Toutefois, l'auto-protection assurée par le traitement thermique disparaît au bout de 48 heures.

L'équipe de William Currie, de l'Université de Dalhousie, à Halifax, a établi que l'hyperthermie engendre une production de protéines particulières, les protéines de choc thermique (ou *Heat Shock Proteins*, HSP), dans le cœur et dans de nombreux autres organes. Ces protéines protégeraient les autres protéines en préservant leur conformation, c'est-à-dire leur activité biologique ; elles assureraient peut-être aussi la réparation des protéines cellulaires endommagées lors de l'ischémie.

Cependant, d'autres mécanismes cardiaques seraient également mis en jeu dans ce phénomène d'auto-protection. Ainsi, nous avons mesuré l'activité d'une enzyme, la catalase, et nous avons montré qu'elle intervient dans cette protection. Cette enzyme est dite antioxydante, car elle s'oppose à l'effet toxique, sur les organes, des radicaux libres oxydants très réactifs et abondamment produits après l'ischémie. Comment ces différents facteurs interagissent-ils ? Peut-être les protéines de stress thermique protégeraient-elles la catalase lors de l'ischémie ?

Par ailleurs, nous avons montré que le «préchauffage» protège des conséquences de l'infarctus avec la même efficacité les animaux présentant une hypertension artérielle. Cette pathologie est, chez l'homme, l'un des principaux facteurs de risque de l'infarctus du myocarde. Si ces mécanismes sont validés chez l'homme, le stress thermique améliorerait la récupération des organes lors des transplantations cardiaques.

M. JOYEUX-FAURE et Ch. RIBUOT, Laboratoire de stress cardio-vasculaires et des pathologies associées, Grenoble



Coupe de deux cœurs de rats. Les cœurs sont congelés, coupés en minces tranches. Les tranches sont alors trempées dans un réactif qui colore différemment les zones nécrosées et les zones saines. À gauche, le cœur provient d'un animal chez lequel on a déclenché un infarctus, sans traitement préalable. À droite, la taille de l'infarctus, c'est-à-dire la zone où les cellules sont nécrosées (en blanc), est bien inférieure : l'animal avait été préalablement chauffé.

Régulation génétique

Des généticiens ont découvert le rôle du contrôle de l'expression des gènes dans les symptômes d'une maladie rare.

Les malades atteints du syndrome ICF (40 cas répertoriés dans le monde, dont trois en France) ont, d'une part, des anomalies faciales, tels des yeux écartés, des oreilles basses et une base du nez aplatie, et, d'autre part, des défenses immunitaires diminuées. De plus, au microscope, l'observation du caryotype (la carte des chromosomes) révèle que certains chromosomes sont plus allongés que ceux d'une cellule normale.

L'équipe d'Evaní Viegas-Péquignot, de l'INSERM, en collaboration avec des équipes américaines, danoises et anglaises, a étudié les modifications génétiques liées à ce symptôme et localisé le

gène anormal dont la mutation explique ces symptômes : il s'agit du gène codant une enzyme, nommée méthyltransférase 3B, qui fixe ou retire des groupes méthyle ($-CH_3$) sur l'ADN. De surcroît, l'isolement de ce gène a permis une compréhension plus précise du contrôle de l'expression des gènes.

Une cellule a dans son noyau l'ensemble de l'information génétique, codée sous forme d'ADN, nécessaire au bon fonctionnement de l'ensemble de l'organisme ; cela signifie qu'une cellule, par exemple une cellule du foie, a également les gènes utilisés par un neurone ou par un globule blanc. Pourtant, au cours de son développement, pour acquérir sa forme et ses fonctions, la cellule n'exploite qu'une partie de son ADN. De plus, les gènes s'expriment, c'est-à-dire enclenchent la formation de protéines, selon une séquence temporelle qui dépend de l'organe à fabriquer. Les gènes «reconnaissent» le moment où ils doivent s'exprimer grâce au processus de méthylation, notamment dû à la méthyltransférase 3B.

On connaît trois autres enzymes qui ont la même fonction. Certaines assu-

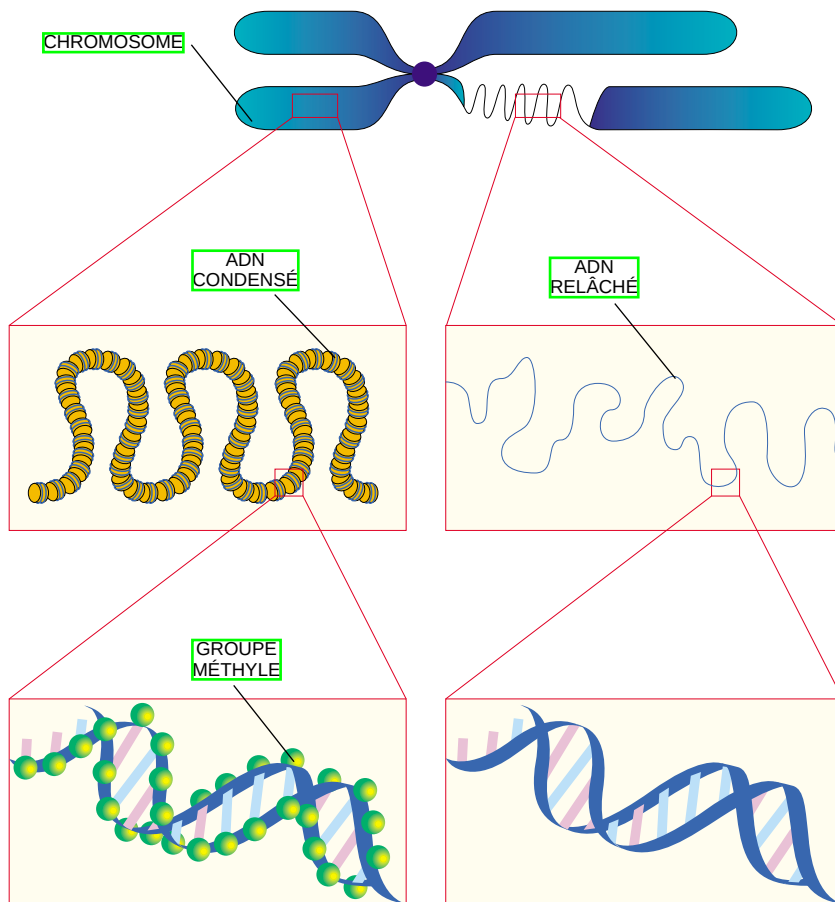
rent la maintenance de la méthylation, par exemple lorsque l'ADN déjà méthylé se duplique pendant la division cellulaire, d'autres, telle la méthyltransférase 3B, fixent des groupes méthyle sur l'ADN qui en est dépourvu. Comment cette méthylation contrôle-t-elle les gènes ? Comment la mutation entraîne-t-elle les symptômes décrits ?

Par leur affinité avec des protéines autour desquelles s'enroule l'ADN, les groupes méthyle favorisent la condensation, c'est-à-dire le repliement et l'agglutination, de la région d'ADN à laquelle ils sont fixés. Les gènes méthylés sont enfouis et inaccessibles, tandis que les gènes non méthylés restent exposés aux enzymes, et les gènes s'expriment. Outre ce contrôle direct, la méthylation intervient également dans l'expression des gènes en favorisant la formation d'hétérochromatine : gendarme de l'ADN, cette hétérochromatine empêche l'expression des gènes avec lesquels elle est en contact. Un défaut de méthylation nuit à la formation de l'hétérochromatine.

Dans le syndrome ICF, l'absence de cette enzyme empêche la condensation de l'ADN, les chromosomes sont donc plus allongés. Ils sont plus fragiles et se rompent facilement : les remaniements chromosomiques anar- chiques, tels des délétions, des duplications et des échanges d'ADN entre chromosomes, sont fréquents et perturbent le bon fonctionnement des cellules, notamment des globules blancs qui produisent moins d'anticorps : le système immunitaire des malades est défectueux.

Ces mécanismes de méthylation participent également du bon développement de l'embryon. Au moment de sa formation, l'œuf reçoit les gènes méthylés – ou non – de ses parents. Au bout de la première semaine, lorsqu'il s'implante dans la muqueuse utérine, la totalité de son génome est déméthylé, «mis à nu», puis reméthylé selon un schéma adapté au développement de l'embryon. La méthyltransférase 3B est particulièrement active dans ce processus de reméthylation : lorsqu'elle est anormale, la croissance est perturbée et des malformations, par exemple faciales, apparaissent.

Ces résultats ont permis l'élaboration d'un test fiable de dépistage prénatal du syndrome ICF. Cette maladie appartient à un genre nouveau de maladies, dites à composante épigénétique, où la mutation d'un gène n'est pas la cause directe du dysfonctionnement : ici, la protéine défectueuse n'est qu'un intermédiaire dans les conséquences de la mutation.



Les chromosomes d'une cellule sont une forme condensée de l'ADN (en bleu). Cette condensation requiert la méthylation de l'ADN (à gauche), qui augmente ainsi son affinité avec des protéines de repliement (en orange). La mutation du gène de l'enzyme méthyltransférase 3B empêche cette méthylation : l'ADN non méthylé (à droite) est relâché et les chromosomes en sont fragilisés.

Fonte des glaces et montée des eaux

La diminution de l'immense réserve de glace de l'Antarctique déclencherait une montée des eaux inéluctable.

Durant des années, les scientifiques ont craint que le réchauffement global de la Terre n'entraîne une fonte de la banquise polaire, d'où résulterait une inondation des zones côtières. La partie Ouest de l'Antarctique est particulièrement surveillée : à elle seule, elle contient suffisamment d'eau pour faire monter le niveau des océans de plusieurs dizaines de mètres. De nouvelles données géologiques et des relevés radars montrent que, même si l'on arrêta de produire des gaz à effet de serre aujourd'hui, le manteau de glace continuerait à se réduire. Toutefois, le rythme de disparition serait lent et les populations auraient le temps de se mettre à l'abri.

Pourquoi la fonte de l'Ouest de l'Antarctique est-elle si inquiétante ? Parce que les roches y sont situées à une profondeur de 2 500 mètres. Ainsi

lorsque des icebergs flottent au-dessus de l'Antarctique Ouest, ils peuvent arracher la glace qui est accrochée au manteau rocheux sous-jacent. Au contact de l'air et chauffée par la soleil, cette glace fondrait alors plus facilement.

Depuis quand et à quelle vitesse, la glace de l'Antarctique de l'Ouest disparaît-elle ? À l'apogée de l'époque glaciaire, il y a 20 000 ans, la banquise s'étendait 1 300 kilomètres plus loin dans la mer. Lors du réchauffement, le manteau de glace qui couvrait la plus grande partie de l'Amérique du Nord a fondu. Le niveau des océans a monté et la banquise qui était ancrée sur le continent, à l'Ouest de l'Antarctique, a commencé à se détacher.

Les datations au carbone 14 des coquillages ramassés sur les plages les plus anciennes, dans la mer de Ross, montrent que la région n'était plus couverte de glace, il y a 7 600 ans. De surcroît, l'étude de deux points situés à l'intérieur des terres indique que depuis, la glace s'est retirée au rythme de 120 mètres par an.

Pour évaluer à quel moment ce retrait a commencé, Robert Ackert de l'Institut océanographique Woods Hole a mesuré la quantité de rayonnement cosmique absorbée par les rochers à mesure qu'ils étaient découverts par la glace. Le temps passé depuis la première exposition des rochers au rayonnement cosmique indique que la glace a commencé à se retirer il y a 10 000 ans au plus, soit près de 3 000 ans après que les océans ont commencé à monter.

Ainsi la glace de l'Ouest de l'Antarctique est lente à réagir et continue

à bouger longtemps après l'arrêt de la cause externe, ici la montée des eaux. De surcroît, le recul du manteau de glace ne montre pas de signe de ralentissement : à la vitesse actuelle, le manteau de glace qui couvre cette partie de l'Antarctique aura complètement disparu dans 7 000 ans, indépendamment du réchauffement global.

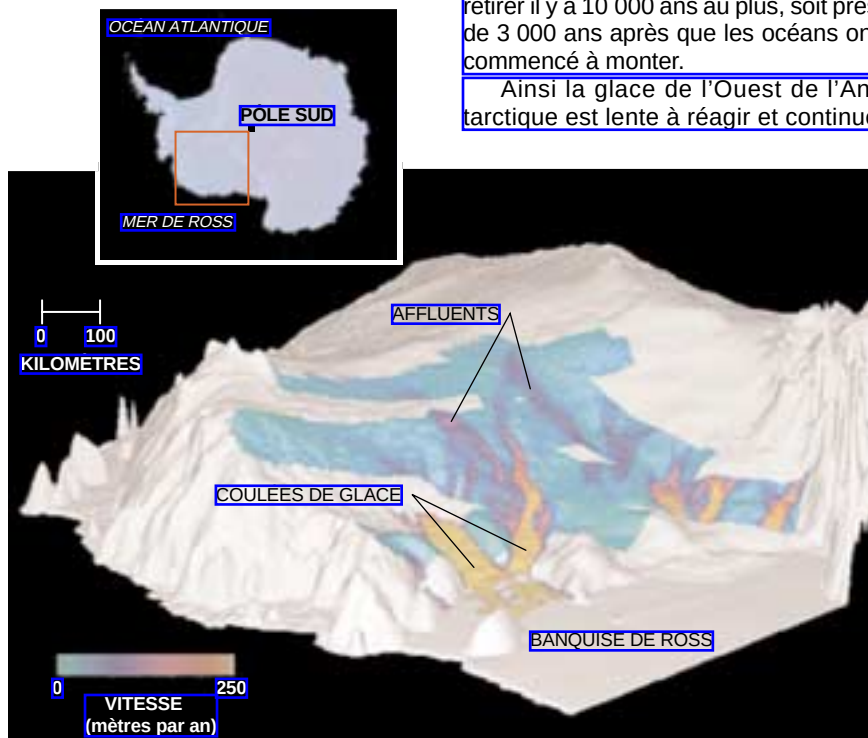
Les retraits brusques sont particulièrement difficiles à prévoir en raison des mécanismes de déstabilisation du continent. Même si la couverture de glace de l'Antarctique diminue, curieusement, la glace ne fond pas, du moins pas sur place.

Au Groenland, la glace fond et quitte le continent sous forme d'eau, mais dans l'Ouest de l'Antarctique, où il fait beaucoup plus froid, la glace quitte le continent sous forme de « coulées » solides. La neige tombe à l'intérieur des terres et les coulées transportent lentement la glace vers la mer où elle se brise en icebergs.

Jusqu'à aujourd'hui, personne ne savait ce qui se passait à la source des coulées, mais grâce à de nouvelles données obtenues par *Radarsat*, un satellite radar canadien lancé en novembre 1995, les chercheurs élucident le mystère. Au cours de l'automne 1997, le satellite a mesuré la réflexion d'un faisceau radar sur la majeure partie du continent. En comparant les réflexions de la glace lors de deux passages, les géophysiciens ont établi la vitesse et la direction de la glace sur ce manteau.

Les géologues soupçonnaient l'existence d'un réservoir de neige stable qui alimenterait les coulées : les mesures ont montré que deux longs affluents nourrissent les coulées à partir des régions intérieures. Ces affluents coulent à une vitesse de 100 mètres par an, dix fois plus rapidement que le manteau de glace lui-même. Cette vitesse est si grande que les frottements pourraient faire fondre la glace à la base de l'écoulement solide. Les données satellitaires révèlent également que les affluents alimentent encore une coulée qui s'était endiguée il y a 140 ans. Si le réchauffement global fait fondre la glace ailleurs, la montée des eaux pourrait briser la digue, d'où une évacuation encore plus rapide de la glace de l'intérieur des terres.

Les scientifiques sont toutefois loin de pouvoir prédire le destin de l'Ouest de l'Antarctique. D'autres études, telle l'analyse d'une carotte glaciaire d'un kilomètre de long, révéleront si oui ou non le manteau de glace a disparu durant les moments les plus chauds de la dernière période glaciaire.



De longs affluents de glaces qui proviennent de l'intérieur de l'Antarctique alimentent des coulées solides de glace qui tombent sur la banquise de Ross. Les géophysiciens ont cartographié la vitesse de la glace en comparant les réflexions d'un faisceau radar émis par un satellite situé à 800 kilomètres d'altitude.

Les statues de l'île de Pâques

Pour les transporter et les dresser, des archéologues ont utilisé les techniques de construction navale, transmises aux habitants de l'île par leurs ancêtres polynésiens.

Depuis la découverte des statues de l'île de Pâques, en 1722, les archéologues s'interrogent sur les méthodes employées pour les déplacer. Les habitants de l'île, arrivés de Polynésie vers le V^e siècle de notre ère, les ont érigées il y a 500 ans environ. Elles pèsent 14 tonnes en moyenne, la plus lourde atteignant 82 tonnes. Elles sont presque toutes en basalte, une roche prélevée dans l'un des cratères volcaniques de l'île. D'après les techniques de construction navale polynésiennes, Jo Anne Van Tilburg et ses collègues, de l'Université de Californie, ont élaboré une méthode de transport et d'érection des statues, puis sont allés dans l'île pour l'essayer.

Les archéologues ont proposé diverses méthodes pour déplacer les statues, mais aucune n'est satisfaisante. Dans l'île, certains ont transporté une statue en béton couchée sur un traîneau en bois qu'ils ont tiré avec des cordes, mais la forme de celle-ci ne correspondait pas à celle des vraies statues. D'autres ont mis une statue (aussi en béton) debout sur une plateforme qu'ils ont fait rouler sur des rondins, mais pas sur le sol accidenté et pentu de l'île, où cette méthode ne fonctionnerait pas. Enfin, des archéologues ont aussi fait avancer une vraie statue de quatre mètres de hauteur, à l'aide de cordes, en la tournant et la basculant alternativement sur la droite et sur la gauche, ce qui a endommagé sa base.

J. Van Tilburg et ses collègues ont proposé d'utiliser un traîneau de bois, fait de deux troncs d'arbre, reliés par un rondin ; les trois éléments sont fixés avec des cordes pour former un A. La technique de nouage des

cordes est celle que les polynésiens utilisaient pour assembler les différents éléments de leurs pirogues, notamment les pièces allongées qui relient les deux coques, dont l'une joue le rôle de stabilisateur. Ce traîneau a des caractéristiques de répartition des masses, de résistance mécanique et de flexibilité semblables à celles des pirogues conçues pour acheminer de lourds chargements sur de grandes distances, telle celle de 35 mètres de long, retrouvée aux îles Fidji.

D'après plusieurs dizaines de mesures, faites sur chacune des 838 statues de l'île, les archéologues ont déterminé les dimensions, la forme et le poids moyens des statues. Ils ont repéré la statue de l'île dont les caractéristiques sont les plus proches de ces moyennes et ont choisi son emplacement comme point d'arrivée de leur expérience de transport. Puis, ils ont réalisé un modèle numérique du terrain et ont calculé par ordinateur la distance et l'énergie nécessaire pour transporter cette statue par chacune des trois routes possibles entre ce site et le volcan d'où vient la roche et où les Polynésiens l'ont sculptée. Ils ont choisi la route la plus courte (dix kilomètres). Selon les calculs, il aurait

fallu, en empruntant cette route plus de porteurs (48), mais le transport aurait été plus rapide (cinq jours).

Des essais préliminaires, réalisés en Californie, ont montré que des rondins destinés à rouler sous le traîneau et sur des rails en bois, pour faire avancer la statue, butaient les uns contre les autres et ne restaient pas dans l'alignement des rails. Les archéologues ont alors attaché trois rondins sous le traîneau avec des cordes, comme dans une « échelle de pirogue ». Cette échelle était utilisée dans tout le Pacifique pour mettre les pirogues à l'eau et accoster sur des rochers.

Sur l'île de Pâques, J.A. Van Tilburg et ses collègues ont fabriqué la statue dont les dimensions, la forme et le poids correspondaient aux moyennes calculées : elle pèse dix tonnes et mesure quatre mètres de hauteur environ. Ils ont rempli de béton un moule en fibres de verre, spécialement étudié pour reproduire la densité et la texture des vraies statues. Ils ont ensuite fait deux expériences de transport, avec la statue posée sur le dos ou sur le ventre, car on a retrouvé des statues couchés dans ces deux positions sur l'île. Cependant, la configuration de la plupart des sites cérémoniels où se trouvent les statues fait qu'il faut dresser les statues à partir de la position horizontale ventrale.

Dans la première expérience, la statue était sur le dos et sur le traîneau, reposant sur trois rondins liés à lui par des cordes. Un groupe de 40 personnes (20 de chaque côté) a fait glisser l'ensemble sur des rails en bois, en le tirant avec des cordes : il l'ont fait progresser de 70 mètres d'un seul coup. Seule la longueur des rails a limité la progression. Les frictions entre rails et rondins étaient faibles. On a utilisé des troncs d'eucalyptus, aussi résistants que les troncs de palmier, espèce dont l'île était naguère recouverte.

Dans la deuxième expérience, la statue faisait face au sol sur le même traîneau. En plus des trois rondins précédemment fixés sous celui-ci, on avait rajouté de la même manière une pile de rondins, à la hauteur des épaules de la statue, afin que son ventre protubérant ne touche pas



Une des 838 statues de l'île de Pâques.



Les archéologues dressent une imitation en béton d'une statue polynésienne, pour tester la validité de la méthode qu'ils ont proposée. Ils ont travaillé pendant une journée et demie pour l'incliner à 45 degrés. Elle repose sur un traîneau fabriqué par l'assemblage de troncs d'arbre et de rondins avec des cordes, selon une technique polynésienne. Ils utilisent des leviers qui soulèvent le traîneau et la statue en même temps et construisent un tumulus en pierre afin de soutenir l'ensemble.

le sol. Ainsi, elle a été tirée sur un terrain plat, puis en pente. Pour qu'elle glisse mieux, on a utilisé des lubrifiants naturels, dont on se sert en Polynésie (feuille d'eucalyptus, de palmier, banane, patate douce).

Pour dresser la statue, les archéologues l'ont laissée sur le traîneau. Ils ont utilisé des leviers de plusieurs mètres de long, qui, en s'appuyant sur le traîneau, ne risquaient pas d'endommager la statue (toutes les statues ont été sculptées avant d'être dressées). Ainsi, ils ont soulevé l'ensemble statue-traîneau par étapes successives. Sous cet ensemble, il plaçaient des pierres qui formaient un tumulus de soutien ; cette technique laisse le temps à l'équipe de reprendre des forces. Une centaine de statues de l'île ont un bloc cylindrique sur la tête, en lave poreuse, beaucoup plus légère que le basalte. Les archéologues ont attaché un tel bloc au traîneau, au-dessus de la tête de la statue. Ils l'ont levé avec la statue, de sorte qu'à la fin de l'opération, il reposait sur sa tête. Personne n'avait encore soulevé un tel bloc de lave en même temps que la statue. Pour dresser la statue, 20 personnes ont travaillé pendant trois jours.

Cette méthode est adaptée au terrain de l'île, réalisable avec les matériaux autrefois disponibles sur place et par un groupe de 40 personnes. Cependant, les femmes et les enfants remplissaient les tâches annexes, tels le ravitaillement et le ramassage des pierres pour le tumulus. Un chef, s'il

réunissait tous les membres d'une large famille et accumulait les ressources nécessaires pendant plusieurs années, était capable de faire sculpter une statue de taille moyenne, de la déplacer sur un traîneau (à raison de 1,6 kilomètre par jour) et de la dresser. Les Polynésiens, en transportant les statues, démontraient leur dévouement au chef. Le transport faisait probablement naître beaucoup d'excitation, de camaraderie et resserrait les liens entre membres d'une même communauté, ce qui contribuait au caractère sacré des statues.

Cette méthode est culturellement polynésienne, puisqu'elle utilise les techniques de construction navale et de fabrication d'échelles de pirogues. Les pirogues les plus courantes avaient à peu près la même taille et le même poids que les statues de l'île de Pâques, où les premiers explorateurs en ont observé des vestiges, et où des écritures hiéroglyphiques attestent de leur présence. Les artisans qui fabriquaient les pirogues savaient manipuler et transporter les énormes troncs nécessaires à leurs ouvrages et assembler des pièces de bois, notamment par des méthodes de liage élaborées. Ils possédaient de nombreux outils, dont le *keke* en forme de Y, qui servait à faire les nœuds des cordages et à les serrer. C'est grâce à ces talents, perpétués de génération en génération, que les statues mégalithiques de l'île de Pâques se dressent aujourd'hui dans ce coin reculé du Pacifique, à des milliers de kilomètres de toute autre civilisation.

Quand la Terre était gelée

PAUL HOFFMAN • DANIEL SCHRAG

Il y a plusieurs centaines de millions d'années, la Terre aurait été couverte de glace ; puis, à la faveur d'un réchauffement par effet de serre, les organismes vivants se seraient multipliés et diversifiés.

Nos ancêtres avaient la vie dure. Des félins aux dents acérées et des mammouths étaient sans doute des menaces quotidiennes, mais la rudesse du climat l'était tout autant. Au cours du dernier million d'années, ils ont dû affronter plusieurs âges glaciaires. Au plus fort de la dernière glaciation, il y a 20 000 ans, des glaciers de plus de deux kilomètres d'épaisseur ont recouvert la majeure partie de l'Amérique du Nord et de l'Europe (jusqu'à la latitude de Bordeaux).

Ces conditions climatiques extrêmes ont certainement été dramatiques, mais elles ne furent en rien comparables aux événements catastrophiques que nos ancêtres microscopiques ont endurés il y a environ 600 millions d'années. Juste avant l'apparition des organismes pluricellulaires, à une époque nommée Néoprotérozoïque, le froid était tel que même les zones tropicales semblent avoir gelé.

La Terre aurait traversé l'espace sous la forme d'une boule de neige cosmique, pendant plus de dix millions d'années. La chaleur se dégageant du noyau en fusion aurait empêché les océans de geler en profondeur, mais une couche de glace de un kilomètre d'épaisseur, entretenue par une température de -50°C , les aurait recouverts. Nous pensons

1. DES MONTAGNES DE GLACE comme celles du glacier Moreno, en Argentine (*ci-contre*) ont naguère recouvert tous les continents. On a trouvé des informations sur cette période dans des couches de roches aujourd'hui visibles, comme sur ces collines proches de la côte Nord-Ouest de la Namibie (*cartouche*).

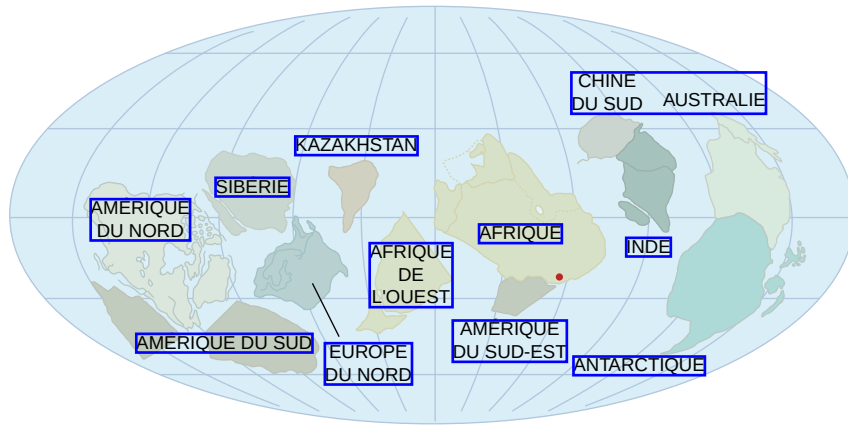


Le dioxyde de carbone s'accumule dans l'atmosphère, où il atteint des concentrations élevées. Or le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre : il piège la chaleur émise par le Soleil,

Nous pensons qu'une telle inversion brutale du climat s'est produite à quatre reprises, il y a entre 750 et 580 millions d'années. On a longtemps pensé que la Terre, contrairement à d'autres planètes, telle Vénus, n'avait jamais connu de climats aussi rudes. Toutefois, dès le début des années 1960, on a commencé à avoir des indices de variations climatiques extrêmes et, au cours des huit dernières années, nous avons fait de nouvelles observations et élaboré une

La mémoire du climat qui régnait au Néoprotérozoïque est gravée dans les roches anciennes. Pendant des décennies, les indices découverts semblaient contradictoires. On a d'abord eu du mal à comprendre la présence de débris glaciaires proches du niveau de la mer, dans des zones tropicales. Aujourd'hui, on ne trouve des glaciers près de l'équateur qu'au-dessus de 5 000 mètres et, au plus fort de la dernière glaciation, ils ne sont guère descendus au-dessous de 4 000 mètres. On a trouvé, mélangés aux débris glaciaires, des dépôts inhabituels de roches riches en fer ; or ces dépôts





2. LES CONTINENTS étaient probablement rassemblées près de l'équateur pendant les glaciations globales, qui ont eu lieu il y a environ 600 millions d'années. Depuis, les continents se sont déplacés, mais les vestiges des débris abandonnés par la glace, quand elle a fondu, affleurent en de nombreux points de la surface des terres émergées, notamment dans l'actuelle Namibie (point rouge).

n'auraient pu se former que si les océans et l'atmosphère du Néoprotérozoïque étaient quasi dépourvus d'oxygène, mais, à cette époque, l'atmosphère avait déjà presque la même composition qu'aujourd'hui (en présence d'oxygène, le fer est pratiquement insoluble dans l'eau). Qui plus est, les roches, dont on sait qu'elles se forment dans des eaux chaudes, semblent s'être accumulées juste après le retrait des glaciers. Si la Terre a été suffisamment froide pour être couverte de glace, comment s'est-elle réchauffée? Pourquoi certains organismes vivants ont-ils échappé à la mort? La signature isotopique que le carbone imprime dans les roches indique que l'activité biologique est longtemps restée infime.

Chacune de ces énigmes anciennes semble s'éclaircir quand on les considère comme des jalons de l'histoire d'une Terre boule de neige. Nous avons publié notre théorie en 1998 et, depuis, elle a reçu un soutien prudent de la communauté scientifique. S'il est exact, notre scénario qui explique les mystères du climat du Néoprotérozoïque, apporterait de nouveaux éclairages sur les changements du climat global. Ces glaciations sans égal se sont produites juste avant une diversification rapide de la vie pluricellulaire, culminant avec l'«explosion du Cambrien», qui eut lieu entre 575 et 525 millions d'années. Paradoxalement, les longues périodes d'isolement et de conditions extrêmes que la Terre gelée a subies ont peut-être favorisé des mutations génétiques qui, ultérieurement, auraient stimulé l'explosion évolutive.

Nous avons cherché, partout dans le monde, des indices de ces événements climatiques. Bien que nous étudions aujourd'hui les roches du Néoprotérozoïque en Australie, en Chine, dans l'Ouest des États-Unis et dans les îles arctiques de l'archipel du Svalbard, nous avons commencé notre quête en 1992, le long des falaises rocheuses de la côte des Squelettes, en Namibie. À l'ère néoprotérozoïque, cette région d'Afrique du Sud-Ouest faisait partie d'une vaste plaque continentale qui subissait un phénomène de subduction lent, à quelques degrés de latitude Sud.

Nous y avons trouvé, dans des roches formées de dépôts de poussières et de débris que la glace a abandonnés en fondant, des indices de la présence de glaciers. Des roches, surtout des carbonates de calcium et de magnésium, recouvrent les débris glaciaires et indiquent qu'une atmosphère excessivement chaude a succédé à la période de glaciation extrême. Après avoir été enfouies pendant des centaines de millions d'années, ces roches qui affleurent aujourd'hui à la surface racontent leur histoire.

En 1964, Brian Harland, de l'Université de Cambridge, montra que des dépôts glaciaires parsèment les affleurements de roches néoprotérozoïques sur la quasi-totalité des continents. Au début des années 1960, l'hypothèse des plaques tectoniques faisait son chemin : elle décrit comment la mince enveloppe rocheuse de la planète est découpée en gigantesques fragments qui flottent à la surface d'une masse de roches en fusion. En étudiant l'orientation magnétique de minuscules grains de

minéraux emprisonnés dans les roches glaciaires, B. Harland a proposé que les continents se sont rassemblés à proximité de l'équateur à l'ère néoprotérozoïque. Avant que les roches ne soient solidifiées, ces grains se sont alignés sur le champ magnétique terrestre, tout en restant dans le même plan horizontal, car ils étaient proches de l'équateur (s'ils s'étaient formés près des pôles, leur orientation magnétique serait quasi verticale).

Réalisant que les glaciers avaient dû recouvrir les zones tropicales, B. Harland fut le premier géologue à émettre l'hypothèse que la Terre avait subi une grande période glaciaire néoprotérozoïque. Bien que certains de ses collègues aient douté de la fiabilité des données magnétiques, d'autres, depuis, ont validé son hypothèse. Toutefois, personne ne parvenait à expliquer comment les glaciers avaient résisté à la chaleur tropicale.

L'albédo

À cette époque, les physiciens venaient de mettre au point les premiers modèles mathématiques du climat de la Terre. Mikhail Budyko, de l'Observatoire géophysique de Léninegrad, trouva un moyen d'expliquer l'existence des glaciers tropicaux en utilisant des équations qui décrivaient comment le rayonnement solaire interagit avec la surface terrestre et l'atmosphère pour imposer le climat. Certaines surfaces réfléchissent plus que d'autres l'énergie solaire, une caractéristique nommée albédo. Ainsi, la neige blanche qui réfléchit plus que les autres surfaces l'énergie solaire a un albédo élevé, tandis que les océans sombres ont un albédo faible ; les surfaces continentales ont des valeurs d'albédo intermédiaires, qui dépendent du type et de la répartition de la végétation.

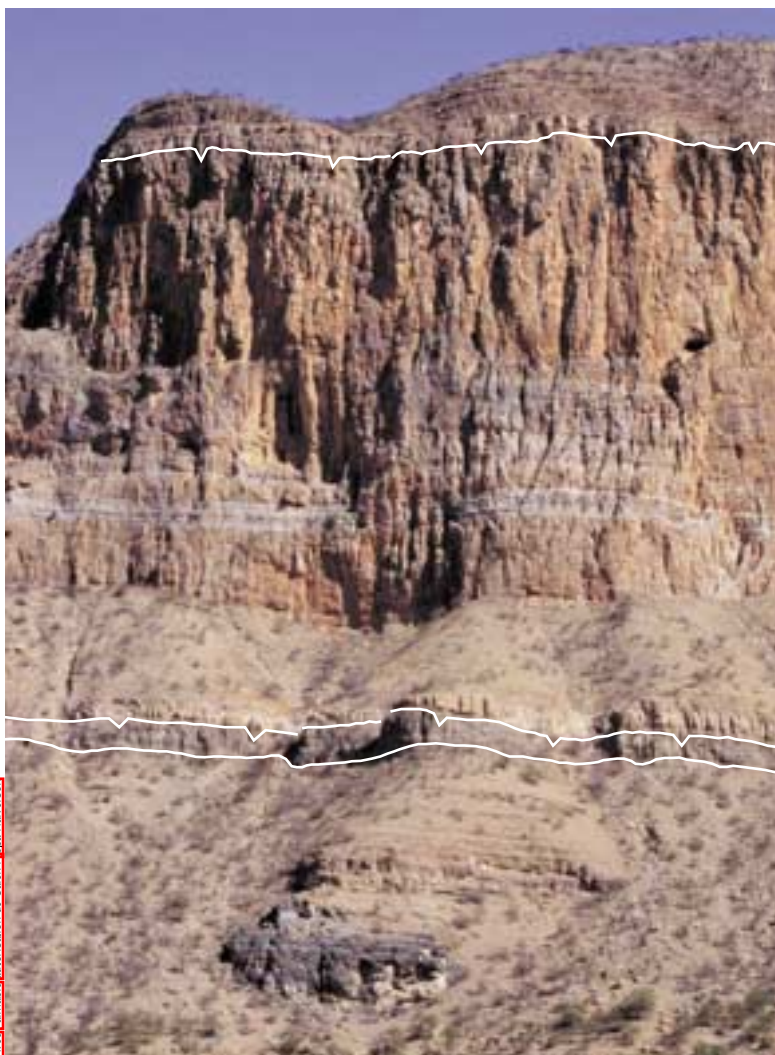
Plus la planète réfléchit le rayonnement solaire, plus la température est basse. Avec leur albédo élevé, la neige et la glace refroidissent l'atmosphère, assurant ainsi leur propre existence. Ce phénomène, nommé rétroaction de l'albédo des glaces, contribue, aujourd'hui, à l'expansion des couches glaciaires polaires. M. Budyko a montré que cette rétroaction peut s'emballer : quand des glaciers se forment à des latitudes inférieures à 30 degrés Nord ou Sud par rapport à l'équateur, l'albédo de la planète augmente, car la



lumière du Soleil frappe une plus grande surface de glace par degré de latitude. Dans ces simulations, la rétroaction devint si forte que toute la planète gèle.

Gelé ou grillé

La modélisation du climat naquit des simulations de M. Budyko, mais lui-même doutait que la Terre ait été gelée à ce point. On pensait qu'une telle catastrophe aurait détruit toute trace de vie sur la Terre. Pourtant, certaines algues microscopiques ont été fossilisées dans des roches vieilles d'un milliard d'années ; elles ressemblent beaucoup aux formes d'algues modernes, ce qui prouve que la vie ne s'est pas arrêtée. De surcroît, si la Terre avait gelé complètement, l'albédo élevé de son enveloppe glaciaire aurait entraîné une telle baisse des températures de surface que toute vie se serait éteinte ; si une telle glaciation s'était produite, elle n'aurait pas été réversible.



DRAPES CRISTALLINES

DEPOTS DE CARBONATES

DEPOTS GLACIAIRES



3. LES FALAISES ROCHEUSES qui longent la côte des Squelettes de Namibie (*en haut*) ont apporté des indices en faveur de l'hypothèse de la Terre gelée. Les auteurs, D. Schrag (*à gauche*) et P. Hoffman (*à droite*) indiquent une couche rocheuse, signe de la fin soudaine d'un événement de glaciation extrême, qui s'est produit il y a environ 600 millions d'années. La grosse inclusion de couleur claire, au centre, a sans doute été transportée par un iceberg avant de sombrer au fond de l'océan lorsque la glace a fondu. Des couches de carbonates purs ont recouvert les dépôts glaciaires (*ci-contre*), par précipitation dans les eaux chaudes et peu profondes des océans durant la période chaude qui a suivi. Ces dépôts carbonatés sont les seules roches du Néoprotérozoïque présentant de grandes structures cristallines qui se sont formées lors d'une accumulation rapide de carbonates (*ci-dessus*).

C'est alors, à la fin des années 1970, que l'on découvrit les remarquables communautés d'organismes qui vivent dans des environnements extrêmes dont on pensait qu'ils étaient trop inhospitaliers pour abriter quelque forme de vie que ce soit. Dans les sources chaudes des fonds océaniques, on a trouvé des micro-organismes qui tirent leur énergie de substances chimiques et non de la lumière du Soleil. Or l'activité volcanique qui alimente les sources chaudes se serait poursuivie pendant que la Terre était gelée. Les conditions auraient même été adaptées aux organismes qui recherchent le froid, tels ceux qui vivent aujourd'hui dans les vallées des montagnes extrêmement froides et sèches de l'Est de l'Antarctique. Des cyanobactéries et certaines espèces d'algues colonisent la neige, les roches poreuses et la surface des particules

de poussière piégées dans des glaces flottantes.

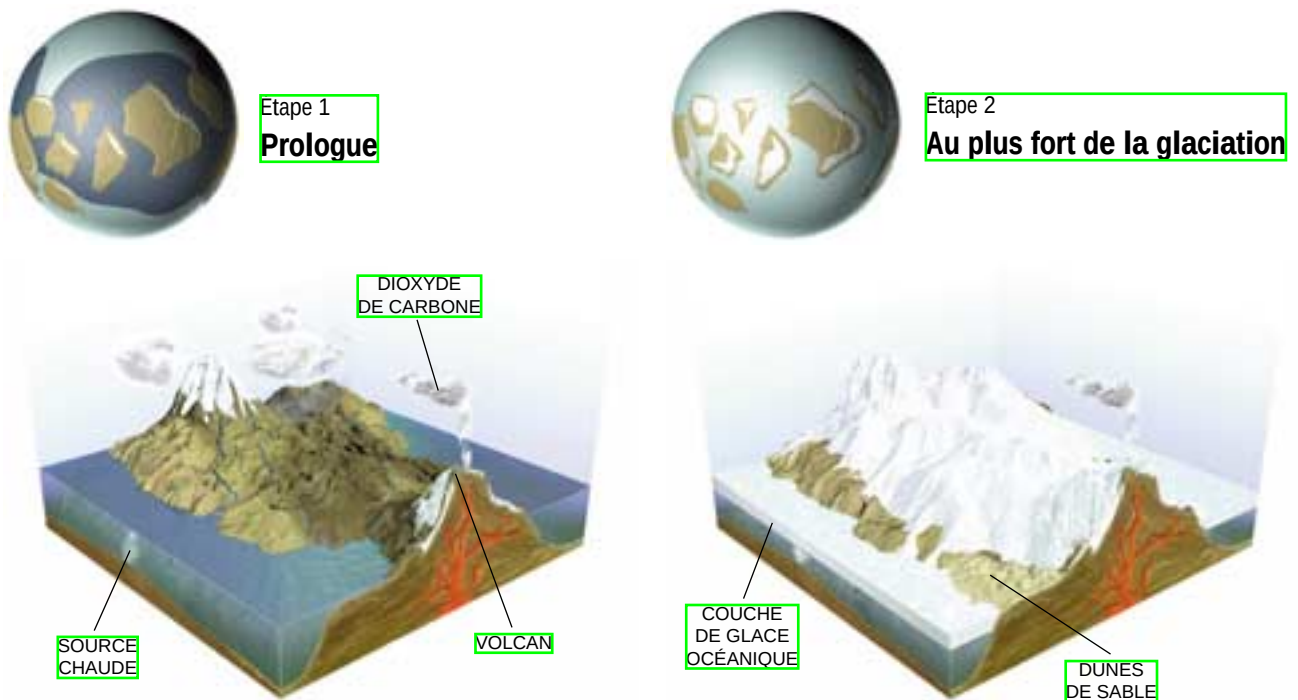
Par ailleurs, c'est le dioxyde de carbone qui a évité l'emballement du phénomène de congélation de la planète. Il est l'un des gaz émis par les volcans. Normalement, cette production continue de carbone est compensée par l'érosion des roches contenant de la silice : au cours de la dégradation chimique de ces roches, le dioxyde de carbone est transformé en ions carbonate, qui sont entraînés vers les océans, où ils se combinent aux ions calcium et magnésium pour former des sédiments carbonatés stockant d'énormes quantités de carbone.

En 1992, Joseph Kirschvink, un géobiologiste de l'Institut de technologie de Californie, montra que, durant une glaciation globale, les plaques tectoniques continueraient à se déplacer et des volcans à se former

et à libérer des rejets qui enrichiraient l'atmosphère en dioxyde de carbone. L'eau nécessaire à l'érosion des roches et à l'immersion du dioxyde de carbone étant piégée dans les glaces, le dioxyde de carbone s'accumulerait et ses concentrations deviendraient très élevées, suffisantes pour réchauffer la planète et mettre fin à la glaciation globale.

J. Kirschvink avait soutenu l'idée d'une ère glaciaire néoprotérozoïque, notamment en raison des mystérieux dépôts de fer découverts parmi les débris glaciaires. On trouve de tels dépôts beaucoup plus tôt dans l'histoire de la Terre, au moment où les océans (et l'atmosphère) contenaient très peu d'oxygène et où le fer pouvait facilement s'y dissoudre. Si la Terre avait été recouverte de glace pendant des millions d'années, les océans auraient été privés d'oxygène,

Scénario du passage d'une Terre gelée à une Terre surchauffée



Il y a 770 millions d'années, les petits continents issus de la dislocation du supercontinent de Rodinia se rassemblent près de l'équateur. Les fortes précipitations entraînent une plus grande quantité de dioxyde de carbone atmosphérique (qui a un effet de serre) et érodent plus rapidement les roches continentales. La température globale diminue, et de grandes étendues de glace se forment dans les océans, près des pôles. La glace blanche réfléchit davantage le rayonnement solaire que les océans plus sombres, de sorte que les températures continuent à baisser. Ce cycle de rétroaction déclenche un refroidissement sans fin qui finit par envelopper la planète entière de glace, en l'espace d'un millénaire.

Les températures globales moyennes descendent jusqu'à -50°C , peu après le début de l'emballement de la glaciation. Les océans se couvrent d'une couche de glace de plus de un kilomètre d'épaisseur, et la congélation n'est limitée que par la chaleur émise par les volcans. La plupart des micro-organismes marins meurent, à l'exception de ceux qui survivent à proximité des sources chaudes océaniques. L'air étant froid et sec, les glaciers terrestres cessent de progresser, créant de vastes déserts de sable balayés par les vents. En l'absence de précipitations, le dioxyde de carbone émis par les volcans stagne dans l'atmosphère. À mesure qu'il s'accumule, la planète se réchauffe, et la couche de glace qui recouvre les océans s'amincit.

de sorte que le fer dissous rejeté par les sources chaudes du plancher océanique aurait pu s'y accumuler. Puis, lorsque l'effet de serre déclenché par le dioxyde de carbone aurait commencé à faire fondre la glace, l'oxygène se serait à nouveau mélangé aux eaux océaniques, faisant précipiter le fer qui se serait mélangé aux débris contenus dans les glaces océaniques et dans les glaciers.

On a alors calculé, en 1992, que l'arrêt de la glaciation globale aurait nécessité une concentration en dioxyde de carbone environ 350 fois supérieure à celle d'aujourd'hui. En supposant que les volcans du Néoprotérozoïque émettaient une quantité de gaz identique à celle des volcans actuels, la planète serait restée emprisonnée dans les glaces pendant plus de dix millions d'années avant qu'une quantité suffisante de

dioxyde de carbone ne se soit accumulée et ne commence à faire fondre la glace. Cette glaciation aurait été la plus intense, mais aussi la plus longue.

Les indices des carbonates

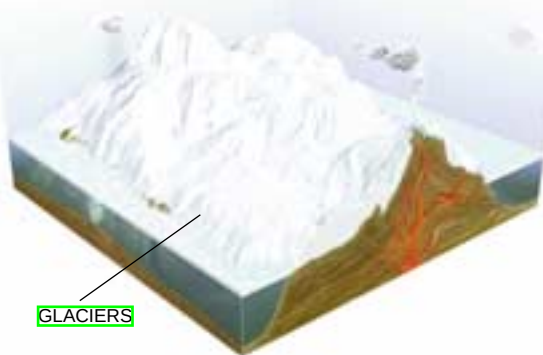
Deux nouveaux indices allaient renforcer l'hypothèse de la Terre gelée : les dépôts glaciaires du Néoprotérozoïque sont presque toujours recouverts d'une couche de roches carbonatées, lesquelles se forment dans des eaux chaudes peu profondes. Si la glace et les eaux chaudes avaient existé à des époques séparées par des millions d'années, personne ne s'en serait étonné, mais les carbonates semblent s'être formés très peu de temps après que les glaciers ont déposé leur dernière charge. On se heurtait toujours à la même question : comment

était-on passé si rapidement d'un climat glaciaire à un climat tropical ?

En comparant tous les résultats avec les observations que nous avons faites en Namibie, nous avons alors compris comment un tel changement semble s'être produit. Les épaisses couches de roches carbonatées que nous avons observées se seraient formées dans des conditions extrêmes, quand un effet de serre intense aurait suivi la période de glaciation. Pendant tout le temps de la glaciation, l'atmosphère se serait suffisamment enrichie en dioxyde de carbone pour que la glace commence à fondre, à l'équateur. Une fois la fonte amorcée, les eaux océaniques à faible albédo auraient remplacé les glaces dont l'albédo est élevé, et la glace aurait continué à fondre. L'effet de serre aurait fait remonter les températures jusqu'à près de 50 °C, selon les calculs effectués par



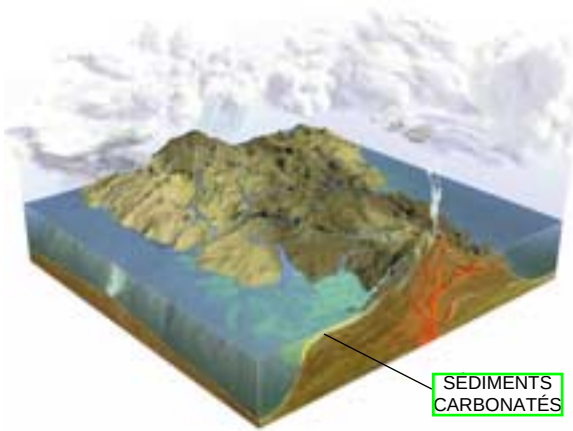
Etape 3
Les prémices de la fonte



GLACIERS



Etape 4
Un fort effet de serre



SEDIMENTS
CARBONATÉS

David Hargrett

Pendant dix millions d'années, les volcans libèrent du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, de sorte que sa concentration augmente d'un facteur 1 000. En raison du réchauffement dû à l'effet de serre, les températures s'élèvent jusqu'au point de fusion de la glace, à proximité de l'équateur. À mesure que la planète se réchauffe, la vapeur d'eau produite par la sublimation des glaces océaniques près de l'équateur regèle en altitude et alimente les glaciers terrestres. L'eau liquide qui finit par se former dans les zones tropicales absorbe plus de rayonnement solaire que la glace, ce qui accélère la remontée des températures globales. En quelques siècles, un monde chaud et humide remplace un monde gelé.

Lorsque les glaces tropicales fondent, l'eau de mer s'évapore et, en association avec le dioxyde de carbone, renforcent l'effet de serre. Les températures de surface dépassent 50 °C, déclenchant un cycle soutenu d'évaporation et de précipitations. Des pluies torrentielles chargées d'acide carbonique érodent les débris rocheux laissés dans le sillage des glaciers qui se retirent. Les rivières gonflées entraînent les ions bicarbonate et d'autres ions vers les océans, où ils se déposent sous forme de sédiments carbonatés. De nouvelles formes de vie, engendrées par un isolement génétique prolongé et par une pression de sélection intense, peuplent la Terre lorsque le climat global se normalise.

le climatologue Raymond Pierrehumbert à l'Université de Chicago.

La reprise de l'évaporation aurait également participé au réchauffement de l'atmosphère, car la vapeur d'eau est aussi un gaz à effet de serre. De plus, quand l'atmosphère était saturée d'eau, les pluies torrentielles auraient entraîné une partie du dioxyde de carbone atmosphérique sous forme d'acide carbonique, lequel aurait érodé les débris rocheux laissés à nu par le retrait des glaciers. Les produits de l'érosion chimique se seraient déposés alors rapidement dans les océans, conduisant à la précipitation de sédiments carbonatés, à leur accumulation rapide au fond des océans et à leur transformation ultérieure en roches. Les structures préservées dans les dépôts carbonatés de Namibie indiquent qu'ils se seraient accumulés très rapidement, peut-être en quelques milliers d'années. Par exemple, des cristaux d'aragonite, dont certains dépôts atteignent deux mètres de hauteur, n'ont pu se former que dans des eaux saturées en carbonate de calcium.

Les dépôts de carbonates apportent un autre élément en faveur du scénario du dégel de la Terre. Ils contiennent deux isotopes du carbone, le carbone usuel 12 et le carbone 13, plus rare et dont le noyau renferme un neutron supplémentaire. Les rapports de ces deux types de carbone sont inhabituels : on retrouve les mêmes rapports dans les dépôts carbonatés du monde entier, mais personne n'avait fait le rapprochement avec le scénario de la Terre gelée. Nous avons montré que ce rapport isotopique est conservé sur des centaines de kilomètres de roches affleurant au Nord de la Namibie.

Or le dioxyde de carbone libéré par les volcans et atteignant les océans est constitué d'environ un pour cent de carbone 13, le reste étant du carbone 12. Si seules les roches prélevaient du carbone dans les océans, elles devraient contenir la même proportion de carbone 13 et de carbone 12 que les rejets volcaniques. Toutefois, les algues et les bactéries qui se développent dans les océans prélèvent également du carbone dans les eaux environnantes, mais leur machinerie photosynthétique préfère le carbone 12 au carbone 13. Par conséquent, le carbone disponible pour la formation de roches carbonatées dans un océan plein de vie a plus de chances d'être du

carbone 13 si on le compare au carbone tout juste émis par un volcan.

La situation est différente pour les isotopes du carbone des roches néoprotérozoïques de Namibie. Juste avant les dépôts glaciaires, la proportion du carbone 13 s'était effondrée jusqu'à des valeurs équivalentes à celles des émissions volcaniques, signe d'une diminution de l'activité biologique au moment où la Terre était couverte de glace et proche d'une glaciation globale. Quand les océans ont été entièrement recouverts de glace, la vie a presque disparu, mais on ne dispose d'aucune mesure du carbone, car le carbonate de calcium n'a pu se former dans un océan pris par les glaces. La baisse du carbone 13 persiste dans toute l'épaisseur des dépôts carbonatés qui recouvrent les dépôts glaciaires, puis la proportion du carbone 13 augmente progressivement plusieurs centaines de mètres plus haut, ce qui indique sans doute la reprise de la vie à la fin de la période d'effet de serre.

Une brusque variation de la proportion du carbone 13 et du carbone 12 se manifeste également dans des roches carbonatées qui se sont formées durant des périodes d'extinctions massives, mais aucune n'a été aussi importante ni aussi longue. Même le cataclysme à l'origine de la disparition des dinosaures, il y a 65 millions d'années, n'a pas provoqué un effondrement aussi prolongé de l'activité biologique.

Ainsi, l'hypothèse de la Terre gelée expliquerait de nombreuses observations surprenantes faites dans les couches géologiques du Néoprotérozoïque : les variations du rapport des isotopes 12 et 13 du carbone associées aux dépôts glaciaires, le paradoxe des dépôts carbonatés, la présence prolongée de glaciers au niveau de la mer dans les zones tropicales et les dépôts de fer associés. Cette hypothèse justifierait toutes ces constatations pour lesquelles on n'avait pas proposé d'explication satisfaisante. De plus, nous sommes persuadés que cette hypothèse éclaire les premiers stades évolutifs de la vie.

Dans les années 1960, Martin Rudwick, travaillant avec B. Harland, proposa que l'inversion de climat après la glaciation néoprotérozoïque avait favorisé l'explosion de la vie pluricellulaire. Les eucaryotes (les cellules qui ont un noyau entouré d'une membrane et dont sont issus toutes les plantes et tous les animaux) étaient apparus plus d'un

milliard d'années plus tôt, mais les organismes les plus évolués au moment de la première glaciation néoprotérozoïque étaient des algues filamenteuses et des protozoaires unicellulaires. On s'est longtemps demandé pourquoi cela a pris si longtemps pour que ces organismes se diversifient pour donner les plans d'organisation corporelle qui apparaissent soudain durant l'explosion du Cambrien.

Le retour à la vie

Une succession de congélations et de réchauffements aurait agi comme un filtre environnemental sur l'évolution de la vie, et tous les eucaryotes descendraient des survivants du Néoprotérozoïque. L'ampleur des extinctions des eucaryotes transparaît dans les arbres phylogénétiques, qui indiquent comment divers groupes d'organismes ont évolué les uns par rapport aux autres, en fonction de leurs degrés de similitude. Aujourd'hui, les biologistes dressent ces arbres en étudiant les séquences d'acides nucléiques des organismes vivants.

La plupart de ces arbres décrivent la phylogénie des eucaryotes comme une ramification tardive sur un long tronc sans embranchement. L'absence de ramifications précoces signifierait que la plupart des lignées eucaryotes ont été «élaguées» durant le Néoprotérozoïque. Les créatures qui ont survécu aux glaciations auraient trouvé refuge dans des sources chaudes des fonds océaniques et près de la surface de la glace où la photosynthèse aurait continué.

La température élevée et les gradients chimiques qui règnent autour des sources chaudes auraient déjà présélectionné des organismes qui allaient résister aux conditions infernales à venir. Face aux contraintes environnementales, de nombreux organismes subissent d'importantes modifications génétiques. Des contraintes draconiennes favorisent les mutations génétiques sur une courte période, car les organismes dont les gènes se modifient le plus rapidement ont davantage de chances d'acquérir des caractères qui les aideront à s'adapter et à proliférer.

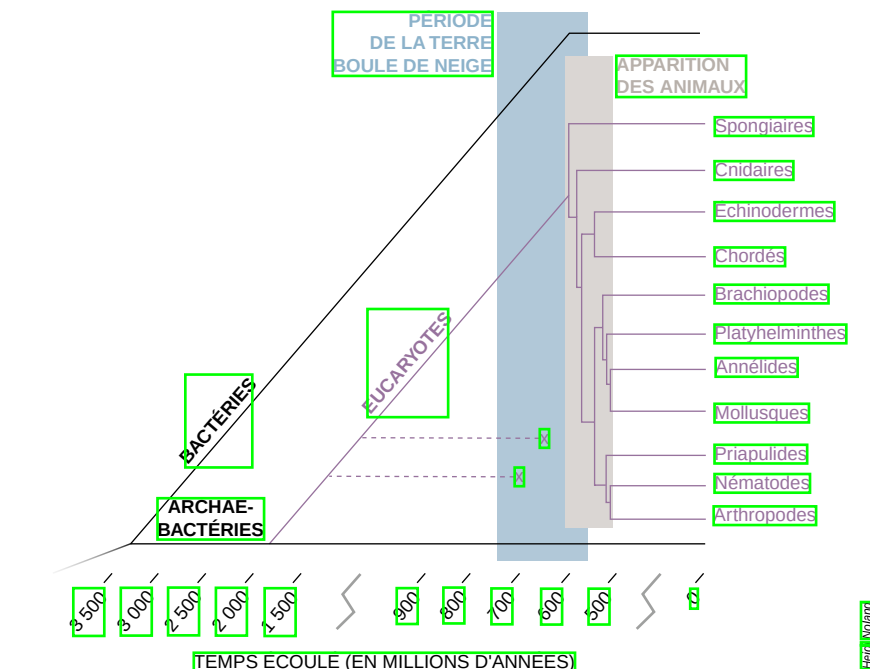
Des communautés de sources chaudes très éloignées de la surface glacée du globe ont accumulé une diversité génétique pendant des millions d'années. Lorsque deux groupes,

apparus simultanément, sont isolés l'un de l'autre suffisamment longtemps dans des conditions différentes, il est vraisemblable, selon l'ampleur des mutations génétiques, qu'une nouvelle espèce apparaîtra. Après chaque glaciation, les populations auraient subi des pressions de sélection nouvelles changeant rapidement, et très différentes des conditions qui avaient précédé la glaciation ; de telles conditions auraient favorisé l'émergence de nouvelles formes de vie.

Rudwick n'a peut-être pas assez insisté sur le fait que l'amélioration du climat, après les glaciations du Néoprotérozoïque, aurait favorisé l'évolution des premiers animaux. Les événements climatiques extrêmes ont peut-être favorisé l'apparition de la vie pluricellulaire.

Ainsi nous pensons que les dépôts glaciaires et les roches carbonatées du Néoprotérozoïque indiquent que deux événements climatiques extraordinaires ont eu lieu : la glaciation de la Terre, suivie d'un effet de serre, moins prolongé, mais tout aussi délétère. Plusieurs questions restent ouvertes : quelle fut l'origine de ces calamités et pourquoi la planète a-t-elle été épargnée depuis ? Durant le Néoprotérozoïque, le rayonnement solaire était moins intense d'environ six pour cent : les risques de glaciation étaient supérieurs. À mesure qu'il vieillit, le Soleil se réchauffe lentement, ce qui expliquerait pourquoi, depuis, aucune glaciation globale ne se soit produite sur la Terre. Toutefois, divers indices géologiques indiquent qu'aucune glaciation de cette ampleur n'a eu lieu durant le milliard d'années qui a précédé le Néoprotérozoïque, lorsque le Soleil était encore moins chaud.

La position particulière des continents près de l'équateur aux temps néoprotérozoïques serait peut-être une explication plus convaincante. Lorsque les continents sont proches des pôles, comme aujourd'hui, les concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone sont suffisamment élevées pour que la planète reste chaude. Lorsque les températures globales s'abaissent assez pour que les glaciers recouvrent les continents des latitudes élevées, tels l'Antarctique et le Groenland, les couches de glace empêchent l'érosion chimique des roches sous-jacentes. Le processus d'absorption du carbone étant entravé, le dioxyde de carbone



4. TOUS LES ANIMAUX descendent des premiers eucaryotes, des cellules qui ont un noyau délimité par une membrane, apparus il y a environ deux milliards d'années. Lorsque la Terre a gelé, plus d'un milliard d'années après l'apparition de la vie, les eucaryotes avaient peu évolué : ils n'en étaient qu'au stade de protozoaires unicellulaires et d'algues filamenteuses. Toutefois, malgré les conditions climatiques extrêmes, qui ont peut-être «élagué» l'arbre des eucaryotes (lignes en pointillés), les 11 grandes familles d'animaux qui peuplent la Terre sont apparues en très peu de temps, après la fonte des neiges à la surface de la Terre. L'isolement génétique prolongé et la pression de sélection qui avait eu lieu sur la Terre gelée seraient à l'origine de cette explosion de nouvelles formes de vie.

atmosphérique reste concentré et les glaces cessent de gagner du terrain. Au contraire, quand tous les continents se rassemblent dans les zones tropicales, la glace ne s'y accumule pas, même si la Terre se refroidit et se rapproche du seuil critique au-dessous duquel la glaciation s'emballerait. Le dioxyde de carbone, «interrupteur de sécurité», devient inefficace, car une quantité excessive de carbone est enfouie dans les sédiments.

Nous ne saurons peut-être jamais ce qui a réellement déclenché une telle glaciation de la Terre, car nos théories sur les changements climatiques sont trop rudimentaires. Pendant le dernier million d'années, la Terre a connu la période la plus froide depuis l'apparition des animaux, mais, même lors de l'avancée la plus notable des glaciers, il y a 20 000 ans, le seuil critique qu'il aurait fallu atteindre pour que la Terre gèle était encore loin. Durant les prochaines centaines d'années, nous serons certainement plus préoccupés des conséquences de l'activité humaine sur le climat – puisque la Terre se réchauffe en raison du dioxyde de carbone émis par l'homme dans l'atmosphère – que de grandes glaciations.

Malgré cet effet de serre, la Terre pourrait-elle un jour être à nouveau gelée ? Nous sommes à quelque 80 000 ans de la prochaine ère glaciaire, ce qui nous laissera peut-être le temps de trouver la réponse. Il est difficile de prévoir quelle sera l'évolution du climat de la Terre au cours des prochains millions d'années. Si la tendance des millions d'années passées se poursuit et si l'«interrupteur de sécurité» s'enraye, une nouvelle catastrophe glaciaire globale, qui orienterait la vie dans une nouvelle direction, pourrait bien se produire.

Paul HOFFMAN, géologue, et Daniel SCHRAG, géochimiste et océanographe, travaillent à l'Université Harvard.

Origin and Early Evolution of the Metazoa, sous la direction de J.H. Lipps et P.W. Signor, Plenum Publishing, 1992.

D. ERWIN, J. VALENTINE et D. JABLONSKI, *The Origin of Animal Body Plans*, in *American Scientist*, vol. 85, n° 2, pp. 126-137, mars-avril 1997.

P.F. HOFFMAN, A.J. KAUFMAN, G.P. HALVERSON et D.P. SCHRAG, *A Neoproterozoic Snowball Earth*, in *Science*, vol. 281, pp. 1342-1346, 28 août 1998.

Les défis de l'hépatite C

ADRIAN DI BISCEGLIE • BRUCE BACON

En France, un pour cent de la population est infecté par le virus de l'hépatite C, et 50 pour cent des porteurs du virus l'ignorent encore.

À la fin des années 1980, seuls les médecins connaissaient l'hépatite C, une infection virale à progression lente qui, sans traitement, provoque en 20 ans une dégénérescence du foie ou un cancer du foie. Aujourd'hui, cette maladie pose un problème mondial de santé publique. En France, environ un pour cent de la population, soit 600 000 personnes, est infecté par le virus de l'hépatite C, qui est la principale cause des transplantations hépatiques. Environ 3 000 personnes meurent chaque année de complications liées à cette infection. En 1994, un tiers seulement des personnes infectées avaient connaissance de leur état ; aujourd'hui la moitié des malades se savent infectés, et, grâce au Plan national de lutte contre l'hépatite C, le ministère de la Santé espère qu'en 2002 au moins 75 pour cent des porteurs du virus, informés, prendront les dispositions nécessaires pour éviter de contaminer leurs proches.

La jaunisse a longtemps été le seul signe à partir duquel on diagnostiquait les hépatites, c'est-à-dire les inflammations du foie dues à un virus ou à des substances tel l'alcool : le blanc des yeux et la peau se colorent en jaune lorsque le foie n'excrète plus un pigment nommé bilirubine, qui s'accumule alors dans l'organisme. Néanmoins, le diagnostic des hépatites s'est progressivement perfectionné, et les médecins en distinguent aujourd'hui plusieurs formes.

Dans les années 1930 et 1940, des biologistes, qui étudient l'hépatite virale dans des établissements où la jaunisse est courante, telles les prisons et les maisons de santé, identifient deux formes qui se distinguent, notamment par le

mode de transmission. L'une, nommée hépatite infectieuse ou hépatite A, se transmet par contact avec les matières fécales d'individus infectés ; l'autre, l'hépatite du sang ou hépatite B, ne se propage que par voie sanguine.

Puis, dans les années 1950, une étape importante est franchie lorsque des immunologistes mettent au point des tests qui mesurent la concentration en enzymes (les alanines aminotransférases et les aspartates aminotransférases, qui participent au métabolisme des acides aminés) libérées dans le sang par les cellules du foie détruites. Des concentrations élevées en ces deux enzymes deviennent des signes d'atteinte hépatique plus fiables qu'une jaunisse. Toutefois, outre l'hépatite, certaines maladies héréditaires rares sont à l'origine de concentrations élevées en enzymes hépatiques.

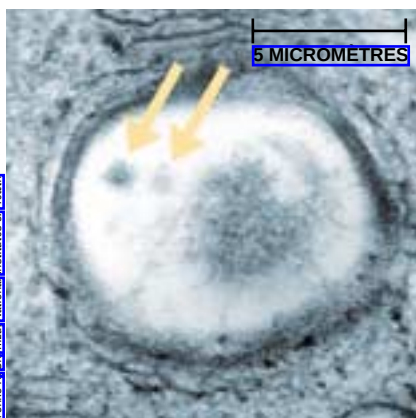
Puis, au milieu des années 1960, à l'Institut américain de la santé, Baruch Blumberg identifie le virus de l'hépa-

tite B dans le sang de malades. Dix ans plus tard, son collègue Stephen Feinstone identifie un autre virus dans les selles de patients atteints d'hépatite A. Après ces deux découvertes, de nombreux biologistes cherchent des tests fiables de dépistage de ces deux virus.

Dans les années 1960, 30 pour cent de ceux qui ont reçu une transfusion sanguine ont, quelques semaines plus tard, des concentrations élevées en alanine aminotransférase et en aspartate aminotransférase, ou une jaunisse. Dans les années 1970, des tests plus fiables de l'hépatite A et de l'hépatite B sont mis au point, mais les médecins constatent qu'une proportion notable des hépatites post-transfusionnelles ne sont causées par aucun de ces deux virus : cette nouvelle maladie est alors nommée «hépatite ni A ni B».

Enfin, en 1985, Michael Houghton et ses collègues des Laboratoires Chiron identifient le virus de l'hépatite C à partir d'échantillons de sérum de chimpanzés infectés. Les trois virus sont responsables de la majorité des cas d'hépatites virales (quelques-uns sont dus à d'autres virus plus rares). Pourquoi la découverte de l'hépatite C a-t-elle tant tardée ?

Le virus de l'hépatite C se multiplie difficilement dans des cultures de cellules, et seuls l'homme, le chimpanzé et le tamarin (un petit singe d'Amérique du Sud) sont susceptibles d'être infectés. Le coût très élevé de ces deux espèces limite le nombre d'animaux utilisés. Ces obstacles, qui ralentissent l'étude du virus, ont été contournés : le virus de l'hépatite C a été le premier virus découvert par la technique du clonage d'acide nucléique, que nous allons examiner.



1. LE VIRUS DE L'HÉPATITE C est ici contenu dans des vésicules cellulaires (indiquées par les flèches) observées au microscope électronique.

Une aiguille dans une meule d'ARN

Les acides nucléiques – l'acide désoxyribonucléique (ADN) et l'acide ribonucléique (ARN) – sont les molécules qui contiennent sous forme codée l'information génétique des organismes vivants. Ils sont formés d'une succession de groupes chimiques nommés bases, dont il existe quatre types, complémentaires deux à deux. Les virologistes ont d'abord extrait l'ARN d'échantillons de sang soupçonnés de contenir l'agent viral inconnu. De nombreux virus ont un matériel génétique sous forme d'ARN, mais les cellules saines contiennent aussi de l'ARN : comment discerner le virus inconnu ?

Les biologistes ont utilisé une enzyme qui copie l'ARN en nombreux exemplaires d'ADN, dits complémentaires, qu'ils ont ensuite insérés dans des virus, nommés bactériophages ; puis ils ont infecté des bactéries *Escherichia coli*. Ces dernières ont alors synthétisé les protéines codées par les ADN introduits. Après culture sur un milieu nutritif, les colonies de bactéries obtenues (chaque colonie est un clone, composé de bactéries infectées toutes identiques) ont été mises en présence de sang de chimpanzés ou d'humains atteints d'hépatite « ni A, ni B ».

Sur un million de clones bactériens testés, un seul avait une protéine à laquelle se liaient les anticorps du sang de chimpanzés malades : ce clone contenait donc des séquences génétiques du même virus que celui qui avait infecté les animaux dont on avait utilisé le sang. Les biologistes l'ont ensuite utilisé pour repérer le reste du matériel génétique du virus et élaborer les anticorps des premiers tests de dépistage de l'hépatite C. Depuis 1990, ce test, ou ses dérivés, sont appliqués à tous les dons de sang.

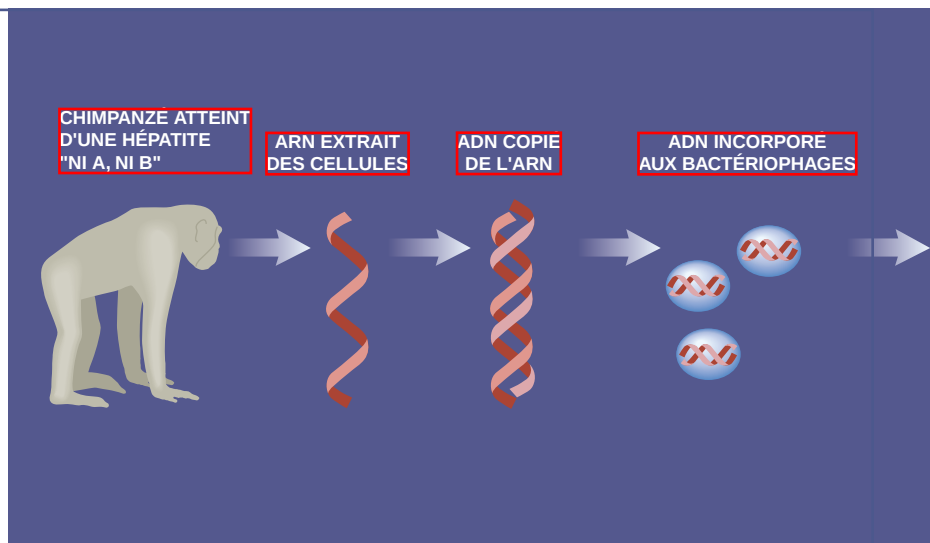
Ces tests ont également montré que l'hépatite C était un fléau beaucoup plus grave qu'on ne l'avait supposé. À l'inverse des virus de l'hépatite A ou de l'hépatite B, le virus de l'hépatite C provoque une maladie chronique : alors qu'une hépatite A ne dure souvent que quelques semaines, presque 90 pour cent des personnes atteintes d'une hépatite C le restent de nombreuses années.

2. PARMİ LA POPULATION FRANÇAISE, environ une personne sur 100 est infectée par le virus de l'hépatite.



La découverte du virus de l'hépatite C

Le virus de l'hépatite C a été identifié grâce à des molécules d'ADN copiées sur un ARN prélevé à des cellules de chimpanzés infectés. Des bactériophages (des virus qui contaminent les bactéries) ont produit de nombreuses copies de ces ADN, que l'on a transmis à des bactéries. Les colonies formées ont alors été testées avec le sang de chimpanzés contaminés. Identifié par une réaction immunitaire, l'un des clones était porteur de séquences génétiques virales.



Peu de malades connaissent l'origine de leur maladie, mais, interrogés, 60 pour cent d'entre eux avouent une transfusion, une injection de drogue ou une blessure avec une seringue porteuse de sang contaminé. Les autres malades ont été en contact proche avec des personnes contaminés.

On a notamment incriminé la transmission sexuelle de l'hépatite C, mais la faible fréquence de la maladie, même dans les catégories de population où les rapports sexuels sont réputés nombreux, contredit cette hypothèse. Ce paradoxe n'a pas encore été résolu. Certains patients qui nient toute injection de drogue ne désirent peut-être pas en parler ou ne s'en souviennent pas. Pour d'autres, des rasoirs, des instruments de tatouage non stériles ou des pailles utilisées pour renifler les drogues sont des causes possibles. Les incertitudes sur le mode de transmission n'ont toutefois pas empêché la découverte des mécanismes de réaction immunitaire de l'organisme infecté.

Des progrès lents

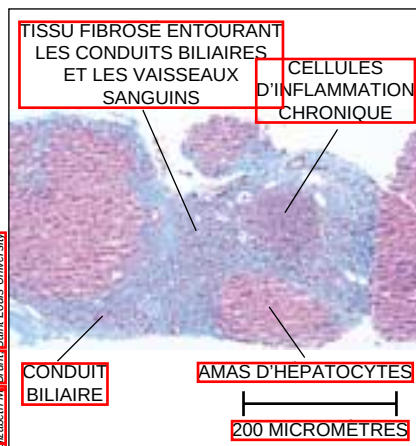
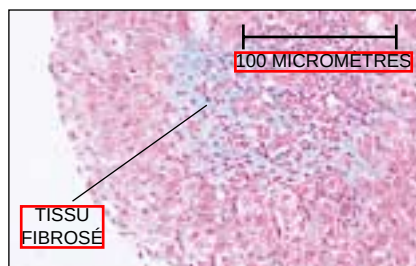
Aujourd'hui, le risque de contamination par transfusion sanguine est quasi éliminé. De plus, le nombre d'infections diminue parmi les drogués qui utilisent des seringues, peut-être grâce aux campagnes anti-SIDA, qui promeuvent les seringues à usage unique. Cependant, la lutte contre l'hépatite C reste difficile, et les perspectives d'éradication du virus sont éloignées. La mise au point d'un vaccin est douteuse, car l'organisme n'acquiert pas d'immunité contre le virus une fois qu'il a été infecté, et même des animaux qui ont éliminé le virus de

leur organisme peuvent être réinfectés. Or des millions de personnes infectées de manière chronique risquent une atteinte hépatique grave.

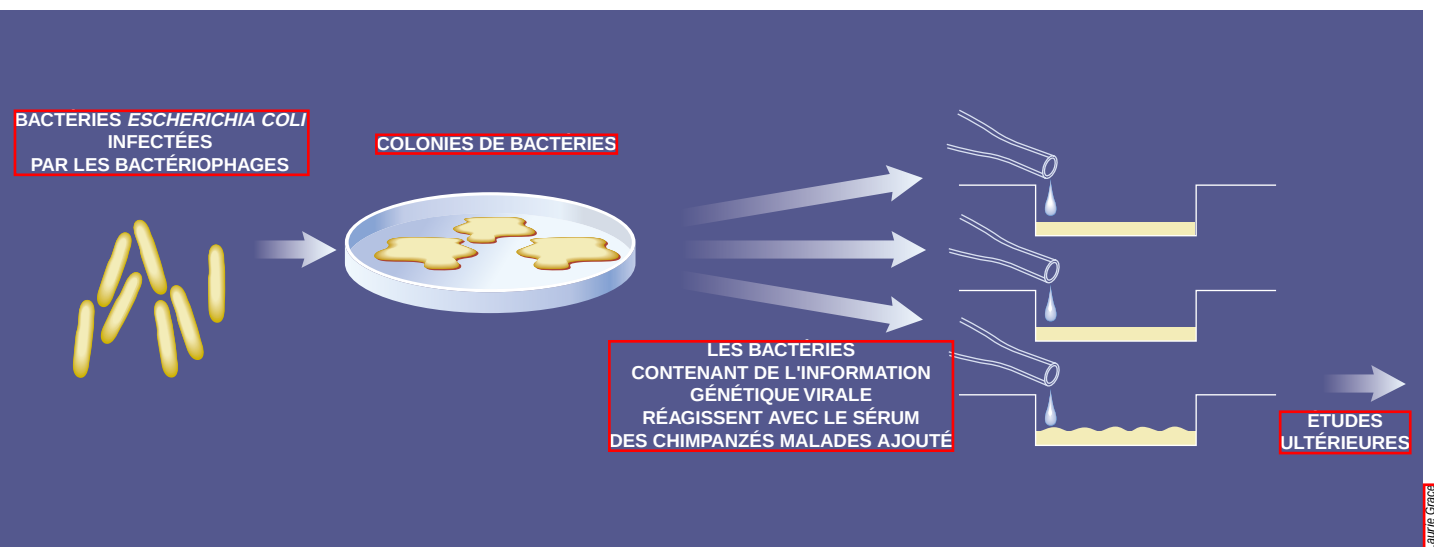
Des infections virales provoquent une lésion soit lorsque le virus tue les cellules, soit, c'est le cas du virus de l'hépatite C, quand le système immunitaire attaque les cellules infectées. Le système immunitaire réagit aux infections de deux manières : par une réaction

«humorale» et par une réaction «cellulaire». La première, qui conduit à la libération d'anticorps, semble inefficace contre le virus de l'hépatite C. Les anticorps synthétisés contre les diverses molécules ou parties de molécules virales ne neutralisent pas le virus entier, et leur présence n'est donc pas un signe d'immunité acquise. Le virus de l'hépatite C échappe vraisemblablement à cette défense parce qu'il se transforme en se répliquant : les mutations sont fréquentes dans les régions du génome viral responsables de la synthèse des protéines externes du virus, auxquelles les anticorps devraient se fixer. Deux régions très variables ont ainsi été identifiées dans les zones du génome qui codent l'enveloppe virale : on a dénombré au moins six types viraux distincts, et beaucoup plus de sous-types ; un malade peut être infecté simultanément par plusieurs de ces sous-types.

En revanche, la réaction immunitaire de type cellulaire, spécialiste des infections virales, est vigoureuse contre les cellules infectées par le virus de l'hépatite C. Elle est sans doute responsable de la plupart des inflammations hépatiques. Chez les personnes atteintes d'une infection chronique, des lymphocytes T cytotoxiques (des globules blancs qui détruisent les cellules après un contact) préparés à reconnaître des protéines de l'hépatite C circulent dans le sang et, surtout, dans le foie, où ils tuent les hépatocytes porteurs de protéines virales. Le tissu hépatique se régénère bien, mais celui de patients atteints d'hépatite contient souvent de nombreux hépatocytes morts ou en train de mourir, ainsi que des macrophages



3. LE FOIE des personnes atteintes d'hépatite C présente une fibrose, c'est-à-dire un excès de collagène (en bleu). À l'inverse d'une fibrose légère (en haut), une cirrhose (en bas) est une atteinte grave, où le tissu fibrosé entoure des amas d'hépatocytes en cours de régénération.



(des globules blancs qui absorbent les cellules) qui caractérisent une inflammation chronique.

Après quelques années de maladie, l'infection s'aggrave. Au voisinage des hépatocytes, des cellules nommées cellules hépatiques étoilées s'activent anormalement. Elles sécrètent alors trop de collagène et d'autres protéines qui désorganisent la microstructure du foie et diminuent lentement ses capacités d'épuration. Les cellules hépatiques étoilées de cette «fibrose» ont une origine et une fonction similaires à celles des cellules nommées fibroblastes qui synthétisent du collagène dans la peau (le collagène assure la tenue de la peau) non élastique. Elles stockent la vitamine A et fabriquent aussi la matrice extracellulaire qui donne au foie sa structure.

Les nouveaux antiviraux

Quand la fibrose devient excessive, une cirrhose apparaît : on observe des bandes de fibrose qui renferment des amas d'hépatocytes en cours de régénération (voir la figure 3). Cette cirrhose progresse plus rapidement chez les personnes âgées de plus de 50 ans au moment de l'infection, chez ceux qui consomment plus de 50 grammes d'alcool par jour, et chez les hommes. Tou-

tefois, une cirrhose survient parfois chez des personnes qui ne boivent jamais d'alcool. Des études récentes contredisent l'idée répandue selon laquelle la fibrose et la cirrhose sont irréversibles.

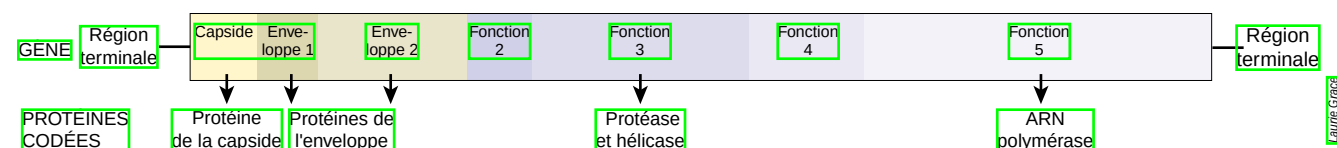
Environ 20 pour cent des personnes atteintes d'hépatite C ont une cirrhose au cours des 20 premières années de l'infection. Ensuite, certains atteignent un état d'équilibre sans lésion hépatique, tandis que, pour d'autres, une fibrose progresse très lentement. Le stade ultime de l'atteinte hépatique est la jaunisse, l'hydropisie (une accumulation de liquide dans l'abdomen) et un saignement de varices à l'intérieur de l'œsophage. L'infection par le virus de l'hépatite C est également une importante cause indirecte de cancer primaire du foie : c'est la cirrhose, et non le virus lui-même, qui accroît le risque.

La cirrhose est responsable de presque tous les troubles dus au virus de l'hépatite C. Bien qu'une faible proportion de patients aient une jaunisse au moment de l'infection, l'hépatite C chronique est souvent asymptomatique ou déclenche des signes non spécifiques, telles des sensations de fatigue ou des nausées. L'insignifiance de ces symptômes est probablement l'une des raisons pour lesquelles l'hépatite C est restée ignorée si longtemps. De plus, les personnes infectées réagissent dif-

féremment : certaines personnes portent le virus pendant des dizaines d'années sans atteinte notable, tandis que d'autres ont des lésions graves en quelques années.

Les greffes de foie sauvent des malades en phase terminale, mais le nombre de foies disponibles est insuffisant (voir *La confection de tissus vivants*, par Robert Langer et Joseph Vacanti, et *Les organes artificiels*, par David Mooney et Antonios Mikos, *Pour la Science*, décembre 1999). Aussi cherche-t-on surtout des traitements qui éradiqueront le virus.

Le premier médicament efficace est l'interféron alpha, une protéine synthétisée naturellement par les globules blancs. L'interféron alpha n'agit pas spécifiquement ; il renforce la réaction immunitaire. Il est généralement administré par voie sous-cutanée, trois fois par semaine, pendant 12 mois. Cependant, seuls 15 à 20 pour cent des malades ainsi traités ont un état qui s'améliore (on mesure l'amélioration en dosant les concentrations en alanine aminotransférase et en aspartate aminotransférase ; on recherche aussi la présence d'ARN du virus de l'hépatite C dans le sang pendant au moins six mois après l'arrêt du traitement). On a observé que certains types viraux sont plus sensibles à l'interféron alpha



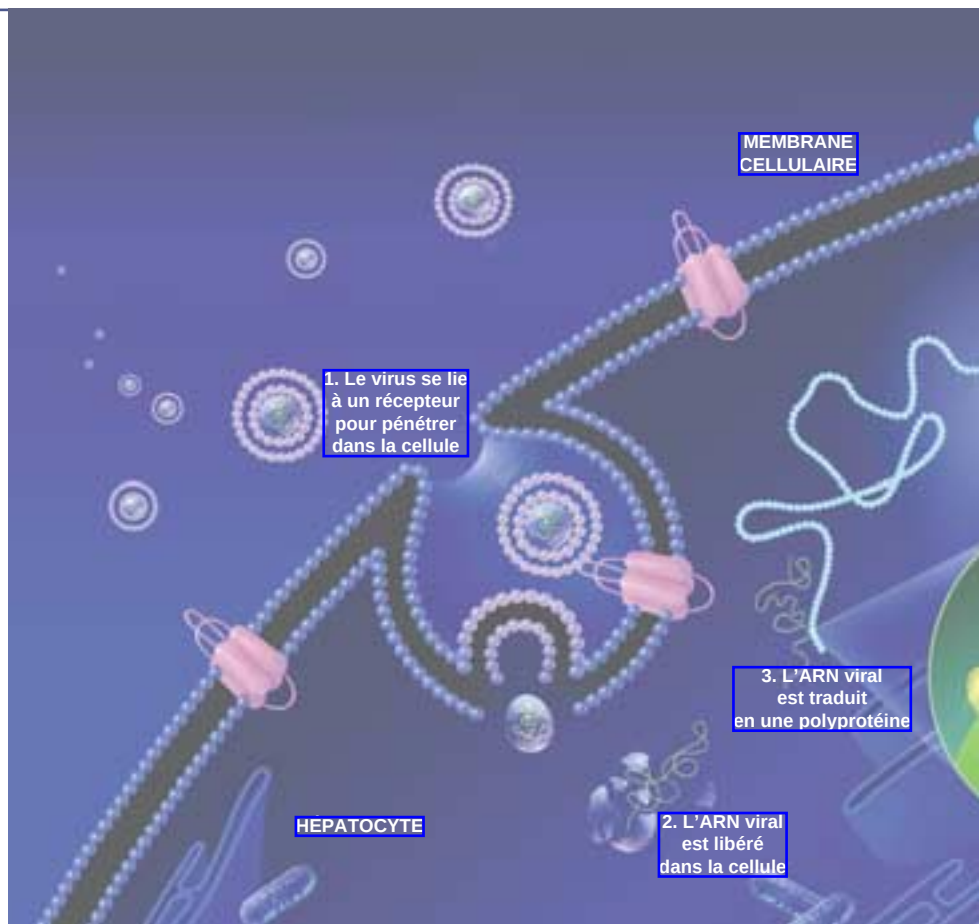
4. LE GÉNOME DU VIRUS DE L'HEPATITE C, porté par une molécule d'ARN, se compose d'un seul gène et de deux régions terminales. Le gène code une grande protéine, nommée polyprotéine, qui est ensuite

coupée en protéines plus petites : certaines composent de nouvelles particules virales, d'autres facilitent la réplication de l'ARN viral et son inclusion dans de nouveaux virus.

La reproduction du virus de l'hépatite C

La maladie commence quand des particules virales infectent des cellules sensibles, tels les hépatocytes. En se fixant sur un récepteur spécifique (1), une protéine virale, nommée E2, facilite l'entrée du virus, qui perd alors son enveloppe (composée de lipides et de protéines) et sa capside (composée de protéines) : il libère ainsi son ARN (2). Des enzymes cellulaires traduisent cet ARN en une grosse protéine virale nommée polyprotéine (3). Celle-ci est ensuite coupée en petites protéines (4), qui forment de nouvelles particules virales et facilitent la copie de l'ARN viral.

L'ARN initial est copié en un brin d'ARN complémentaire (5) à partir duquel sont synthétisées de nombreuses copies de l'ARN initial (6) ; celles-ci sont incorporées dans de nouvelles particules virales, en même temps que des protéines de structure, dans un organe nommé appareil de Golgi (7). Enveloppées d'une couche de lipides, des particules virales complètes sont libérées de la cellule infectée (8). Un patient synthétise au moins 1 000 milliards de particules virales par jour.



que d'autres, mais on ignore pourquoi le traitement échoue chez la plupart des malades.

En 1998, les Laboratoires *ICN Pharmaceuticals* ont commercialisé un antiviral nommé ribavirine, que l'on administre en même temps que l'interféron alpha pour lutter contre l'hépatite C. Bien qu'elle inhibe plusieurs virus, la ribavirine (qui peut être prise sous forme de comprimés) n'agit pas directement sur le virus de l'hépatite C, mais renforce les effets de l'interféron alpha sur le système immunitaire. Une bithérapie associant la ribavirine et l'interféron alpha pendant six à douze mois éradique le virus chez près de 40 pour cent des patients ; les médecins cherchent aujourd'hui à optimiser les effets bénéfiques de ces deux médicaments. Des formes d'interféron alpha à action prolongée, administrées une fois par semaine, sont en cours d'étude.

Aujourd'hui, un nouveau médicament est à l'essai chez un petit nombre de patients : à Cambridge, la Société *Vertex Pharmaceuticals* a mis au point une molécule qui inhibe une enzyme humaine, la ionosine monophosphate déshydrogénase, que le

virus de l'hépatite C détourne pour synthétiser les constituants de son ARN.

Une autre étude en cours examine l'efficacité d'une administration prolongée d'interféron alpha sur l'atteinte hépatique des patients qui n'ont pas éradiqué le virus. En outre, avec d'autres biologistes, nous étudions l'influence de prélèvements réguliers d'un demi-litre de sang aux patients : une partie du fer sanguin, qui, par un processus complexe, favorise la dégénérescence du foie, est éliminée ; la quantité d'aminotransférase diminue.

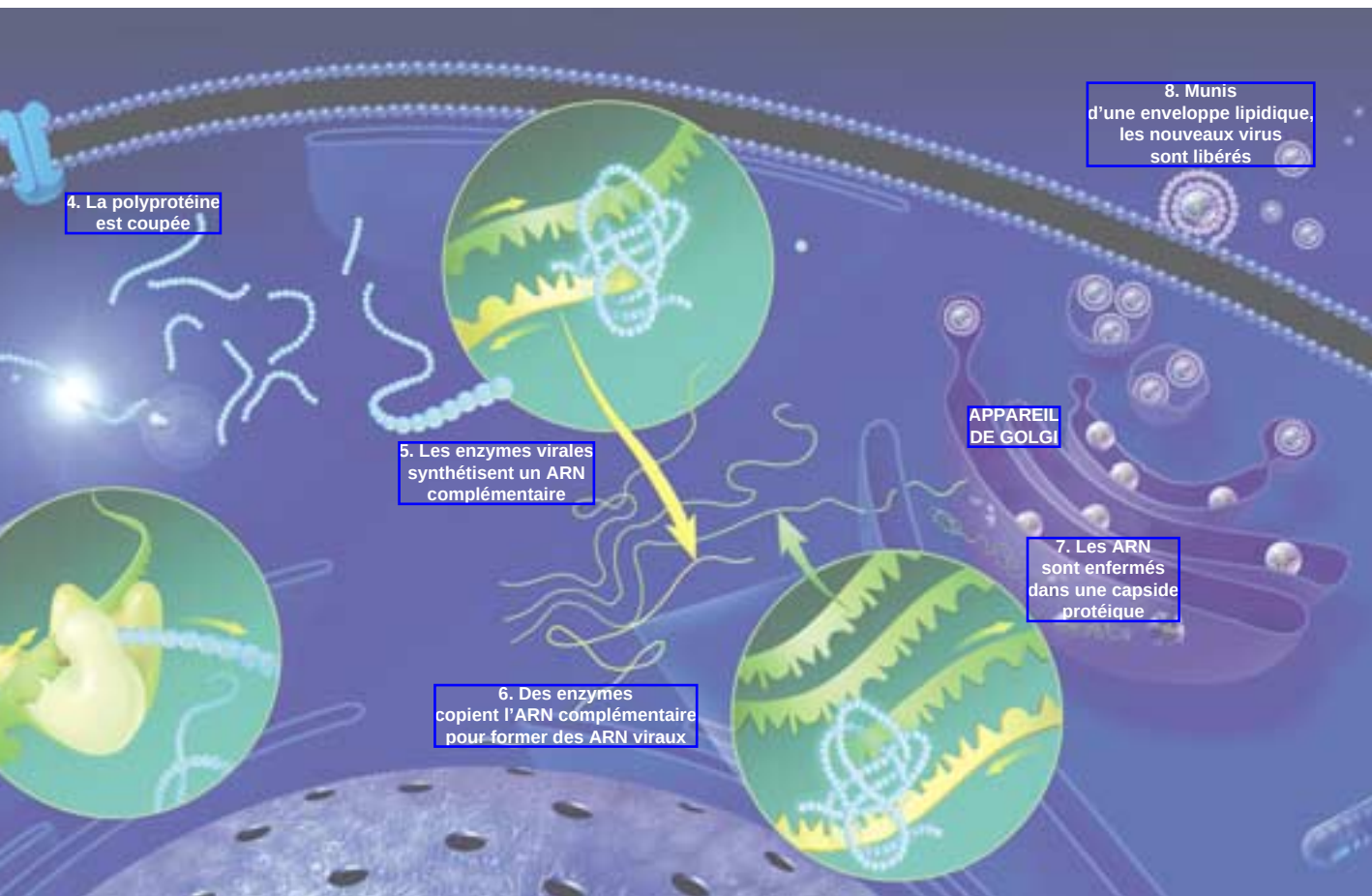
Ciblage du virus

Les virologistes qui ont exploré la structure du virus de l'hépatite C savent aujourd'hui que son génome est porté par un brin d'ARN dont la taille et l'organisation ressemblent à celles des virus de la fièvre jaune et de la dengue (une maladie infectieuse transmise par les moustiques) : le virus de l'hépatite C appartient à la même famille des *Flaviviridae*. Dans les cellules infectées, les enzymes cellulaires traduisent l'ARN viral en une grosse protéine, nommée polyprotéine, qui

est ensuite dissociée en plusieurs protéines virales. Certaines constituent la structure de nouvelles particules virales ; d'autres sont des enzymes qui répliquent l'ARN viral. Les deux extrémités de l'ARN viral ne sont pas traduites en protéine : l'une favorise la synthèse de la polyprotéine virale et constitue ainsi une cible importante pour les tests diagnostics ; l'autre intervient dans l'initiation de la réplication de l'ARN viral.

Parmi les protéines de structure (les «briques virales») figurent la protéine de la capsid (la structure qui enferme l'ARN viral) et deux protéines enchâssées dans l'enveloppe lipidique (qui recouvre la capsid). D'autre part, les protéines non structurales (les «ouvriers») sont une enzyme protéase qui découpe la polyprotéine, ainsi que d'autres enzymes responsables de certaines modifications de l'ARN viral (triphosphatase), de la réplication de l'ARN viral (polymérase) et de la réparation en simple brin des intermédiaires en double brin de la réplication (hélicase).

La structure tridimensionnelle de la protéase et de l'hélicase a été



Kellin Kassir, d'après Charles M. Rice, Tricon University Science

élucidée par cristallographie aux rayons X ; cette analyse permet la conception rationnelle d'inhibiteurs de ces enzymes. Plusieurs sociétés, notamment Schering-Plough, Agouron Pharmaceuticals, Eli Lilly et Vertex Pharmaceuticals, mettent aujourd'hui au point des inhibiteurs de la protéase et de l'hélicase de l'hépatite C. Les essais cliniques commenceront sans doute dans quelques années. La polymérase, dont on a très récemment identifié la structure tridimensionnelle, est également une cible possible.

En 1999, à Mayence, Ralf Bartenschlager et ses collègues ont étudié une molécule d'ARN qui comporte les régions codant les enzymes du virus ; cette structure qui se reproduit dans des lignées de cellules hépatiques cancéreuses sera sans doute utile pour tester des médicaments ciblés contre ces enzymes. Cependant, le virus ne développera-t-il pas une résistance vis-à-vis de ces différents agents thérapeutiques ?

On traiterait également les malades si l'on parvenait à bloquer l'activation des cellules hépatiques étoilées : on inhiberait ainsi la fibrose.

L'activation de ces cellules est commandée par des cytokines, des molécules qui agissent comme des signaux chimiques, que des cellules du foie nommées cellules de Kupffer libèrent quand elles sont stimulées par les lymphocytes. L'inhibition de ce mécanisme empêcherait la plupart des conséquences néfastes d'une infection par l'hépatite C.

Par ailleurs, la Société Ribozyme Pharmaceuticals met au point des ribozymes, c'est-à-dire de courts fragments d'ARN qui coupent des séquences particulières des petites zones terminales du génome viral. Cependant, on doit aujourd'hui administrer beaucoup de ribozymes pour qu'une quantité suffisante arrive dans les cellules infectées. C'est aussi le cas d'autres traitements novateurs, notamment la thérapie génique, destinée à rendre les cellules du foie résistantes à l'infection par l'administration d'un ARN « antisens », susceptible d'inhiber des gènes précis, ou par l'injection de protéines qui activent un mécanisme cellulaire d'autodestruction quand elles sont coupées par la protéase de l'hépatite C.

En France, le Plan de lutte contre l'hépatite C, prévu sur quatre ans, dispose d'un budget d'environ 90 millions de francs, répartis entre le renforcement de l'accès au dépistage, l'amélioration de la prise en charge, la réduction des risques de contamination, la recherche et la surveillance épidémiologique. Les autorités ont conscience de l'enjeu : l'amélioration des thérapies et la mise au point d'un vaccin en dépendent.

Adrian DI BISCEGLIE est professeur de médecine à l'École de médecine de l'Université de Saint Louis. Bruce BACON dirige le Département de gastro-entérologie et d'hépatologie de l'École de médecine de l'Université de Saint Louis.

Christian BRECHOT et Stanislas POL, *Hépatites virales*, ESTEM AUPELF-UREF, 1993.

Hépatites virales : dépistage, prévention, traitement, INSERM, 1997.

Jill-Patrice CASSUTO et Brigitte REBOULOT, *Les hépatites*, Odile Jacob, 1998.

Secrétariat d'État à la Santé et à l'Action sociale, *Les chiffres clés : SIDA et hépatite C*, Flammarion, 1999.

L'océan caché d'Europe

R. PAPPALARDO • J. HEAD • R. GREELEY

De nombreuses structures sur la fascinante surface d'Europe, le satellite glacé de Jupiter, laissent penser qu'un océan d'eau liquide se cache sous la surface. Comment en avoir la preuve?

La vie est-elle apparue ailleurs que sur Terre dans le Système solaire? Après trois décennies d'exploration des planètes et de leurs satellites naturels, les havres possibles de la vie restent peu nombreux. Le plus intrigant est sans doute Europe, un satellite de Jupiter couvert de glace.

Depuis sa découverte par Galilée en 1610 et jusqu'au milieu du XX^e siècle, Europe n'est qu'une tête d'épingle lumineuse, voisine de Jupiter, même dans les télescopes les plus puissants. Dans les années 1960, les études spectroscopiques montrent que le satellite, comme bien d'autres corps situés aux confins du Système solaire externe, est couvert de glace. À des températures superficielles de 110 kelvins (–163 °C) près de l'équateur et de 50 kelvins (–223 °C) aux pôles, cette glace doit être aussi dure que la roche. Toutefois, les astronomes n'ont alors aucun moyen de sonder plus profondément ce corps céleste et ils ne s'attendent d'ailleurs pas y trouver grand-chose.

Les images transmises par les sondes spatiales, depuis une vingtaine d'années, ont révélé une surface jeune et incroyablement déformée. Quelque part sous la croûte gelée, il y aurait un intérieur chaud et mobile. Est-ce de la glace? Ou les entrailles d'Europe sont-elles suffisamment chaudes pour abriter un océan d'eau liquide? Dans ce dernier cas, la vie serait-elle apparue au sein de ces abysses obscurs?

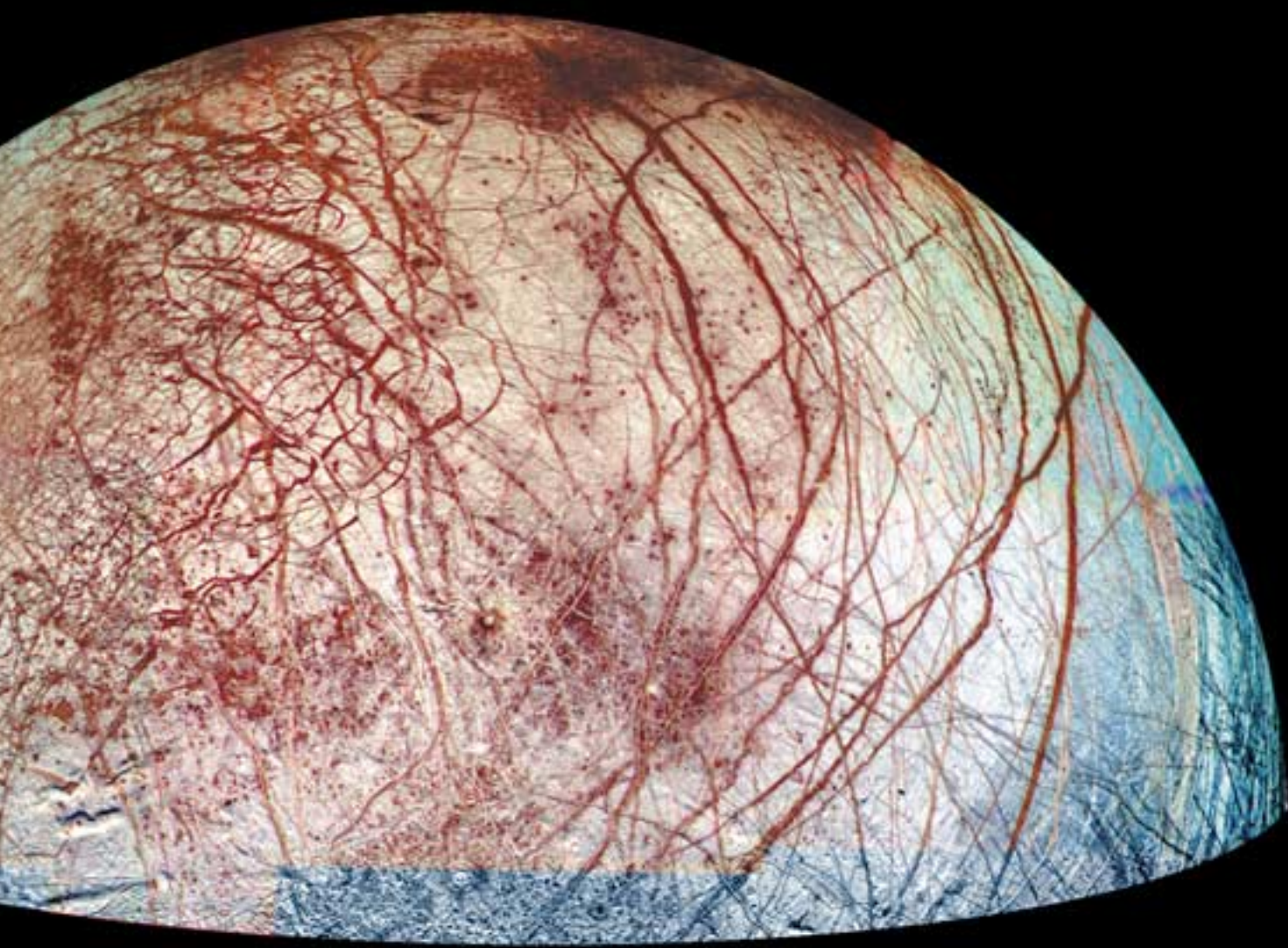
Les planétologues explorent ces questions depuis les survols de Jupiter et de ses satellites par les sondes

Voyager, en 1979 (voir *Les satellites galiléens de Jupiter*, par Laurence Soderblom, *Pour la Science*, mars 1980). En route pour Uranus et Neptune, ces sondes ne s'approchèrent pas beaucoup des satellites joviens, mais les images qu'ils envoyèrent étaient fascinantes. Europe ressemblait à une balle de corde, ses plaines brillantes traversées de bandes et de stries. Les planétologues ont remarqué que les faces opposées de certaines bandes sombres se correspondent parfaitement. D'une manière ou d'une autre, la surface gelée brillante a été violemment arrachée, exposant des matériaux sombres suffisamment fluides pour s'infiltrer dans les ouvertures : ces formations ressemblent aux craquelures pleines de liquide entre des plaques flottantes de banquise terrestre.

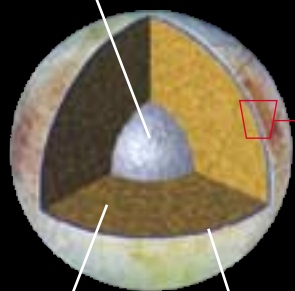
À la surprise générale, les sondes *Voyager* ont trouvé peu de grands cratères d'impact sur Europe. Or, la surface d'une planète accumule lentement les cratères, à mesure que les débris de comètes et d'astéroïdes la percutent. L'absence de cratères visibles indique donc que des événements volcaniques ou tectoniques ont façonné sa surface dans un passé relativement récent. Compte tenu du nombre de comètes croisant l'orbite de Jupiter, Eugene Shoemaker a estimé qu'un cratère de diamètre supérieur à dix kilomètres devait se former en moyenne tous les 1,5 million d'années. À partir des quelques cratères connus sur Europe, les astronomes estiment qu'Europe aurait sur sa surface 45 cratères de cette

1. EUROPE apparaît comme une coquille d'œuf fracturée. Une matière rougeâtre a suinté dans les crevasses ouvertes par les forces de marées dues à Jupiter. La rareté des cratères indique que la surface est géologiquement jeune. Les couleurs de cette photographie prise par la sonde *Galileo* sont réelles, mais accentuées. D'autres instruments de la sonde ont découvert que l'intérieur d'Europe est principalement rocheux, avec une couche externe d'eau (liquide ou solide) d'environ 100 kilomètres d'épaisseur (en bas à droite). L'essentiel de cette eau doit être liquide ou semi-liquide pour expliquer les formations superficielles, tels les tertres circulaires soulevés par des bulles ascendantes de glace relativement chaude (extrême droite), qui perforeront de temps en temps la surface.





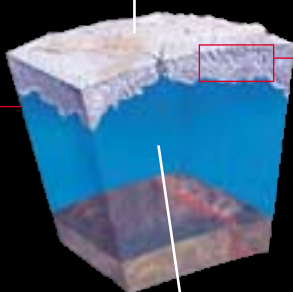
CŒUR DE FER



MANTEAU
ROCHEUX

CROÛTE
DE H₂O

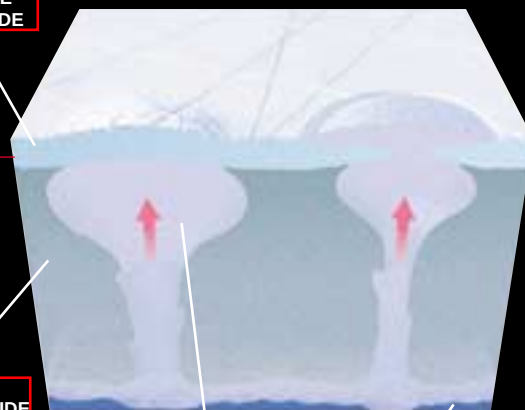
CROÛTE
DE GLACE



Océan

CROÛTE
DE SURFACE
FROIDE
ET RIGIDE

GLACE
PLUS CHAUDE
SITUÉE SOUS
LA SURFACE



BULLE
DE GLACE
CHAUDE

Océan

taille. Sa surface serait alors âgée d'à peine 30 millions d'années, un clin d'œil aux échelles géologiques. Évidemment, les grands cratères d'Europe se seraient progressivement aplatis si l'intérieur était chaud. Dans cette hypothèse, le satellite pourrait encore être actif aujourd'hui.

Ces suppositions demandaient à être confirmées, car les images de *Voyager* étaient trop imprécises ; on ne voyait pas les cratères plus petits. À certains endroits, on voyait un terrain moucheté, plein de taches sombres, de tertres et de fosses, mêlé aux plaines brillantes. Des cratères se cacheraient-ils dans ces régions curieuses, auquel cas la surface du satellite serait plus ancienne ? Du reste, comment un corps aussi petit serait-il encore actif ? Des corps de taille similaire, comme la Lune, ne sont que des sphères rocheuses inertes, depuis longtemps dépourvues de leur chaleur interne, d'origine radioactive. En toute logique, Europe devrait être maintenant froide et inerte.

Pourtant les astronomes ont découvert qu'une autre source de chaleur pouvait chauffer Europe : les effets de marées alimentent le volcanisme de Io, la voisine d'Europe. Des quatre grands satellites de Jupiter – Io,

Europe, Ganymède et Callisto –, les trois premières font partie d'une valse orbitale élégante nommée résonance de Laplace. Avec la régularité d'une horloge, chaque fois que Ganymède effectue une révolution autour de Jupiter (avec une période de 7,2 jours terrestres), Europe parcourt deux orbites (3,6 jours de période) et Io quatre orbites (1,8 jour de période). Sur leurs orbites allongées, au cours de chaque révolution orbitale, elles s'approchent, puis s'éloignent de leur planète parente. Ces forces de gravitation provoquent alors des marées hautes et basses sur chaque satellite, c'est-à-dire des déformations de ces corps, avec des frottements qui se dissipent en chaleur.

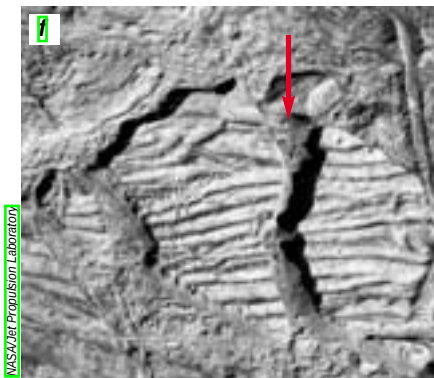
Des marées qui chauffent

Les effets de ces marées se ressentent surtout sur Io, plus proche de Jupiter. La température interne de Io, chauffée par cette dissipation, atteint le point de fusion de la roche, ce qui déclenche des éruptions volcaniques continues. Sur Europe, plus éloignée, le chauffage est moindre. Cependant, des calculs récents indiquent que son intérieur pourrait demeurer suffisamment

chaud pour fondre la glace à une profondeur de 10 à 30 kilomètres. Ainsi, sous la surface de glace, un océan couvrirait la planète.

Après les sondes *Voyager*, les astronomes ont dû attendre 20 ans avant une nouvelle exploration des satellites joviens. L'engin spatial *Galileo* s'est mis en orbite autour de Jupiter en décembre 1995. Depuis, sa trajectoire l'a conduit tous les quelques mois à proximité de l'un des satellites galiléens.

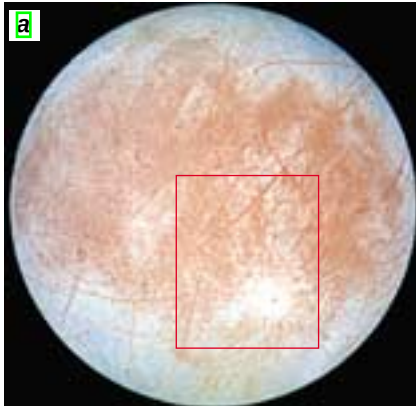
Même sans images, les informations récoltées sont primordiales. À chaque survol, les ingénieurs et les scientifiques ont enregistré le signal radio de l'astronef, afin de mesurer le champ gravitationnel d'Europe. Un satellite en rotation et déformé par effet de marée est légèrement aplati aux pôles, de sorte que le champ gravitationnel n'est pas symétrique. Cette irrégularité engendre de petits décalages de la fréquence du signal de *Galileo*, grâce auxquels les chercheurs ont calculé l'aplatissement du satellite et, par suite, la répartition de sa masse interne : à une vitesse de rotation et à masse égales, un satellite où la masse est plus concentrée est moins aplati qu'un satellite dont la masse est uniformément répartie.



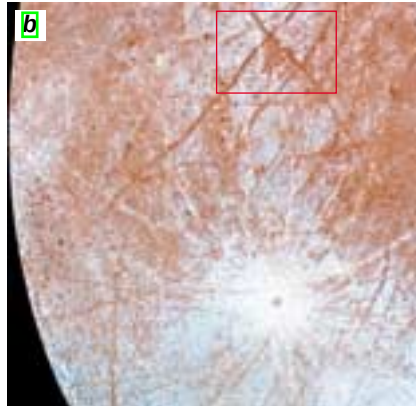
1 KILOMETRE

2. DES BLOCS DE GLACE GEANTS de la taille d'une petite ville apparaissent progressivement sur cette série d'images de *Galileo*. Un colossal X formé de deux rides (a, b, c) marque l'endroit, alors que les images font un zoom avant sur une tache sombre nommée «Chaos de Conamara» (d, e) et ensuite sur des blocs individuels de type iceberg (f). De la glace plus chaude que celle de surface, une bouillie glacée ou de l'eau, ont jadis comblé la «mer» où les blocs sont maintenant immobiles. Une vue d'artiste (à droite), donne un point de vue à quelques centaines de mètres au-dessus de la surface (flèche dans l'image supérieure).





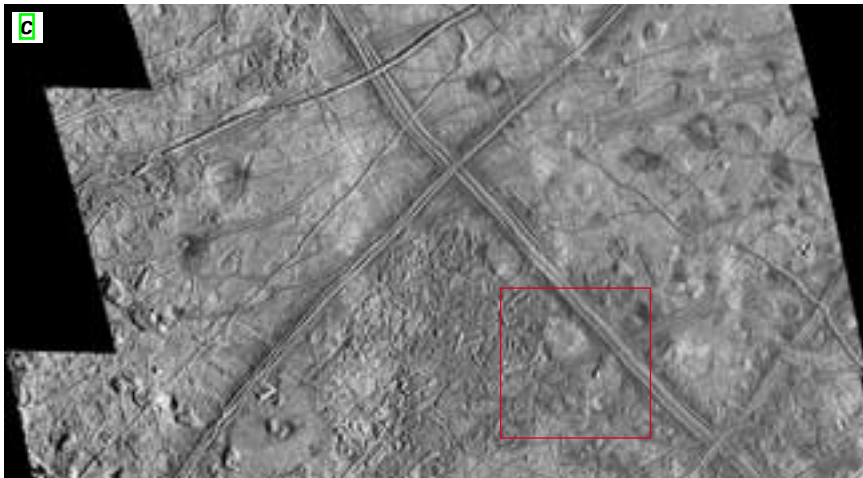
EUROPE



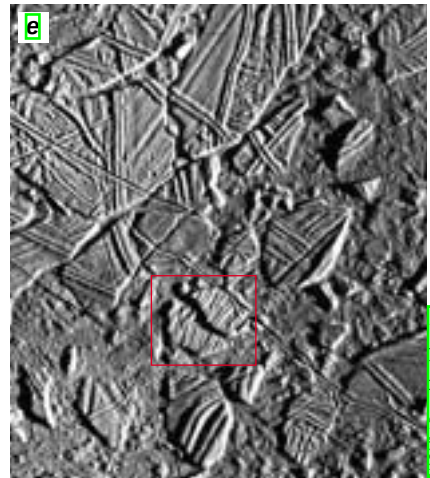
100 KILOMETRES



10 KILOMETRES



20 KILOMETRES

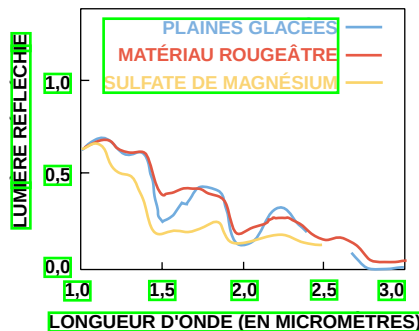


5 KILOMETRES

NASA/JPL/Protonvision Laboratory



© 1999 JPL/NASA



3. UNE TACHE ROUGEÂTRE indique l'endroit où un liquide salin s'est répandu sur la surface d'Europe (à gauche). Des mesures spectrales (à droite) ont montré que les plaines brillantes environnantes (courbe bleue) se composent principalement d'eau gelée. Le matériau rougeâtre (courbe rouge) a un spectre lumineux qui semble être celui du sulfate de magnésium (courbe jaune).

Rapisseries et soutènement hydraulique

Avec une densité moyenne de 3,04 grammes par centimètre cube, Europe est certainement un corps rocheux. Les données gravimétriques indiquent que la roche s'intercale entre un noyau central de fer et une croûte externe d'eau ou de glace. L'épaisseur de cette croûte est comprise entre 80 et 170 kilomètres, selon les densités possibles pour le noyau de fer et pour le manteau rocheux, avec 100 kilomètres comme valeur la plus probable. Si une partie notable de cette croûte est liquide, son volume est supérieur à celui de tous les océans terrestres. Toutefois les données gravimétriques sont insuffisantes pour savoir si l'eau est liquide ou solide. L'examen des photographies en dit-il plus?

L'équipe d'imagerie de *Galileo* a découvert un monde à nul autre pareil. Sa surface forme un entrelacs compliqué de fractures, de rides, de bandes et de taches. Les fractures sont sans doute nées quand les forces de marées ont déformé la surface gelée jusqu'à ce qu'elle cède. Les rides, également très nombreuses, courent en surface par paires, séparées par une vallée étroite. Les planétologues envisagent une résurgence d'eau liquide ou de glace chaude le long des fractures. Un «magma» aqueux ou verglacé a pu forcer le passage sous de la glace rigide, proche de la surface, la gauchissant en une double ride. Une bouillie glacée a aussi pu jaillir en surface et se solidifier aussitôt en forme de ride. Par endroits, les rides parallèles sont nombreuses : on suppose que le mécanisme de formation de doubles rides s'est répété. Les plus larges sont en général flanquées de

raies sombres, rougeâtres, aux bords diffus : la bouffée de chaleur associée à la formation des rides a-t-elle tracé ces frontières assombries, par volcanisme de glace partiellement fondue ou par sublimation de la surface sale gelée? Quel que soit le mécanisme exact de formation, les rides révèlent une histoire dynamique d'Europe et un échauffement sous la surface.

À partir des enchevêtrements de fractures et de rides apparemment aléatoires, les astronomes ont essayé de comprendre les mécanismes responsables de l'étirement et de la déformation d'Europe. L'échauffement par effet de marées engendre des structures particulières, et explique certaines fissures et rides les plus récentes. Toutefois, les contraintes responsables des fissures semblent s'être aussi déplacées.

Cette particularité s'explique si la surface d'Europe a tourné plus vite que son intérieur. La plupart des satellites naturels du Système solaire sont en rotation synchrone : sous l'action du couple des forces de marées, ils tournent sur eux-mêmes exactement une fois par révolution orbitale, montrant toujours la même face à leurs planètes parentes (c'est pour cette raison que nous voyons toujours la même face de la Lune). Si la surface gelée d'Europe était découplée – séparée mécaniquement – de son manteau rocheux, la gravité de Jupiter engendrerait une rotation de la surface d'Europe légèrement plus rapide que celle du noyau. Un océan sous la surface agirait comme un lubrifiant et permettrait à la couche de glace de tourner de manière asynchrone.

Rien ne permet d'affirmer que la rotation asynchrone d'Europe se poursuit aujourd'hui ou que la sur-

face enregistre un ancien motif d'alignements structuraux, aujourd'hui inactifs. Les planétologues ont comparé les positions de certaines structures dans les images de *Galileo* à leurs positions dans les images de *Voyager* et n'ont trouvé aucun changement mesurable sur cette période de 20 ans. Aujourd'hui, on sait seulement que la différence de vitesse de rotation entre la surface et l'intérieur, si elle existe, est inférieure à un tour tous les 10 000 ans.

La caméra de *Galileo* a aussi visé les bandes sombres en forme de coin, où les images imprécises de *Voyager* indiquaient que les bandes parsemées de rides étaient séparées. Des analyses récentes ont confirmé que les faces opposées de ces bandes se correspondent parfaitement. La matière sombre entre ces bandes est finement striée avec, en général, une rainure prononcée et un certain degré de symétrie (voir la figure 5). Ces bandes sont peut-être les équivalents gelés des dorsales océaniques terrestres, où les plaques tectoniques s'écartent et où du magma sort, formant de nouvelles roches. Si c'est le cas, la glace sous la surface a dû être mobile et chaude lors de la formation des structures. Sur Terre, la tectonique des plaques impose un bilan de matière nul : la matière qui s'épanche en surface est compensée par de la matière qui plonge dans les zones de subduction. Aucune zone de ce genre n'a encore été identifiée sur Europe.

L'apparition de bulles

Le mystérieux terrain moucheté fournit d'autres indices sur l'intérieur d'Europe. Les images que *Galileo* en a prises ont 10 à 100 fois plus de détails que celles de *Voyager*. Les images montrent un terrain criblé de structures circulaires et elliptiques que l'équipe d'imagerie a nommées *lenticulae*, mot latin qui signifie «taches de rousseur». Beaucoup de ces structures sont des dômes, certaines sont des fosses, d'autres sont des taches sombres lisses ; d'autres encore ont une texture rugueuse et brouillée. Les sommets des dômes ressemblent à des parties de plaines ridées, plus anciennes, signe que les dômes ont dû se former lors du soulèvement de plaines.

La diversité des *lenticulae* s'explique si l'on suppose que la couche gelée

d'Europe s'est comportée comme une lampe à lave planétaire : des bulles de glace chaude montent à travers de la glace de surface plus froide (dans les lampes à lave, des bulles d'huile montent et descendent dans de l'alcool).

Les dômes se sont alors formés lorsque les bulles ont poussé contre la base de la surface. Les textures rugueuses correspondent peut-être aux endroits où les bulles ont disloqué et détruit les plaines ; les flaques sombres et lisses

seraient alors, sans doute, de l'eau de fonte libérée par les bulles et rapidement regelée.

Les bulles – diapirs, en langage technique – se formeraient naturellement si la couche gelée d'Europe



VASQUE Propulsion Laboratory Cynthia Phillips University of Arizona

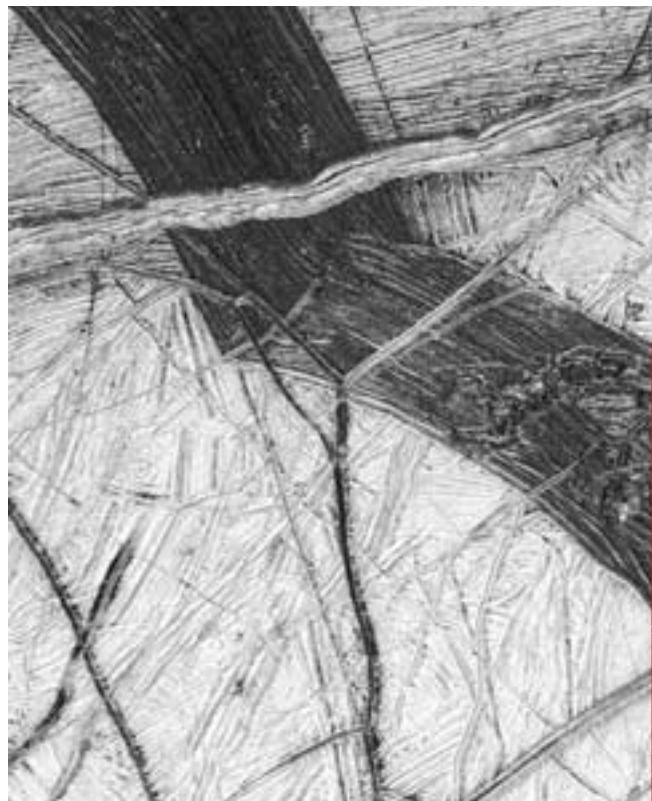
4. CETTE TEXTURE RIDÉE est l'un des paysages les plus étranges du Système solaire. La région de Thera (partie gauche de la mosaïque) contient des plaques de glace brillantes et détachées. La région de Thrace (partie droite) est allongée, couverte de monticules, et son

altitude est supérieure. Elle se jette dans une bande grise, Linea Libya, vers le Sud. Ces régions chaotiques se sont peut-être formées quand un océan souterrain a dissous la croûte glacée du satellite ou quand des bulles ascendantes de glace plus chaude ont disloqué la surface.



Max Cook Northwest Research Associates

5. LES FRACTURES DANS LA GLACE sur Terre (à gauche) ressemblent superficiellement à celles que l'on voit sur Europe (à droite). Dans les mers polaires terrestres, la banquise se brise et expose de l'eau liquide, plus sombre, qui gèle rapidement. Les fissures peuvent se refermer et soulever des rides. Sur Europe, les bandes sombres et les rides appariées résultent probablement de mécanismes de tectonique. L'échelle est très différente : la brèche dans la glace de mer est large de 100 mètres, tandis que la bande sombre sur Europe mesure plus de 15 kilomètres de largeur.



VASQUE Propulsion Laboratory Roland Wagner German Aerospace Research Agency

flottait sur de l'eau liquide. Dans cette hypothèse, les effets de marées pomperaient de la chaleur à la base de la couche, où la glace est proche de sa température de fusion et plus facile à déformer. La glace chaude, moins dense que la glace froide située au-dessus, tend à monter. Si la couche gelée est suffisamment épaisse, la poussée d'Archimède peut vaincre la résistance visqueuse (qui diminue avec la profondeur). Comme l'huile montant dans une lampe à lave, les diapirs de glace chaude montent vers la surface, où ils peuvent engendrer les *lenticulae* visibles. Selon ce modèle, la couche de glace aurait une épaisseur d'au moins dix kilomètres.

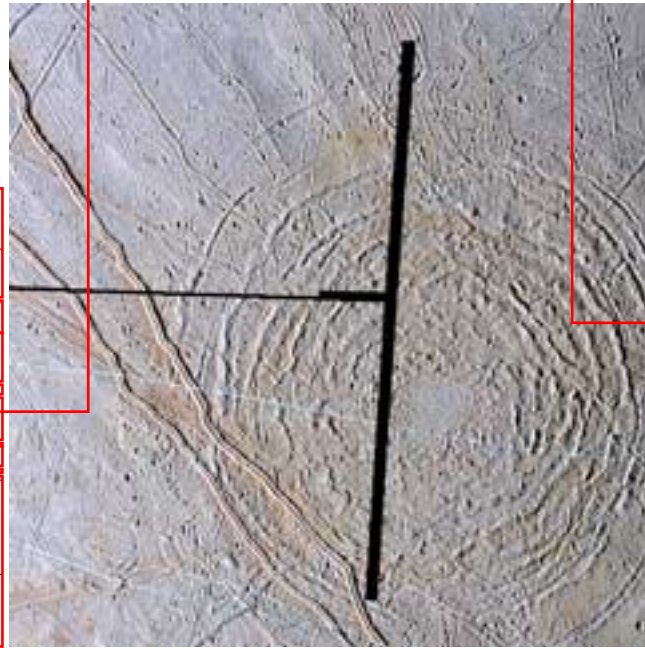
Le terrain qui apparaît moucheté sur les images contient l'une des caractéristiques les plus spectaculaires d'Europe : les régions de «chaos». Dans ces zones désordonnées, de petits vestiges glacés d'anciennes plaines ridées semblent avoir joué des coudes dans une matrice mamelonnée – comme des icebergs se déplaçant dans une mer de glace partiellement fondue. La disposition initiale de ces icebergs peut être reconstruite comme un puzzle : c'est ce que l'on a fait pour la région du Chaos de Conamara (voir la figure 8). Si ces régions se sont formées lorsque de l'eau située sous la surface a coulé à travers la croûte glacée d'Europe et a regelé, l'analogie avec les icebergs est sans doute appropriée.

Une autre possibilité serait qu'un ou plusieurs diapirs aient jailli et chauffé la glace proche de la surface, créant un lit de glace partiellement fondue et de liquide sur lequel les blocs de glace brisés et délogés auraient glissé. Quelle que soit l'explication de leur genèse, les régions de chaos témoignent d'une «subsurface» chaude et d'une fusion au moins partielle.

Les petits cratères d'impact sont étrangement absents dans ce terrain moucheté : la surface d'Europe doit être jeune. En se fondant sur les estimations de Shoemaker, les planétologues ont modélisé les comètes et les astéroïdes du Système solaire pour

comprendre leur taux de collision avec Europe. Ils ont ainsi confirmé l'idée initiale de Shoemaker : les comètes sont les principaux projectiles qui chutent sur les satellites de Jupiter, les astéroïdes étant trop peu nombreux. Les estimations récentes conduisent à un âge, pour le paysage aux cratères clairsemés d'Europe, compris entre 10 et 250 millions d'années, très bref à l'échelle géologique. Ainsi, il est probable qu'Europe soit toujours active aujourd'hui, même si on n'a pas découvert de volcans qui éjectent de grands panaches, comme ceux qui couvrent Io.

Les quelques cratères que compte la surface d'Europe sont révélateurs de la croûte de glace. Contrairement aux cratères d'impact en forme de bol ou à fond plat sur d'autres mondes, les deux structures d'impact les plus grandes sur Europe se composent d'une dépression centrale lisse entourée d'anneaux concentriques (voir la figure 6). Les collisions qui ont engendré ces structures ont dû pénétrer dans la glace rigide proche de la surface jusqu'à une couche inférieure plus malléable. Comme la couche malléable ne pouvait conserver la forme d'un cratère, de la glace partiellement fondue a rapidement comblé celui-ci, entraînant en profondeur la glace proche de la surface et fracturant la surface en anneaux concentriques. Les anneaux sont comme les ronds gelés d'une pierre jetée dans un étang, une énorme pierre dans un étang gigantesque. À partir des cicatrices visibles, les planétologues ont estimé les dimensions de l'impact initial : la couche malléable se situerait entre 6 et 15 kilomètres de profondeur. On a ainsi corroboré la théorie de l'échauffement par les marées et le modèle des bulles. Toutefois, selon des planétologues, certaines zones de la croûte de glace



6. LE SITE D'IMPACT DE TYRE MACULA, l'un des rares grands cratères d'Europe, semble indiquer la présence d'eau liquide sous la glace. La dépression centrale a un diamètre d'environ 40 kilomètres. Les anneaux concentriques sont des fractures qui ont été créées lorsque le cratère s'est effondré vers l'intérieur. Des petits cratères secondaires, créés par les éjectats, criblent la surface. Les lignes noires indiquent des données manquantes.



7. LA DANSE ORBITALE des principaux satellites de Jupiter impose à Europe une orbite allongée. De ce fait, les forces de marées solides exercées par Jupiter, qui étirent Europe en une forme oblongue, sont plus intenses en certains points de l'orbite qu'en d'autres (l'échelle n'est pas respectée).

Un lac oublié par le temps

Le lac Vostok, dans l'Antarctique, est réellement un trou perdu. Pour s'y rendre, il faut d'abord rejoindre une base scientifique russe, et affronter un climat considéré comme le pire au monde. Ensuite, il faut creuser la glace sur quatre kilomètres de profondeur. Là, isolé du monde depuis plusieurs millions d'années, s'étend un réservoir d'eau pure d'une superficie deux fois égale à celle de la Corse et profond de 600 mètres. C'est le meilleur analogue terrestre de l'océan que l'on cherche sur Europe.

Les premiers signes de l'existence du lac perdu remontent aux années 1970 ; ils furent donnés par des sondages aériens par radar ! Le signal radar traverse la glace et se réfléchit sur la roche ou sur l'eau sous-jacentes. L'intensité du signal réfléchi et la géométrie plate de la surface située sous la glace révélaient un lac, ce qui fut confirmé par un réexamen d'anciennes données sismiques russes. Toutefois, les géologues n'ont compris la véritable étendue du lac qu'en 1996, après un sondage de sa couverture de glace par le satellite ERS. Personne n'a encore foré jusqu'au lac.

Le sommet de la glace culmine à 3 700 mètres d'altitude, et la surface du lac se trouve juste sous le niveau de la mer. D'après les contours du socle rocheux environnant, le bassin du lac serait une fosse tectonique – une zone de rupture de la terre, comme celles qui sont comblées par le lac Baïkal et la mer Rouge. Pourquoi y trouve-t-on de l'eau plutôt que de la glace ? Certains indices géologiques indiquent la présence d'un point chaud semblable (mais plus petit) à celui qui a créé les îles d'Hawaii. La surface de glace agit comme bouclier thermique, ce qui permet à la chaleur des entrailles de la terre de s'accumuler. La température locale, sous la glace, serait ainsi supérieure à la température de fusion de l'eau. De fait, les lacs subglaciaires ne sont pas rares dans l'Antarctique ; Vostok est simplement le plus grand.

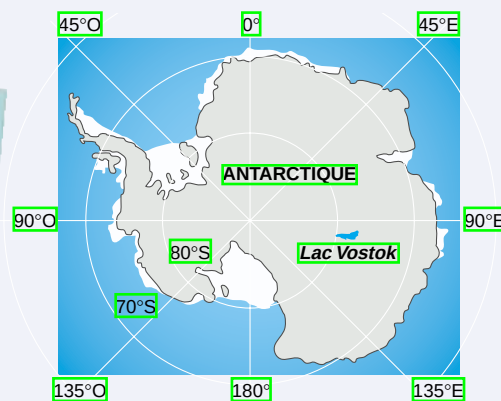
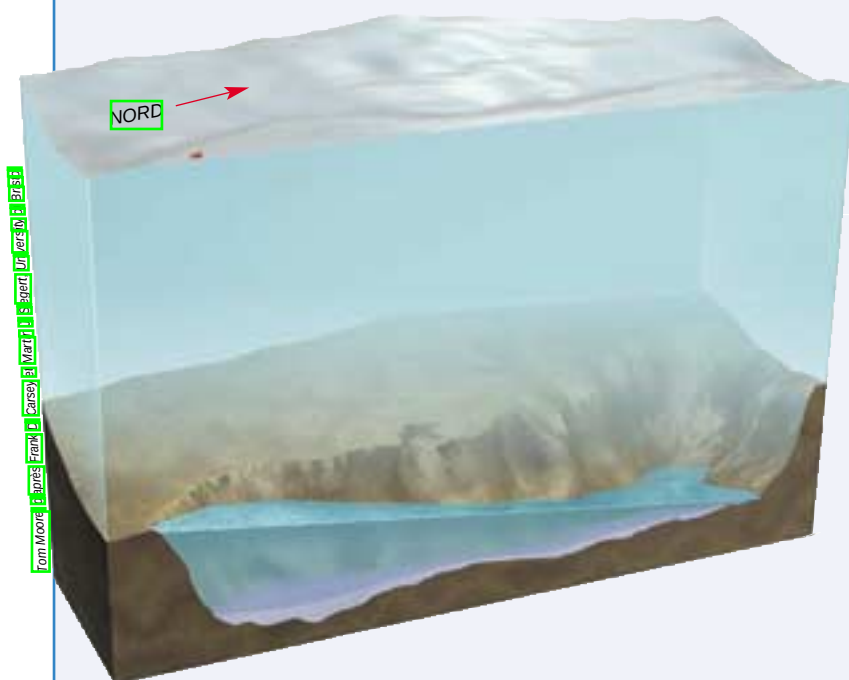
Les eaux pures du lac Vostok intéressent beaucoup les biologistes qui étudient l'évolution des micro-organismes. Depuis des années, on détecte des micro-organismes dans des environnements hostiles qui ont en commun la présence d'eau : autour

d'événements volcaniques sous-marins, dans des lacs de l'Antarctique moins profonds et couverts de glace. Quand la sonde *Galileo* a trouvé qu'Europe pouvait abriter un océan sous la glace, les biologistes, qui ne pouvaient explorer Europe, se sont rabattus sur le lac Vostok. L'épaisseur de la couche de glace au-dessus du lac et sur Europe est similaire ; excepté les pressions inférieures sur Europe (la gravité à la surface est sept fois plus faible que celle à la surface de la Terre), les conditions y sont comparables. Si la vie a colonisé le lac Vostok, pourquoi n'aurait-elle pas trouvé une niche sur Europe ?

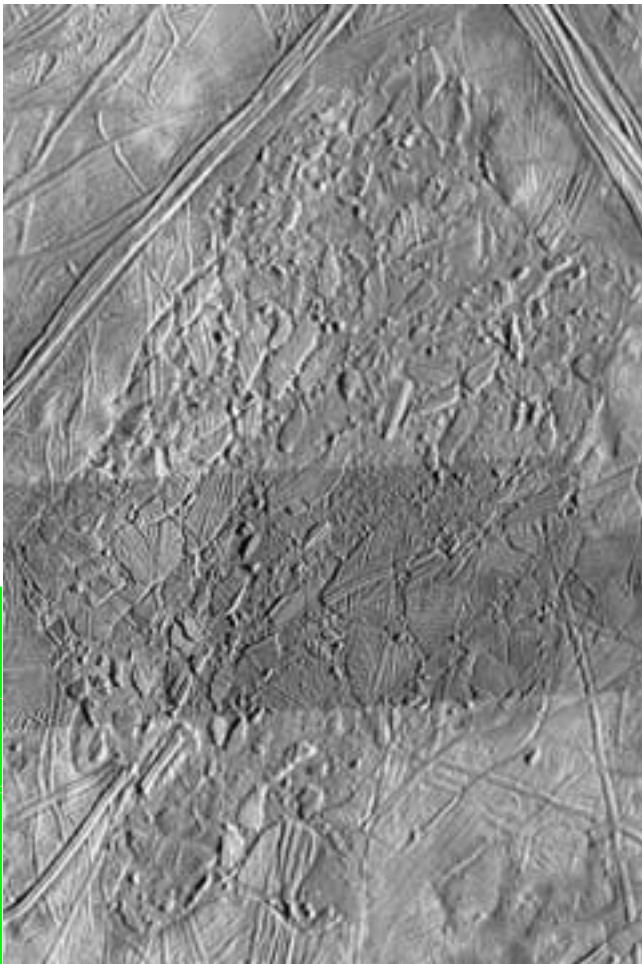
Avec d'autres membres du Laboratoire américain de propulsion spatiale (JPL), nous avons proposé l'exploration parallèle du lac Vostok et d'Europe : l'exploration du lac bénéficierait des techniques mises au point pour Europe, et un robot explorateur d'Europe ferait ses preuves sur Terre. On envisage deux systèmes complémentaires : un « cryorobot » s'enfoncerait dans la glace en faisant fondre son chemin de devant lui, et un petit sous-marin, ou « hydrobot », chercherait des traces de vie et effectuerait des analyses chimiques du milieu.

Seul un gros robot blindé supporterait les pressions élevées des mers de subsurface d'Europe. Un tel système sera difficile à expédier sur Europe. L'hydrobot doit être autonome et capable de réagir à un environnement complexe de fissures, de rochers, etc. Ses capteurs doivent étudier l'environnement et rechercher des micro-organismes, même s'ils sont très probablement différents de ceux qui sont vus ailleurs. De surcroît, les deux dispositifs doivent être totalement stériles, afin de ne pas contaminer l'eau avec des micro-organismes terrestres. On ne sait pas, aujourd'hui, construire un tel système, mais les progrès sont rapides. On envisage de commencer l'exploration de Vostok en 2003, et de rechercher l'océan d'Europe dix ans plus tard.

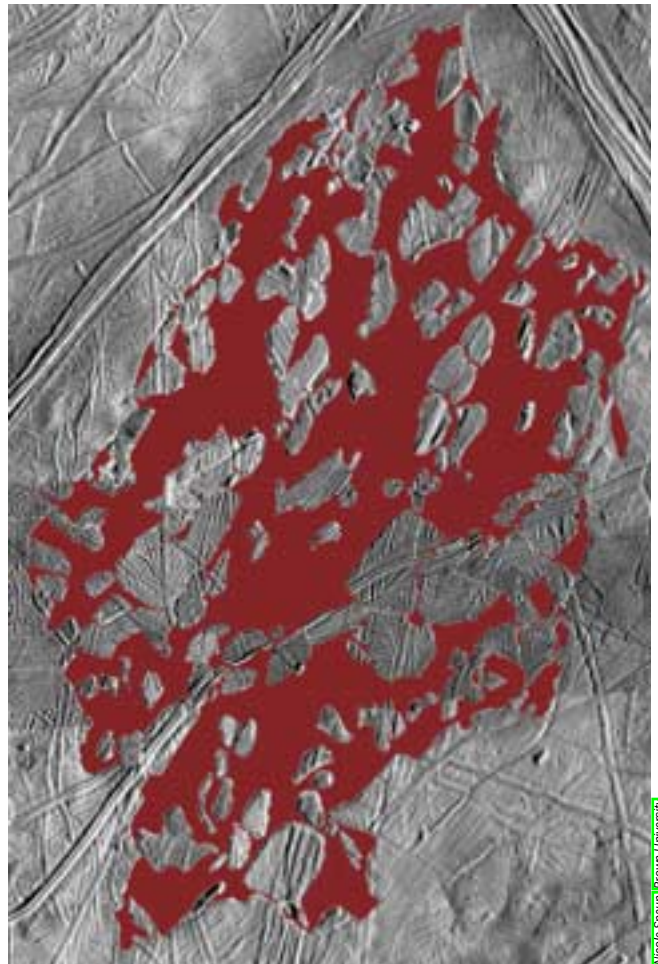
Frank CARSEY et Joan HORVATH
dirigent le projet Europe/Lac Vostok
au Laboratoire américain de propulsion spatiale (JPL),
à Pasadena.



LE LAC VOSTOK, blotti dans un fossé tectonique de l'Antarctique orientale, est couvert d'une couche de glace de quatre kilomètres d'épaisseur. Au-dessus du lac, la glace flotte comme un iceberg (à gauche) ; pour soutenir une légère montée de la surface de la glace, la surface du lac s'enfonce d'environ 400 mètres, du Sud au Nord. Le fond est peut-être tapissé de sédiments. La station russe Vostok (point rouge) se trouve à la verticale de la pointe Sud (l'échelle verticale est déformée).



8. LE CHAOS DE CONAMARA peut être reconstitué comme un puzzle. La sonde Galileo a observé un fatras de blocs de glace enchevêtrés dans un substrat de glace (à gauche). Dans leur reconstruction (à droite), les planétologues ont identifié le substrat (en



rouge) et remis les blocs de glace à leurs positions originales du mieux possible. Plus de la moitié des pièces manquent, transformées dans le substrat. Cette région accidentée témoigne de la vivacité géologique d'Europe.

d'Europe pourraient être sensiblement plus minces que d'autres.

Les bandes de NIMS

En plus de sa caméra, la sonde *Galileo* a emporté un spectro-imageur (l'instrument NIMS), qui analysait les rayonnements infrarouges proches. Ainsi, on a recueilli les rayonnements réfléchis par la surface d'Europe : comme prévu, le spectromètre a détecté des bandes spectrales caractéristiques de l'eau gelée. Toutefois, les bandes sont déformées, comme si une impureté était mélangée à la glace, notamment dans les régions qui apparaissent sombres et rougeâtres aux longueurs d'onde visibles. L'identité du composé qui rougit l'eau reste inconnue, mais on soupçonne des composés du soufre ou du fer. Avant la mission *Galileo*, quelques planétologues avaient prédit que les eaux de l'éventuel océan interne d'Europe seraient salées, car de nombreuses

météorites contiennent des sels. Les matériaux superficiels d'Europe révèlent peut-être la chimie d'un océan saumâtre caché.

Deux autres instruments de *Galileo* ont également étayé l'hypothèse océanique. Le photopolarimètre-radiomètre a mesuré les températures de la surface du satellite. Les hautes latitudes sont anormalement plus chaudes la nuit (d'environ cinq degrés) que les régions équatoriales. Cette différence confirmerait qu'en plus du faible chauffage externe par le Soleil, Europe possède une forte source interne de chaleur : comme nous l'avons vu, on soupçonne le chauffage par effet de marées (on exclut une source de chaleur intrinsèque, car, dans ce cas, Europe serait homogène).

L'équipe qui s'occupe du magnétomètre de *Galileo* a obtenu l'une des informations les plus fascinantes sur l'état actuel de l'intérieur d'Europe. Les satellites galiléens sont plon-

gés dans le puissant champ magnétique de Jupiter. Les mesures du champ ambiant dans le voisinage d'Europe montrent des déviations associées au satellite. Pourquoi ces déviations ? Un champ magnétique intrinsèque à Europe les expliquerait si l'axe magnétique était très incliné par rapport à l'axe de rotation. D'autres solutions sont possibles. Notamment la subsurface d'Europe pourrait être un conducteur électrique où le champ magnétique jovien variable induirait un champ magnétique. Dans cette seconde hypothèse, la conductivité du conducteur interne devrait être au moins celle de l'eau de mer salée.

Le problème n'est pas simple, car le magnétomètre a aussi détecté un champ similaire près de Callisto, un satellite dont la surface couverte de cratères ne donne aucun signe d'un océan sous la surface. Les autres grands satellites du Système solaire posséderaient-ils un océan interne

salé, vestige de leurs passés plus chauds? Lors du dernier survol d'Europe, le 3 janvier 2000, le magnétomètre a mesuré un champ magnétique variable avec un pôle Nord magnétique qui se déplace. Ce dernier résultat corrobore l'hypothèse d'un champ induit et d'une surface à la conductivité analogue à celle de l'eau salée.

Les arguments théoriques et expérimentaux en faveur d'un océan global situé sous la surface d'Europe s'accumulent. Pourtant, la présence de cet océan n'est pas démontrée : la présence de glace chaude, sous la surface, conduirait à de nombreux effets analogues à ceux qui apparaîtraient si un océan est caché sous la glace de surface. Bien que la surface du satellite ait peu de cratères et qu'elle soit probablement jeune, on n'a pas la preuve que le satellite soit encore le siège d'une activité géologique. Europe aurait eu naguère un océan, qui serait aujourd'hui complètement gelé. La seule manière de s'en assurer sera de placer un engin spatial en orbite autour d'Europe.

La sonde *Europa Orbiter* de la NASA devrait quitter la Terre en 2003 et se mettre en orbite autour de Jupiter quatre ans plus tard. Après deux autres années, elle tournera autour d'Europe à une altitude moyenne de 200 kilomètres. En suivant précisément sa trajectoire et son altitude, on explorera le champ gravitationnel et la forme d'Europe avec suffisamment de détails pour détecter les marées solides, lors de l'orbite du satellite autour de Jupiter. Si Europe possède une mer interne, sa surface devrait monter et descendre de 30 mètres à chaque orbite de 3,6 jours ; sans océan, le renflement ne serait que de un mètre. Ainsi *Europa Orbiter* dénouera la question de l'existence d'un océan.

Entre-temps, une caméra embarquée photographiera le satellite, et un radar sondera la subsurface en quête de zones de fonte peu profondes. On espère que les ondes radar pénétreront dans la croûte de glace d'Europe, détecteront un océan sous-jacent, de la même manière que le lac Vostok, dans l'Antarctique, a récemment été découvert par radar, sous quatre kilomètres de glace froide (voir l'encadré de la page 51).

La vie semble nécessiter trois ingrédients fondamentaux : l'énergie, le carbone et l'eau liquide. Europe pourrait posséder les trois. Les effets de marées chaufferaient le manteau rocheux et

conduiraient à du volcanisme au fond de l'océan d'Europe. Dans les régions volcaniques des fonds océaniques terrestres, l'eau circule à travers la roche chaude et arrive dans la mer, enrichie en substances chimiques nutritives. Des communautés biologiques prospèrent autour de ces sources chaudes. Cependant, elles dépendent pour une grande part de l'écosystème de surface ; plus particulièrement, l'oxygène dissous dans l'eau de mer provient de la photosynthèse (voir *Les sources chaudes des fonds océaniques*, par John Edmond et Karen von Damm, *Pour la Science*, juin 1983). Sur Europe, une vie abyssale serait autonome. Les ressources d'énergie chimique disponibles seraient très limitées. Une vie microbienne pourrait sans doute se développer, mais pas des organismes biologiquement complexes et variés comme ceux qui peuplent les océans terrestres.

Si la mission *Europa Orbiter* confirme l'existence d'un océan de subsurface, on voudra l'explorer. Un petit module d'atterrissage automatique pourrait analyser un échantillon de glace à la recherche de composés organiques. Un robot sous-marin pourrait se frayer un chemin à travers la croûte de glace et explorer les eaux salines d'Europe afin de répondre à la lancinante question : sommes-nous seuls dans le Système solaire?

Robert PAPPALARDO et James HEAD sont chercheurs à l'Université Brown. Ronald GREELEY est professeur de planétologie à l'Université d'Arizona. Ils travaillent tous les trois dans l'équipe d'imagerie de *Galileo*.

Baerbel K. LUCCHITTA et Laurence A. SODERBLOM, *Geology of Europa*, in *Satellites of Jupiter*, sous la direction de David Morrison, University of Arizona Press, 1982.

Michael H. CARR et al., *Evidence for a Subsurface Ocean on Europa*, in *Nature*, vol. 391, pp. 363-365, 22 janvier 1998.

Ronald GREELEY et al., *Europa : Initial Galileo Geological Observation*, in *Icarus*, vol. 135, pp. 4-24, septembre 1998.

The New Solar System, 4^e édition, sous la direction de J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Petersen et Andrew Chaikin, Cambridge University Press, 1998.

Une liste de sites sur Europe se trouve à l'adresse : www.pourlascience.com/numeros/pls-268/europe.htm

La narcolepsie

JEROME SIEGEL

Lorsqu'elles sont émuës, par exemple, les personnes qui souffrent de narcolepsie s'effondrent, paralysées, mais conscientes. La médecine découvre les causes de cette maladie handicapante.

Riant d'une histoire drôle que des amis lui racontent, une adolescente tombe soudain à terre, incapable du moindre mouvement. Elle entend ses parents qui rassurent ses amis : elle sera sur pied dans quelques minutes, disent-ils. Pourtant la crise se prolonge, et l'adolescente est gênée de voir ses amis partir. Ils lui disent au revoir, mais elle ne peut leur répondre. Elle ne peut ni parler ni bouger, mais sa vigilance est totale par ailleurs : elle perçoit, entend et se souvient de tout ce qui se produit autour d'elle. L'épisode dure cinq bonnes minutes ; puis, soudain, la jeune fille redevient capable de bouger, elle se relève et reprend une vie normale. Cette cataplexie aura été plus longue que les crises habituelles, qui ne durent que quelques secondes, mais elle n'est pas la plus grave : une fois, la jeune fille est restée en cataplexie pendant 25 minutes.

La maladie caractérisée par ces attaques est la narcolepsie. La cataplexie, ou perte de tonicité des muscles du squelette sans perte de conscience, est déclenchée par le rire, la gêne, un sentiment d'oppression en public, une colère soudaine, un effort physique, une relation sexuelle... Les personnes atteintes de narcolepsie sont anormalement somnolentes : quand on reste sans dormir pendant 48 heures, on ressent ce que vit quotidiennement un narcoleptique. Pourtant, malgré cette somnolence, les personnes atteintes de narcolepsie dorment mal la nuit et, si une courte sieste les ragaillardit, la somnolence revient nécessairement. Pis encore, les malades s'endorment à des moments dangereux : sans traitement, ils risquent des accidents de voiture, par exemple. Et, évidemment, ils ont des difficultés scolaires ou professionnelles.

Depuis quelques années, des médecins explorent cette maladie étonnamment courante. Avec mes collègues, par

exemple, nous avons identifié les régions cérébrales qui semblent intervenir dans la cataplexie : nous avons découvert que ces régions sont celles qui, normalement, nous empêchent de faire les gestes dont nous rêvons, au cours du sommeil (par exemple, ces régions nous empêchent de battre des jambes lorsque nous rêvons que nous courons). Nous avons également identifié une dégénérescence neuronale caractéristique, chez les personnes atteintes de narcolepsie. D'autres médecins ont isolé un gène dont la mutation provoque la narcolepsie chez le chien. La narcolepsie pourrait être une maladie auto-immune : le système immunitaire attaque le tissu cérébral sain comme s'il était d'origine étrangère.

La cataplexie et la somnolence s'accompagnent parfois d'autres symptômes extraordinaires : une «paralysie du sommeil» et des «hallucinations hypnagogiques», par exemple. La paralysie du sommeil est l'incapacité à produire le moindre mouvement lorsqu'on s'endort ou qu'on se réveille. Les individus normaux ont parfois, au cours de leur existence, quelques brèves périodes de paralysie du sommeil ; toutefois certains narcoleptiques souffrent quotidiennement de ce trouble. D'autre part, les hallucinations hypnagogiques sont des expériences semblables à des rêves qui interviennent en état de veille et incluent souvent des éléments de l'environnement. Elles ont généralement lieu lorsque les narcoleptiques sont particulièrement endormis. Chaque malade présente des formes particulières des divers troubles narcoleptiques ; les degrés de cataplexie et de somnolence, par exemple, varient selon les individus.

La narcolepsie est fréquente. Elle frappe généralement une personne sur 3 000, en moyenne, avec de fortes inégalités selon les pays : alors qu'une personne sur 500 000 seulement est atteinte

en Israël, une sur 600 l'est au Japon. La constitution génétique et l'environnement semblent expliquer ces variations. Les premiers signes de la narcolepsie surviennent habituellement entre 10 et 30 ans ; les symptômes s'aggravent pendant quelques années, puis sont stationnaires.

Sommeil et narcolepsie

La narcolepsie est associée à une anomalie du sommeil. Normalement, le cycle du sommeil comporte deux phases primaires : des phases de sommeil lent alternent avec des phases de sommeil paradoxal.

Lors du sommeil lent, les muscles sont relâchés, tout en conservant de la tonicité, la respiration est régulière, le cortex cérébral est le siège d'oscillations de grande amplitude, et la consommation d'énergie cérébrale est minimale. Le sommeil paradoxal, d'autre part, comporte la même perte de conscience de l'environnement que dans le sommeil lent, mais il est physiologiquement différent : la respiration et le rythme cardiaque sont irréguliers ; les yeux bougent rapidement ; le cortex envoie des impulsions rapides, irrégulières, de faible amplitude, analogues à celles qui se produisent lors d'un réveil actif ; des rêves frappants se produisent ; et le métabolisme cérébral est souvent supérieur à celui que l'on observe quand le sujet est éveillé. Au cours du sommeil paradoxal, les muscles du squelette (tels ceux du dos et des jambes) n'ont pas de tonicité, en dépit de contractions soudaines qui viennent rompre cette inactivité motrice.

Les individus en bonne santé commencent leur sommeil nocturne par un sommeil lent, le sommeil paradoxal intervenant environ 90 minutes après. En revanche, les personnes atteintes de narcolepsie s'endorment directe-

ment en sommeil paradoxal. Pour cette raison – et aussi parce que les narcoleptiques souffrent d'une perte de tonicité musculaire et d'hallucinations ressemblant à des rêves qui, normalement, interviennent seulement au cours du sommeil paradoxal –, des médecins ont supposé que les symptômes de la narcolepsie provenaient du déclenchement intempestif de certains aspects du sommeil paradoxal.

Bien que les troubles du sommeil soient l'un des symptômes majeurs de la narcolepsie, la cataplexie a souvent constitué le point de départ des études. En effet, la somnolence est un phénomène courant ; les narcoleptiques ne sont gênés que par l'intensité du phénomène, de sorte qu'on détecte difficilement si certains épisodes particuliers de somnolence chez des narcoleptiques sont anormaux. En revanche, les personnes en bonne santé ne souffrent jamais de cataplexies : ces troubles se quantifient aisément, ce qui permet de chercher les phénomènes neuronaux qui les déclenchent.

Des chiens narcoleptiques

Au début des années 1970, la recherche sur la narcolepsie a considérablement progressé quand on a étudié des chiens qui présentaient des symptômes très similaires à ceux des personnes atteintes de narcolepsie. À l'Université de Stanford, William Dement et Merrill Mitler reçurent une portée de dobermans (puis une portée de labradors), qui étaient tous narcoleptiques. La maladie semblait récessive : un chien n'était atteint que lorsqu'il héritait à la fois du caractère de son père et de celui de sa mère ; quand

1. LES CHIENS souffrent parfois de narcolepsie, comme les humains. Ces films montrent le début d'une crise de cataplexie, au moment où l'individu perd l'usage de ses muscles, tout en restant parfaitement conscient. Chez l'homme comme chez le chien, les muscles du cou sont touchés en premier, si bien que la tête tombe, puis le dos et les jambes perdent leur tonicité. La cataplexie est distincte des accès de sommeil dont sont également frappés tous les narcoleptiques : les gens entendent ce que l'on dit autour d'eux et s'en souviennent, et les chiens peuvent suivre des yeux un objet qui bouge.





2. CERTAINES PERSONNES narcoleptiques sont affligées d'une somnolence irrésistible.

W. Dement et M. Mitler croisaient deux chiens narcoleptiques, ils obtenaient des descendants qui étaient tous narcoleptiques. Ces animaux entraient en cataplexie au cours de jeux violents ou quand on leur présentait des aliments appétissants (voir la figure 1).

Afin de trouver l'origine des symptômes étranges de la narcolepsie, nous avons analysé l'activité électrique du cerveau de ces chiens : à l'aide d'électrodes minuscules, nous avons enregistré les impulsions électriques des cellules nerveuses, ou neurones, du tronc cérébral, puisque ces cellules communiquent avec les cellules des autres aires cérébrales et de la moelle épinière. Pourquoi étudier le tronc cérébral ? Parce que, dans les années 1940, à l'Université Northwestern, Horace Magoun avait observé que la stimulation électrique du bulbe médian (une partie du tronc cérébral) abolissait la tonicité musculaire. Comme une épidémie de poliomyélite frappait alors les pays industrialisés, Magoun imputa au bulbe médian certaines des modifications de tonicité musculaire de la poliomyélite aiguë, mais il ne comprit pas la relation entre son observation et le sommeil, car son étude fut effectuée avant 1953, c'est-à-dire avant la découverte du sommeil paradoxal et de la paralysie musculaire associée.

Aujourd'hui, des études réalisées sur des animaux indiquent que le système de commande de la tonicité musculaire, dans le bulbe médian, sert principalement à supprimer l'activité musculaire au cours du sommeil paradoxal ; toutefois, ce système règle également la tonicité musculaire pendant la marche, à l'état d'éveil. Cette région cérébrale est inactive lorsque les animaux sont en mouvement ; elle

est modérément active lorsqu'ils sont assis ou couchés ; son activité augmente pendant le sommeil lent et est maximale au cours du sommeil paradoxal. Celui qui veut relâcher les muscles, quand il est éveillé, doit activer cette zone cérébrale.

Nous fondant sur les résultats de Magoun, nous avons cherché si les attaques de cataplexie subies par les narcoleptiques étaient dues une activité insolite du bulbe médian. En 1991, nous avons confirmé notre hypothèse : lorsque des chiens narcoleptiques ont une attaque de cataplexie, des neurones de cette région sont actifs. De plus, chez des animaux normaux, des cellules situées dans cette zone cérébrale ne sont actives que lorsque les animaux sont dans une phase de sommeil paradoxal. Or d'autres études avaient montré que le sommeil paradoxal est la seule période au cours de laquelle des individus normaux perdent totalement leur tonicité musculaire ; ce frein à toute activité pendant le sommeil paradoxal nous empêche de traduire physiquement nos rêves par des actes.

Puis ma collègue Elizabeth Schenkel montra que des animaux normaux dont le bulbe médian est endommagé tournent en rond pendant leur sommeil paradoxal, au lieu d'être complètement détendus. Simultanément Michel Jouvet, à Lyon, et Adrian Morrison, à l'Université de Pennsylvanie, montrèrent que des lésions du tronc cérébral et de la moelle épinière modifient le comportement des animaux : pendant leur sommeil paradoxal, ceux-ci redressent la tête, marchent et semblent attaquer des adversaires imaginaires. Pour une raison inconnue, les personnes atteintes de narcolepsie ont dans le cerveau un groupe

de neurones qui sont actifs au cours de la veille, alors qu'ils ne devraient l'être que pendant le sommeil paradoxal, où ils suppriment alors la tonicité musculaire (voir l'encadré de la page 57).

Mon collègue Frank Wu a ensuite découvert qu'un deuxième groupe de cellules nerveuses, dans une aire du tronc cérébral nommée *locus coeruleus*, joue également un rôle dans le sommeil paradoxal et la narcolepsie. Ces cellules libèrent de la noradrénaline, un neuromédiateur analogue à l'adrénaline. Quand la noradrénaline est sécrétée et passe dans la circulation sanguine, elle participe à la réaction de l'organisme aux situations de danger. Chez les animaux normaux, les neurones producteurs d'adrénaline du *locus coeruleus* sont actifs pendant la veille, mais inactifs quand les animaux sont en phase de sommeil paradoxal. Les expériences que nous avons réalisées sur des chiens narcoleptiques indiquent que les neurones du *locus coeruleus* sont totalement inactifs avant et pendant la cataplexie, exactement comme pendant le sommeil paradoxal.

L'inactivité des cellules productrices de noradrénaline prive les neurones moteurs d'une source d'excitation au moment même où les formations neuronales du bulbe médian, responsables de leur inhibition, deviennent actives. La forte diminution de l'activation, associée à l'augmentation de l'inhibition, réduit considérablement l'activité et l'excitabilité des neurones moteurs : les muscles que ces neurones commandent se relâchent. Au cours du sommeil paradoxal, la diminution d'excitabilité des neurones moteurs les empêche de réagir aux signaux moteurs qui accompagnent les rêves. Dans la cataplexie, une réduction d'excitabilité analogue empêche les neurones moteurs de réagir aux tentatives de mouvements de la personne en crise.

Pourquoi cette activation réduite et cette inhibition accrue se manifestent-elles pendant la veille, chez des personnes narcoleptiques ? Pourquoi ne surviennent-elles pas seulement pendant les périodes de sommeil paradoxal, comme chez les personnes saines ? On l'ignore encore, mais deux études génétiques ont récemment éclairé le problème. À l'Université de Stanford, Emmanuel Mignot et ses collègues ont identifié le gène responsable de la narcolepsie chez les chiens : c'est celui qui code le récepteur d'un neuromédiateur nommé orexine.

Présents à la surface des neurones, les récepteurs des neuromédiateurs sont des molécules analogues à des serrures. Quand un neuromédiateur clé se fixe sur un récepteur-serrure, des réactions chimiques se déclenchent dans la cellule qui porte le récepteur, et la cellule réagit, par exemple, en émettant des neuromédiateurs vers d'autres cellules. Les gènes mutés identifiés par E. Mignot et ses collègues produisent des récepteurs de l'orexine qui sont dépourvus d'une partie essentielle, si bien qu'ils

réagissent anormalement aux messages qu'ils reçoivent. Ce travail a été confirmé par Masashi Yanagisawa, du Centre médical de Dallas, qui a obtenu des souris dont les neurones n'émettent pas d'orexine ; de telles souris manifestent aussi des symptômes évocateurs de cataplexie, notamment ceux liés au sommeil paradoxal, dès le début de leur sommeil.

L'orexine est synthétisée dans une région profonde du cerveau, l'hypothalamus, qui règle la masse corporelle,

l'équilibre aqueux, les fonctions hypophysaires, la température corporelle et plusieurs autres mécanismes physiologiques. Les neurones de l'hypothalamus qui produisent l'orexine se connectent à d'autres neurones cérébraux qui déclenchent le réveil, tels que les neurones du cerveau antérieur et du tronc cérébral, qui libèrent de l'acétylcholine, et à d'autres neurones qui libèrent de l'histamine et de la sérotonine. Ils sont également reliés aux neurones du tronc cérébral qui jouent un

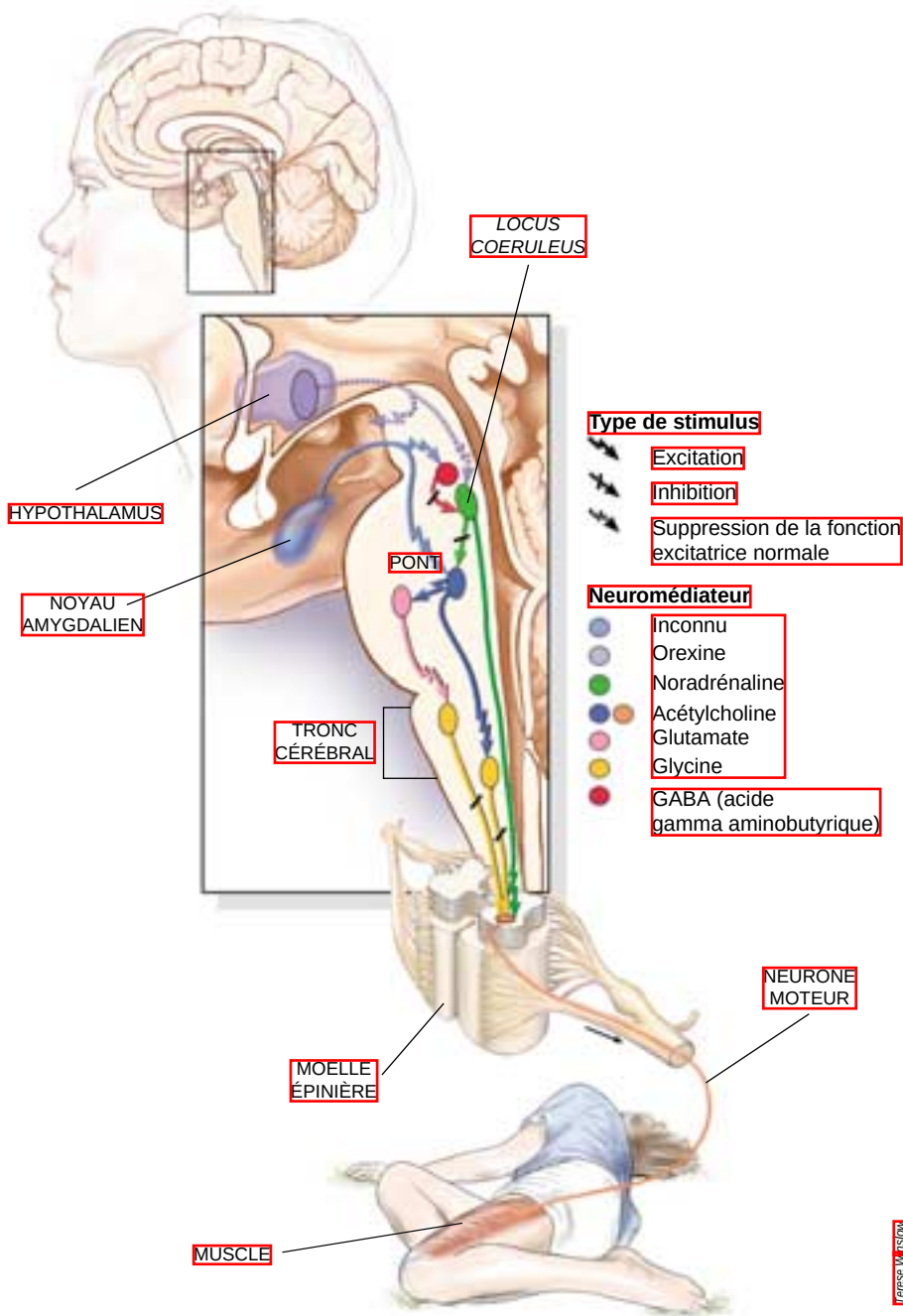
Les circuits neuronaux de la narcolepsie

Les circuits du cerveau et de la moelle épinière qui inhibent normalement le mouvement pendant le sommeil se déclenchent intempestivement au cours des attaques de cataplexie de la narcolepsie. Cette figure illustre un modèle simplifié de la succession probable des événements.

La dégénérescence de cellules, dans le cerveau antérieur, élimine des signaux inhibiteurs qui sont importants pour le maintien de l'activité des cellules du noyau amygdalien (une structure qui participe au contrôle des émotions). La disparition de ces signaux inhibiteurs augmente l'activité des connexions entre le noyau amygdalien et le pont (en bleu), ce qui actionne un «frein» cellulaire (en rouge), lequel inactive le locus coeruleus (en vert). De ce fait, les neurones qui commandent les muscles (en orange) ne sont plus activés.

La lésion du noyau amygdalien active également, de manière indirecte, deux circuits (en rose et violet) qui agissent sur des neurones du tronc cérébral (en jaune), lesquels commandent les neurones moteurs. Au total, l'excitation réduite et l'inhibition accrue provoquent une perte de tonicité musculaire.

L'étude de chiens narcoleptiques montre que des mutations des gènes qui codent les récepteurs d'un neuromédiateur, l'orexine, sont responsables de la cataplexie et des autres symptômes de la narcolepsie en supprimant les impulsions excitatrices (en violet) des cellules qui maintiennent la tonicité et l'éveil des muscles.



rôle important dans la commande de la tonicité musculaire.

Les mutations qui perturbent le système de l'orexine pourraient être responsables de certains cas de narcolepsie humaine, mais certainement pas de tous, car la plupart des personnes atteintes de la maladie n'ont aucun parent narcoleptique, et la maladie ne se manifeste souvent qu'à l'âge adulte. De surcroît, lorsqu'une personne qui a un vrai jumeau est atteinte, ce dernier n'est atteint que dans 25 pour cent des cas. Manifestement la narcolepsie humaine est acquise, et les facteurs de l'environnement qui perturbent le système de l'orexine, semblent reproduire les symptômes qui sont causés par les mutations, ou détériorer des systèmes de neurones qui sont étroitement associés au système de l'orexine.

Une maladie auto-immune?

Quelques équipes supposent que des facteurs environnementaux inconnus stimulent une réaction auto-immune, qui finit par détériorer des neurones,

dans les circuits cérébraux qui commandent le réveil et la tonicité musculaire. En 1984, par exemple, Yutaka Honda et ses collègues de l'Hôpital Siewa de Tokyo trouvèrent que les cellules de 135 narcoleptiques japonais comportaient une même molécule que le système immunitaire utilise pour distinguer le soi du non-soi (cette molécule est un «antigène leucocytaire humain», ou molécule HLA). Comme cette molécule particulière se retrouve chez près de 35 pour cent de Japonais non narcoleptiques, le type HLA ne détermine pas complètement la narcolepsie, mais il la favorise.

Les molécules HLA sont des structures en forme de fourche dont se servent les cellules de l'organisme pour présenter au système immunitaire des morceaux des protéines qu'elles contiennent. Généralement, les cellules immunitaires attaquent les substances étrangères (telles les bactéries qui infectent l'organisme), ainsi que les cellules infectées par des virus, qui fabriquent des protéines virales au lieu des protéines cellulaires normales.

Les médecins utilisent les types HLA pour classer les individus, car un tissu greffé n'est toléré que si le donneur est du même type HLA que le receveur. Certaines maladies auto-immunes atteignent plutôt des personnes des types HLA particuliers, vraisemblablement parce que les molécules HLA, liées à des antigènes, ressemblent à des molécules qui provoquent une réaction du système immunitaire, qui détériore alors les cellules normales.

Les médecins cherchent aujourd'hui si les systèmes immunitaires des narcoleptiques détruisent par erreur les récepteurs cérébraux de l'orexine. Comme l'organisme produit sans cesse de tels récepteurs, la réaction auto-immune devrait se poursuivre pendant toute la durée de la maladie. Toutefois on n'a pas détecté ce type de réaction chez les personnes atteintes de narcolepsie.

D'autres réactions auto-immunes pourraient avoir lieu. Par exemple, une réaction auto-immune limitée pourrait avoir lieu si elle détruisait les neurones qui portent les récepteurs de l'orexine ou, du moins, les parties qui portent ces récepteurs. La maladie pourrait également survenir si la réaction endommageait les circuits neuronaux qui régulent le sommeil, plutôt que les cellules du système de l'orexine : l'atteinte auto-immune des neurones ou des récepteurs, au niveau du *locus coeruleus* ou dans d'autres zones cérébrales associées au sommeil, produirait le syndrome, malgré un fonctionnement normal des neurones sécréteurs d'orexine et de leurs récepteurs.

Seule l'étude du cerveau de personnes atteintes révélera si la narcolepsie est d'origine auto-immune. Depuis l'identification de la maladie par le médecin français Jean-Baptiste Édouard Gélinau, en 1880, des médecins ont vainement examiné les cerveaux de patients en y recherchant des dégâts neurologiques qui expliqueraient les symptômes. Dans les années 1980 et 1990, les médecins de Stanford ont observé que les cerveaux de chiens narcoleptiques comportaient un nombre anormalement élevé de récepteurs de trois neuromédiateurs (l'acétylcholine, la dopamine et la noradrénaline), et des concentrations supérieures en certains de ces neuromédiateurs. Puis, au début des années 1990, à l'Université du Michigan, Michael Aldrich détecta des changements analogues dans les cerveaux de

Le traitement de la narcolepsie

Le traitement actuel de la narcolepsie fait appel à plusieurs classes de médicaments et à des traitements comportementaux.

Contre la somnolence et les accès de sommeil, le traitement de première intention est le modafinil, éveillant central pur non amphétaminique. En cas d'échec, malgré un ajustement soigneux de la posologie, on peut utiliser des dérivés amphétaminiques (méthylphénidate, mazindol) ou d'autres traitements (déprényl, pémo-line) ; et, en cas de nouvel échec, les médecins administrent des amphétamines (dexamphétamine).

Contre la cataplexie, les antidépresseurs tricycliques (clomipramine ou désipramine) sont efficaces, mais parfois mal tolérés. On utilise également des inhibiteurs de la recapture de la sérotonine, des inhibiteurs de la recapture de la noradrénaline, ou des inhibiteurs de la recapture de la noradrénaline et de la sérotonine. Seules les amphétamines et leurs dérivés, le mazindol, et, à un moindre degré la sélégiline, peuvent agir à la fois contre la somnolence et contre la cataplexie.

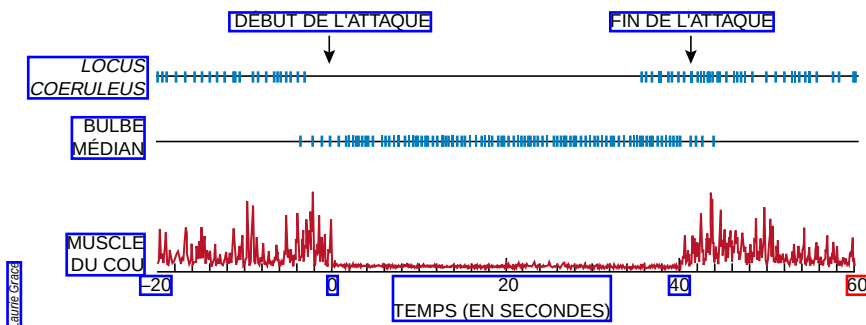
Le mauvais sommeil est traité à l'aide d'hypnotiques classiques, benzodiazépines ou non. Le Gamma-OH est aujourd'hui déconseillé, compte tenu des abus possibles.

À côté de ces méthodes médicalementes, les médecins cherchent à programmer des sommes répartis dans la journée, et de durée limitée (moins de 20 minutes), aux heures de somnolence maximale reconnues par les malades (le plus souvent, après le déjeuner et en fin d'après-midi). Ils demandent également aux malades d'organiser leur journée de travail en fonction des variations de somnolence.

En cas d'état de «mal cataplectique» (attaques répétées subintrantes : quand l'une commence avant que la précédente soit terminée), le médecin doit interrompre tous les traitements en cours, hospitaliser le malade, réintroduire lentement les tricycliques et tester l'action des amphétamines.

Michel BILLIARD

Service de neurologie B, Centre hospitalier universitaire de Montpellier



3. DES ENREGISTREMENTS ÉLECTRIQUES du cerveau et des muscles du cou d'un chien narcoleptique montrent que des cellules du *locus coeruleus* sont inactives pendant la paralysie musculaire d'une attaque de cataplexie, tandis que les cellules du bulbe médian sont actives.

Cette activité anormale semble provenir de la dégénérescence de cellules du noyau amygdalien : une coupe réalisée sur un chien (à droite) montre des discontinuités des axones, ces prolongements des neurones qui vont au contact d'autres neurones.

personnes narcoleptiques. Toutefois de telles modifications des concentrations en neuromédiateurs et en récepteurs peuvent résulter de changements physiologiques, telles des perturbations du sommeil : on ignore s'ils sont la cause ou le résultat de la maladie.

Pourquoi n'a-t-on pas trouvé les signes d'une détérioration cérébrale chez les narcoleptiques ? A-t-on fait la recherche à un stade inapproprié de la maladie ? La narcolepsie est une maladie chronique qui progresse peu en général. Après l'apparition des symptômes, l'état des malades ne change plus, de sorte que certains supposent que la lésion se produit assez rapidement, lorsque les premiers signes apparaissent. Les traces laissées par les processus dégénératifs qui se sont produits vers l'âge de 20 ans devraient être effacées par les cellules de maintien du cerveau bien avant la mort de la plupart des malades, et tout indice restant serait masqué par la dégénérescence normale liée au vieillissement. Une perte de neurones serait alors indécidable, à moins que les cellules mortes ne soient concentrées dans une zone particulière, comme dans la maladie de Parkinson, ou qu'un nombre très important de neurones ne meurent, comme dans la maladie d'Alzheimer.

À la recherche des séquelles d'une lésion initiale, nous avons examiné les cerveaux de chiens narcoleptiques peu après l'apparition des symptômes. Grâce à un colorant qui détecte les neurones lésés, nous avons démontré que, chez les chiens âgés de un à deux mois, des neurones situés dans certaines zones cérébrales dégénèrent avant que les symptômes apparaissent ; la dégénérescence devient imperceptible dès que les chiens sont âgés de plus de six mois.

Chez les chiens, la dégénérescence était plus prononcée dans le noyau amygdalien, une structure cérébrale qui intervient dans l'émotion et l'endormissement, et dans des régions adjacentes à la partie inférieure du cerveau antérieur. Bien que le tronc cérébral serve de relais pour certains symptômes de la narcolepsie, il ne présentait aucun signe de dégénérescence. Nous supposons que la détérioration du noyau amygdalien et des zones adjacentes au cerveau antérieur provoque les symptômes moteurs de la narcolepsie en activant de manière intempestive des circuits cerveau-tronc cérébral intacts, tout comme le conducteur d'une voiture qui fonctionne correctement peut en perdre le contrôle s'il appuie sur l'accélérateur au mauvais moment.

Nos résultats répondent à une question, mais en posent bien d'autres. Quelle est l'origine des lésions que nous avons observées dans le noyau amygdalien et des autres régions du cerveau antérieur des chiots narcoleptiques ? Est-ce le résultat d'une réaction auto-immune, comme semblent l'indiquer les études réalisées sur l'homme ? L'anomalie observée sur le récepteur de l'orexine déclenche-t-elle la lésion ? Peut-on prévenir ces lésions, ou sont-elles réversibles ?

Jusqu'à ce que la médecine trouve des réponses, elle ne peut proposer aux malades que des médicaments qui jugulent les symptômes. Des stimulants comme la Ritaline ou le Cylert contrecarrent en partie la somnolence ; des amphétamines stimulent les récepteurs de la dopamine, afin d'augmenter l'éveil. Un autre produit au mécanisme d'action encore mal connu, le Modiodal, semble stimuler les neurones sécréteurs d'orexine, ainsi que d'autres populations neuronales de

l'hypothalamus qui activent à leur tour les systèmes cérébraux d'éveil. Toutefois tous ces médicaments ne sont efficaces que pendant de courtes périodes et ils ont parfois des effets secondaires désagréables, tels qu'agitation, sécheresse de la bouche et anxiété.

Pour prévenir les attaques de cataplexie de la narcolepsie, les médecins peuvent prescrire des produits qui augmentent l'action de la noradrénaline dans le cerveau. Les inhibiteurs de la monoamine oxydase, par exemple, bloquent l'enzyme qui dégrade la noradrénaline une fois qu'elle a été libérée par les neurones ; des composés comme le Prozac sont dégradés en composés qui activent les récepteurs de la noradrénaline. Le gamma hydroxybutyrate (GHB), au mode d'action encore mal connu, semble également efficace. Le traitement de la narcolepsie, fondé sur les explorations récentes de la maladie, s'améliore.

Jerome SIEGEL est professeur de psychiatrie à l'Université de Los Angeles.

Encyclopedia of Sleep and Dreaming, sous la direction de Mary A. Carskadon, Macmillan, 1993.

Alan RECHTSCHAFFEN et Jerome M. SIEGEL, *Sleep and Dreaming*, in *Principles of Neural Science*, 4^e édition, sous la direction d'Eric R. Kandel, James H. Schwartz et Thomas M. Jessel, McGraw-Hill, 1999.

Jerome SIEGEL, *Brainstem Mechanisms Generating rem Sleep*, in *Principles and Practice of Sleep Medicine*, 3^e édition, sous la direction de Meir H. Kryger, Thomas Roth et William C. Dement, W.B. Saunders, 2000.

D'autres articles peuvent être consultés : www.bol.ucla.edu/~jsiegel sur le réseau Internet.

La graphologie, un mal français

MARILOU BRUCHON-SCHWEITZER

De moins en moins utilisée à l'étranger, la graphologie reste l'un des outils importants des organismes de recrutement français. Pourtant, elle ne décrit ni la personnalité des candidats ni leur réussite professionnelle ultérieure.

Aujourd'hui, dans de nombreux secteurs d'activité économique, les entreprises de divers pays d'Europe fusionnent afin de mieux résister à la concurrence internationale. Les méthodes de production s'harmonisent, tout comme les méthodes d'administration. Les partenaires des divers pays unifient leurs techniques de recrutement. Certaines pratiques qui subsistent en France, telle la graphologie, sont aujourd'hui controversées par les partenaires étrangers des entreprises françaises.

Quelle est la place actuelle de la graphologie dans les processus d'évaluation de candidats à l'embauche? Quel est l'intérêt de la technique? Quelle est la qualification des graphologues? La graphologie est-elle une science humaine? L'utilisation de l'analyse graphologique au cours du recrutement est-elle justifiée d'un point de vue éthique, juridique ou économique?

Commençons l'examen de ces questions par une estimation de la place de la graphologie dans les méthodes d'évaluation des candidats employées par les organismes de recrutement. Selon le Groupement des graphologues-conseils de France (GGCF), dont le journal *Le Monde* a publié une lettre en 1997, les critiques formulées à l'égard de la graphologie ne prennent pas en compte «le développement de cette discipline et son utilisation dans de nombreux pays d'Europe, de même qu'aux États-Unis». Développement de la graphologie? Nous avons effectué une enquête pour juger objectivement de sa place actuelle.

En 1989-1990, nous avons consulté 102 organismes de recrutement français (60 cabinets, 42 entreprises) : 99 pour cent d'entre eux utilisaient des entretiens pour évaluer les candidats, 93 pour cent l'analyse graphologique (dont 55 pour cent systématiquement, 38 pour cent occasionnellement), 63 pour cent les tests d'aptitudes, et 61 pour cent les tests de personnalité.

Deux études plus récentes ont confirmé ces chiffres. Par exemple, en 1993, une enquête auprès de 113 organismes français (essentiellement de grosses entreprises) a montré que 66 pour cent d'entre eux recourent à la graphologie (34 pour cent toujours et 32 parfois). Et, en 1999, une enquête auprès de 62 cabinets français a établi que 95 pour cent utilisent la graphologie, dont 50 pour cent systématiquement et 45 pour cent occasionnellement. Les trois études donnent des résultats cohérents : l'analyse graphologique est systématiquement utilisée au cours des recrutements,

en France, par un tiers à une moitié des organismes.

Et dans les autres pays? Heinz Schuler, de l'Université de Stuttgart, a mené en 1991 une enquête analogue auprès de 100 entreprises allemandes (représentatives des entreprises du pays) et observé une réduction considérable de l'utilisation de la graphologie depuis quelques années. L'image de la méthode est très mauvaise dans le public comme dans la communauté chargée du recrutement du personnel.

Dans les autres pays européens (sauf la France, bien sûr), les résultats sont analogues. En 1994, V. Shackelton, de l'École d'administration des affaires de Birmingham, a comparé 250 entreprises de cinq pays d'Europe : la graphologie n'est plus utilisée que par deux pour cent des organisations en Norvège, trois pour cent en Italie, un à quatre pour cent en Allemagne et au Royaume-Uni, deux à sept pour cent aux Pays-Bas, et quatre à huit pour cent en Belgique (les pourcentages sont compris dans un intervalle, parce que les études ont distingué les types de personnels recrutés, les catégories d'organismes interrogés, etc.).

Traversons l'Atlantique : aux États-Unis, l'utilisation de la graphologie, surnommée *french disease* («maladie française»), est très rare. Mieux encore, les lettres de candidature à un emploi doivent être dactylographiées. Selon Mike Smith, de l'École d'administration de Manchester, seulement 2,8 pour cent des entreprises américaines utilisent encore la graphologie, car les recruteurs américains ont été exposés à un nombre croissant de procès intentés (et gagnés) par des candidats qui mettaient



en cause la capacité de l'analyse graphologique à «prédire» la réussite professionnelle ultérieure.

Ainsi, non seulement la maladie française n'a pas contaminé les autres pays, mais elle semble même régresser en Europe et aux États-Unis. Le recours à la graphologie est une particularité bien française, même si elle n'est utilisée que pour certains postes (cadres moyens et supérieurs) et par certains organismes (cabinets, notamment).

La qualification des graphologues

Lorsque leur technique est contestée, les graphologues se défendent souvent en évoquant la qualité de leur formation : «C'est un métier difficile qui réclame une formation "sérieuse"», écrit Jacqueline Thibonnier dans un débat publié dans *Pour la Science* en juillet 1994. De son côté, le GGCF écrit que la formation des graphologues nécessite «du temps, du sérieux, de la rigueur».

Examinons en quoi consiste cette formation. Les études de graphologie durent trois ans après le baccalauréat. Elles sont dispensées par la Société française de graphologie à raison de deux heures de cours du soir par semaine, hors congés scolaires, soit un total de 240 heures. Certains graphologues

suivent une formation complémentaire de deux ans, donnée par le GGCF à raison de huit séminaires d'une journée par an, soit environ 128 heures de cours. Au total, les étudiants suivent 370 heures de cours en cinq ans, soit deux mois de travail à plein temps, ou un semestre d'études à l'Université (comparons : le cursus universitaire des étudiants de psychologie dure cinq ans et comprend 3 200 heures de cours, sans compter les stages en entreprise, obligatoires en maîtrise et en DESS).

Quelle est la valeur d'une formation aussi brève? Signalons que la commission d'homologation des titres et diplômes du ministère du Travail a décidé en 1993, à la quasi-totalité de ses membres, de ne plus reconnaître le diplôme délivré par le GGCF : les membres de cette commission ont considéré que les bases scientifiques et techniques de la graphologie n'étaient pas établies. De surcroît, le diplôme de graphologue n'a jamais été reconnu par le ministère de l'Éducation nationale.

Quant aux contenus enseignés pendant cette formation, on les trouve dans tous les manuels classiques de gra-

phologie édités depuis l'ouvrage fondateur de M. Crépieux-Jamin, en 1889, *L'écriture et le caractère*. Ils sont quasi inchangés depuis un siècle, malgré les progrès des sciences humaines.

On n'y trouve aucun corpus théorique, aucun modèle relatif aux conduites humaines, aucune proposition présentée comme une hypothèse réfutable (et donc provisoire et révisable), mais seulement un ensemble de croyances, d'affirmations et d'évidences, d'emprunts à d'autres domaines, de convictions répétées dogmatiquement de génération en génération.

Les conceptions de la personnalité qui y sont enseignées font un amalgame hétéroclite et vétuste. Par exemple, l'un des manuels importants utilise encore la typologie d'Hippocrate, qui distingue le «sanguin», le «bilieux», le «nerveux», le «lymphatique»! Certes, l'auteur mentionne qu'il n'existe pas de type à l'état pur, mais il ajoute aussi que «le tempérament de chaque individu résulte de la combinaison en proportions variables des quatre humeurs». Des humeurs? Comme au Moyen Âge?



Plusieurs le déclinent
 Je viens de parcourir l'annuaire diffusé par votre
 Compagnie. Votre offre m'intéresse. J'ai, en effet,
 un goût personnel pour la transmission du savoir –
 comme vous le voyez d'après mon curriculum (ci-joint)
 Votre proposition me permettrait de travailler dans
 un domaine plus vaste – et d'insérer un plus long
 public sur certains problèmes contemporains.
 J'espère que mes (modestes) compétences
 correspondront bien aux attentes de vos services, et
 je suis à votre disposition pour de plus amples
 informations.

Etude faite sans C.V., ni signature, ce qui implique des réserves d'usage

POINTS FORTS :

- Une intelligence rigoureuse et précise allié à un sens de l'analyse développé. Fixe son attention et se concentre sur ses études, canalise ses centres d'intérêts
- Agit avec méthode en progressant étape par étape et en prenant des initiatives réfléchies. A besoin d'un temps d'adaptation et de mise en route pour s'appuyer sur ses compétences, ses habitudes et gagner en efficacité
- De la réceptivité et de l'ouverture lui permettant de capter les informations
- De l'écoute et des contacts aimables, il s'exprime posément et clairement sur des sujets bien maîtrisés

POINTS A CONSIDERER :

- Les synthèses sont souvent retardées par les vérifications et les contrôles
- Un dynamisme fluctuant et des inégalités de tonus, limitant la résistance face aux stress ou aux pressions
- Efforts, parfois, difficiles à maintenir dans la durée, ce qui peut freiner la stabilité et la persévérance, il peut se décourager assez facilement
- Caractère inquiet et préoccupé freinant l'audace ou l'esprit d'entreprise
- Diffère certaines implications, certaines décisions en raison de ses incertitudes et de ses doutes. Aisance relative dans les échanges, il est perméable au milieu environnant. Exigeant vis à vis de lui-même, il est un peu perfectionniste

AVIS :

C'est un candidat réfléchi, plus analytique que synthétique, prudent et vigilant dans ses démarches, qui a besoin de collaborer sur la confiance et la transparence, sur un terrain sécurisant et au sein d'une équipe soudée et solidaire.
 Lui mettre la pression sur des objectifs ou sur les résultats risque d'entraîner des erreurs de discernement voire des critiques un peu caustiques d'autodéfense.

UN EXAMEN GRAPHOLOGIQUE a été effectué par la revue *Pour la Science*. Pierre-Gilles de Gennes ayant accepté de recopier manuellement une lettre de candidature à un poste de journaliste scientifique (*en haut*), la lettre a été envoyée sans mention de son auteur à un graphologue. Ce dernier a répondu (*en bas*), en remarquant que l'étude a été faite sans curriculum vitae ni signature, «ce qui implique les réserves d'usage». Au total, si quelques analyses sont justes, bien que floues (intelligence rigoureuse, canalise ses centres d'intérêt), beaucoup de remarques ne correspondent pas du tout à la personnalité de l'intéressé (faible résistance face aux pressions, effort difficile à maintenir dans la durée...).

Cette typologie complètement dépassée est souvent mêlée à certains stades ou types empruntés à des conceptions psychanalytiques discordantes (Jung et Freud), ou à celles de la «caractérologie» de René Le Senne, théorie complètement tombée en désuétude. Leur incompatibilité, et le fait que ces théories ne s'appuient pas sur la vérification scientifique, ne semblent pas gêner les auteurs de ces traités de graphologie. Pis encore, l'ignorance des théories actuelles de la personnalité et des méthodes modernes de son évaluation transparaît de façon flagrante. Apparemment, les graphologues ne connaissent pas le modèle de la personnalité en cinq facteurs (*Big Five*) fondé sur des recherches menées sur des milliers d'individus de tous les pays du monde par des méthodes rigoureuses et validées.

Au total, la formation des graphologues est insuffisante et inappropriée, quantitativement et qualitativement. C'est seulement une initiation pratique à la technique graphologique et son application à quelques cas, qui ne propose pas de théorie explicative des relations éventuelles entre écriture et personnalité (pour elle, les relations sont «évidentes»), ni de pistes de recherche permettant de tester des hypothèses.

La graphologie, une science humaine ?

«La graphologie est une science humaine», écrit Jacqueline Peugeot, présidente de la Société française de graphologie, dans son manuel paru en 1986. C'est ce qu'a répété le GGCF dans le journal *Le Monde*. Or toute science est fondée sur l'observation de relations entre des phénomènes et sur l'élaboration de théories pour expliquer ces relations. La recherche scientifique est un va-et-vient permanent entre attentes théoriques et réalité empirique. Lorsque les hypothèses ne sont pas confortées par les faits, on révisé la théorie. Ce souci de vérification, ainsi que le caractère provisoire et améliorable de la théorie, sont communs à toutes les sciences, sciences de la nature ou sciences humaines et sociales.

On ne retrouve hélas pas un tel souci de progrès dans les ouvrages et dans les revues graphologiques. Les rares recherches révèlent l'absence de formation scientifique des graphologues. Ainsi l'«étude statistique» de la signature, réalisée sur 125 étudiantes de première année de graphologie et

présentée en annexe du *Manuel de graphologie*, est un calcul du nombre et de la fréquence de certaines caractéristiques de la signature. Aucun traitement n'a été appliqué aux données, et les relations entre certains aspects de la signature et certains traits de la personnalité n'ont pas été quantifiées. Pis encore, on trouve à la fin de cette étude une description de la statistique qui montre bien l'état d'esprit des auteurs : «La statistique est une discipline mathématique. Ses concepts ne sont pas sans embûches, elle doit être maniée avec respect. Ce n'est cependant que le bon sens réduit au calcul.»

Les recherches sur l'écriture

La relation entre écriture et personnalité, ou la relation entre écriture et efficacité professionnelle ultérieure, pourraient néanmoins être explorées, et les affirmations du *Manuel de graphologie* ou d'autres documents de même type pourraient être transformées en hypothèses testables. De surcroît, les échantillons d'écriture sont très faciles à recueillir. Pourquoi cette incapacité ou cette résistance des graphologues à valider leur discipline ?

Contrairement à ce que prétendent les graphologues, la correspondance entre écriture et personnalité, ou entre écriture et réussite professionnelle future n'est pas évidente. D'ailleurs, ces correspondances éventuelles ont été explorées. On a cherché des corrélations significatives existant entre les caractéristiques de l'écriture et divers critères comme la personnalité, l'intelligence, la réussite professionnelle. Ces études ont été souvent faites ailleurs qu'en France, surtout par des scientifiques qui n'étaient pas graphologues.

Sur 26 études scientifiques que nous avons recensées sur les relations entre écriture et personnalité, 21 concluent à l'absence de validité prédictive de l'écriture. Mark Cook, à l'Université de Cardiff, Ivan Robertson et Mike Smith, sont de ceux qui ont obtenu des résultats négatifs pour des échantillons d'écriture provenant de 120 000 personnes !

La synthèse de 17 recherches différentes, par une méta-analyse (une synthèse statistique de plusieurs études) des psychologues israéliens E. Neter et G. Ben-Shakkar, conclut également que, statistiquement, l'écriture n'est pas prédictive. Cette étude a concerné 1 223 manuscrits (à contenu neutre ou personnalisé) évalués par des experts



(graphologues professionnels) ou par des novices. Les deux psychologues israéliens ont calculé un coefficient de corrélation entre un prédicteur (ici l'écriture) et un critère (ici la personnalité). Alors que l'on considère comme acceptable un coefficient de corrélation supérieur à 0,40, le coefficient de corrélation était égal à 0,16 quand l'écriture contenait des informations sur le scripteur, mais il n'était que de 0,03 pour les écrits neutres. Quant aux professionnels, leur jugement n'est pas apparu plus valide que celui des novices.

Crédulité et graphologie : l'effet Barnum

La graphologie, comme la voyance ou l'horoscope, donne aux individus des informations sur eux-mêmes. Pourquoi tant d'individus croient-ils ce qu'on leur dit d'eux, même quand ils savent que les bases de ces analyses sont douteuses ? Parce que les données transmises sont très générales, vagues, et positives. Plus l'analyse se donne une apparence sérieuse, mieux elle est acceptée : c'est l'effet Barnum (ainsi nommé d'après Phineas Barnum, l'homme des cirques, qui l'avait mis en œuvre dans certains de ses spectacles).

L'effet a été exploré par le psychologue américain Ross Stagner, qui a effectué une étude de personnalité auprès de 68 directeurs du personnel d'entreprises américaines. Au lieu d'envoyer à chacun les véritables résultats de son analyse, R. Stagner a transmis une «analyse robot» contenant 13 formules identiques à celles que contiennent souvent les analyses graphologiques ou les horoscopes : «vous appréciez l'estime que l'on vous porte» ou «vous êtes plutôt critiques vis à vis de vous-même», etc. Puis R. Stagner a demandé aux participants de l'étude de juger le degré de vraisemblance de chacun des jugements transmis. Plus d'un tiers des personnes ont jugé que l'analyse était «étonnamment précise», et 40 pour cent l'ont jugée «plutôt bonne» (soit, au total, plus de 70 pour cent d'appréciations positives). De surcroît, les jugements qui donnaient aux sujets une image positive d'eux-mêmes étaient plébiscités, mais les critiques étaient jugées peu justes.

L'analyse des réponses des individus testés révèle les bases de l'effet Barnum : les deux phrases jugées les plus précises étaient «vous préférez une certaine variété et vous êtes insatisfait quand les contraintes ou les restrictions sont excessives» (91 pour cent

des personnes testées ont jugé cette phrase très précise ou étonnamment appropriée) et «vous avez quelques faiblesses de caractère mais vous parvenez généralement à les surmonter» (89 pour cent) ; inversement les deux déclarations jugées les moins précises étaient «vous avez des difficultés dans le domaine sexuel» et «certaines de vos aspirations tendent à être peu réalistes». Les descriptions du caractère ne sont bien acceptées que quand elles sont positives.

Cette étude a été confirmée par de nombreuses autres, et la revue *New Scientist* a publié notamment le travail du psychologue australien Robert Trevethan, qui entame toujours ses cours aux étudiants de première année en leur demandant de décrire leurs rêves, ou ce qu'ils voient dans une tache d'encre ; une semaine plus tard, il leur distribue un profil de personnalité, le même pour tous les étudiants, composé des 13 phrases utilisées par R. Stagner, et il demande aux étudiants de noter la valeur de l'analyse. C'est seulement quand les copies sont ramassées (il les analyse ultérieurement) qu'il révèle aux étudiants la supercherie : l'humiliation que ressentent ces derniers est le gage de leur prudence ultérieure.

Les études de l'effet Barnum ont montré que la personnalité réelle des personnes testées ne détermine pas le type d'appréciation effectuée. En revanche, plus les données de base sont spécifiques, plus les individus croient à la fiabilité des tests : C. Snyder, à l'Université du Kansas, a démontré que des astrologues donnent un sentiment de fiabilité supérieur quand ils demandent le jour de la naissance, en plus du mois et de l'année.



Si la graphologie prédit mal la personnalité, permet-elle de connaître la réussite professionnelle ultérieure d'un candidat à l'embauche? Le GGCF affirme qu'«il appartient à la profession de défendre la graphologie face à des détracteurs souvent mal informés en donnant la preuve de son utilité». Que les graphologues fassent la preuve de la validité de leur technique est bien le problème essentiel. Il est étonnant de ne les voir aborder cette question qu'aujourd'hui, alors que la graphologie est utilisée depuis bientôt un siècle et qu'elle a déjà contribué à décider de l'avenir de milliers de personnes.

La graphologie a-t-elle fait la preuve de sa pertinence? Permet-elle de connaître la personnalité du scribe, de prédire ses compétences professionnelles? Hélas, la réponse est négative. D'après toutes les études disponibles (une trentaine, menées dans divers pays et sur des groupes professionnels variés), la relation entre écriture et réussite professionnelle est soit très faible (et non significative), soit nulle. On ne peut donc pas utiliser l'écriture pour sélectionner des candidats à un emploi. Finalement, ne pouvant justifier sa méthode ni démontrer ses résultats, la graphologie est une pseudo-science.

La légitimité de la graphologie

Les graphologues, lorsqu'ils sont contestés et à bout d'arguments, évoquent la confiance de leurs clients et la popularité de leur discipline. Cette confiance, on l'a vu, semble très entamée dans les pays européens, où une écrasante majorité d'organismes ont abandonné la graphologie.

Sans doute utilise-t-on encore la graphologie en France, en raison de ses qualités apparentes : son coût paraît faible (dans l'immédiat, car, à moyen et à long terme, une erreur coûtera cher à l'en-

treprise et au candidat), sa mise en œuvre est simple, et les candidats français n'ont pas encore contesté la méthode autant que les candidats américains. L'opacité qui entoure la technique contribue aussi à la confiance faite par les entreprises : comme l'analyse de l'écriture est mêlée à d'autres évaluations (curriculum vitae, références...), le client ne peut connaître exactement l'origine des erreurs de recrutement, lorsqu'il y en a.

La situation française est grave, car il est contraire à la loi sur le recrutement et les libertés individuelles (*Journal officiel* du premier janvier 1993) d'utiliser l'écriture comme méthode d'évaluation des candidats à l'embauche : cette loi précise que les techniques utilisées doivent être «pertinentes au regard de la finalité poursuivie» et que le recruteur est comptable de «la rectitude scientifique des procédés qu'il utilise». Enfin le candidat doit être «expressément informé préalablement à la mise en œuvre» des méthodes qui serviront à l'évaluer.

En cette période d'incertitude et de précarité, il est particulièrement important d'assainir le processus de recrutement en n'utilisant que les méthodes les plus pertinentes : les raisons sont à la fois économiques (coût élevé des erreurs pour les organisations), juridiques (les pratiques non validées sont illégales) et éthiques (optimisation de l'évaluation par respect des candidats).

Marilou BRUCHON-SCHWEITZER est professeur de psychologie différentielle de la santé à l'Université Victor Segalen, Bordeaux 2.

M. COOK, *Personnel selection and productivity*, éditions John Wiley, Chichester, 1988.

E. NETER et G. BEN-SHAKKAR, *The predictive validity of graphological inferences : a meta-analytical approach*, in *Personality and Individual Differences*, vol. 10, pp. 737-745, 1989.

M. BRUCHON-SCHWEITZER et D. FERRIEUX, *Une enquête sur le recrutement en France*, in *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, vol. 41, n° 1, pp. 9-17, 1991.

A. VOM HOFE et C. LEVY-LEBOYER, *Evaluation of the use of personality tests in personnel selection in France*, in *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, vol. 43 n° 3, pp. 221-227, 1993.

C. BALICCO, *Les méthodes d'évaluation en ressources humaines*, Éditions d'Organisation, Paris, 1997.

Les miroirs à retournement temporel

MATHIAS FINK

Grâce à des réseaux de transducteurs, les physiciens renvoient un son à sa source, comme si le temps s'écoulait à l'envers. On utilise aujourd'hui ces retournements temporels pour détruire des calculs rénaux, détecter des défauts dans les matériaux ou communiquer avec les sous-marins.

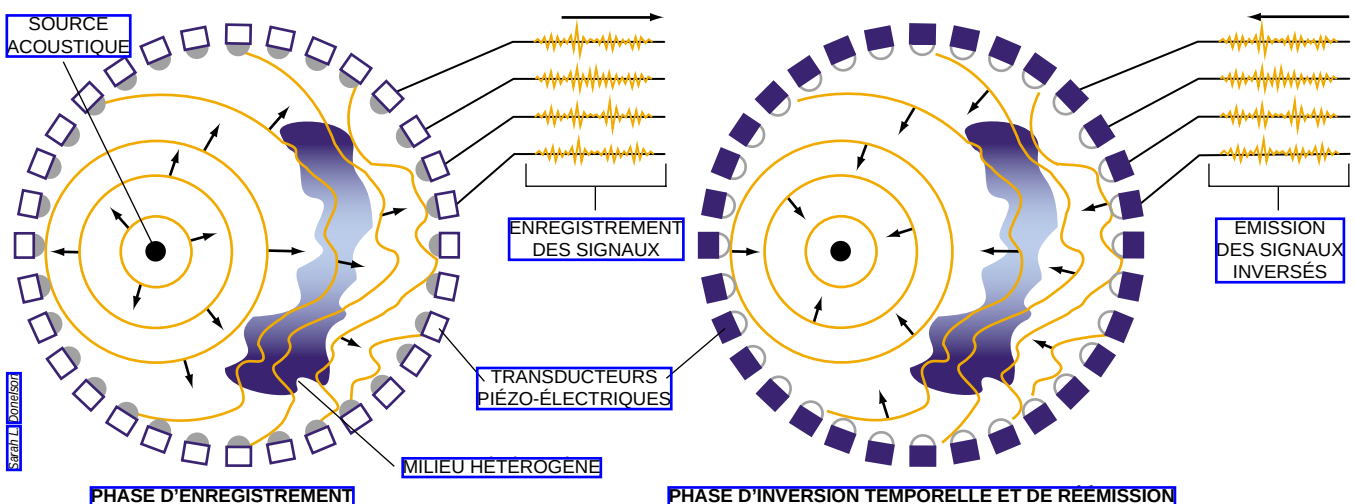
Dans une salle du Laboratoire Ondes et acoustique, à l'École supérieure de physique et chimie de Paris, le visiteur peut se placer face à un réseau de microphones et de haut-parleurs. S'il parle devant ce dispositif, ses paroles lui reviennent, mais à l'envers. «Allô» revient, presque instantanément, transformé en «olla». Au premier abord, ce retour du son semble banal : ne suffit-il pas de passer un enregistreur à l'envers pour obtenir le même effet ? Oui, mais le système mis au point dans notre laboratoire a une particularité importante : il ren-

voie le son exactement à sa source ; au lieu de se propager dans toute la pièce à partir des haut-parleurs, le «olla» converge vers la bouche du visiteur, comme si le cours du temps avait été inversé. Ce phénomène fait une opération de retournement temporel des ondes acoustiques, et le réseau des transducteurs qui le met en œuvre agit comme un miroir à retournement temporel.

Le retournement temporel est plus qu'une expérience de physique amusante : on commence à l'utiliser pour détruire des calculs rénaux, contrôler des matériaux ou communiquer

dans les océans. En physique, les miroirs à retournement temporel servent également à tester des concepts fondamentaux.

Les sons sont des ondes. Quand nous parlons, nous engendrons des vibrations de l'air qui se propagent à partir de la bouche, comme des vaguelettes se propagent à la surface d'une mare à partir du point d'impact d'une pierre. Les ondes ont une propriété fondamentale, qui est utilisée dans le retournement acoustique : lorsque deux ondes passent au même endroit, elles se renforcent si leurs crêtes et leurs vallées



1. LE RETOURNEMENT TEMPOREL se fait en deux étapes. Dans une première étape (à gauche), la source émet une onde acoustique (en orange) qui se propage et se déforme au travers des hétérogénéités du milieu traversé. Un «miroir de retournement temporel», composé de transducteurs, détecte le signal qui arrive en chacun de ses points, le convertit en tension électrique et transmet les

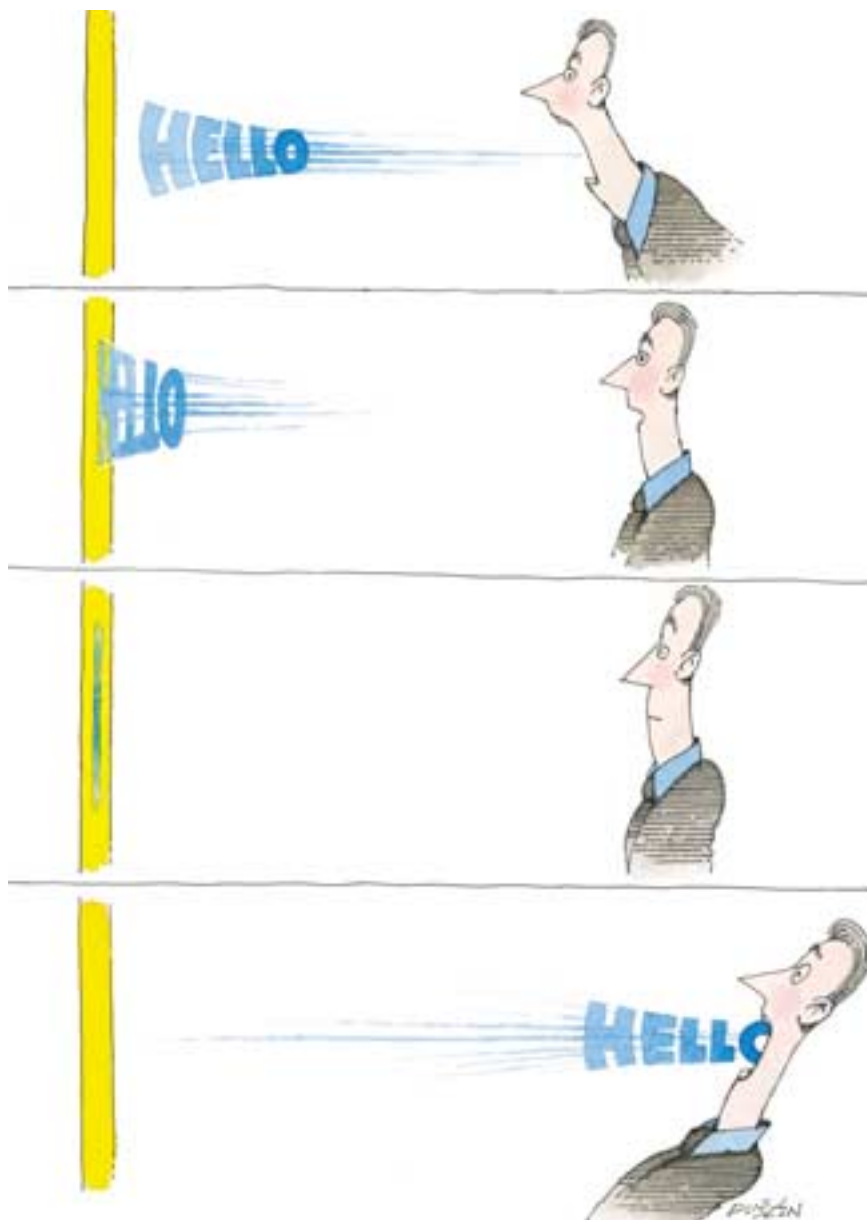
valeurs mesurées à un ordinateur. Dans la seconde étape (à droite), chaque transducteur réémet le signal qu'il a reçu selon une chronologie inverse, en synchronisme avec les autres transducteurs. L'onde originale est recrée, mais elle parcourt le chemin inverse, au travers des hétérogénéités du milieu, et se focalise à l'emplacement de la source initiale.

respectives se superposent, et elles s'annulent si les sommets de l'une correspondent aux creux de l'autre. Ce phénomène de superposition ou d'interférence a lieu partout où se croisent différentes ondes sonores. Dans les salles de concert, par exemple, les architectes doivent prendre garde à ces interférences : comme les murs et autres surfaces solides réfléchissent le son sous forme d'échos qui peuvent interférer, seule une conception bien faite évite que le son qui arrive dans la salle ne soit dégradé.

Le retournement des ondes acoustiques est également fondé sur la réversibilité des mécanismes qui sous-tendent la physique des ondes. Quand on projette un film qui décrit la propagation d'ondes à l'envers, les ondes obtenues obéissent encore aux équations de la physique des ondes. Cette propriété de réversibilité est partagée par les lois de la mécanique, qui décrivent le comportement élastique des boules de billard, par exemple. Toutefois, sauf dans quelques cas simples, on n'observe jamais le «retournement temporel» de la trajectoire d'une boule de billard. Cette impossibilité résulte du phénomène de chaos déterministe : une modification minime de la position ou de la vitesse initiales d'une boule modifie considérablement sa position finale.

Imaginons que l'on tire une boule dans une sorte de flipper comportant une centaine d'obstacles fixes, arrangés au hasard. Même dans des simulations sur ordinateur, la trajectoire de la boule n'est pas réversible. Lorsque, après avoir laissé la boule effectuer plusieurs dizaines de collisions, on l'arrête et on la renvoie en marche arrière en inversant sa vitesse, la boule ne parvient pas à refaire le trajet jusqu'à son point de départ : après une dizaine de collisions environ, elle rate un obstacle qu'elle aurait dû heurter, et la suite du parcours est modifiée. Dans une simulation des lois de la mécanique, le moindre arrondi dans les calculs fait échouer le retournement temporel ; or les ordinateurs tronquent toujours les nombres qu'ils manipulent. De la même façon, dans les expériences réelles, on ne parvient jamais à renvoyer la boule en sens inverse, exactement dans la bonne direction et avec la bonne vitesse.

Par opposition, la propagation des ondes est régie par des lois



linéaires : une petite perturbation de l'onde initiale modifie peu l'onde finale. Ainsi, malgré les inévitables imprécisions de mesure, si l'on enregistre l'onde finale et si on la renvoie en sens inverse, on obtient une onde qui se déplace en sens inverse de l'onde initiale, semblable à celle-ci, à des imperfections mineures près.

Des miroirs qui retournent le temps

Nos miroirs acoustiques à retournement temporel enregistrent le son «allô» qui arrive de la bouche des visiteurs. Chaque microphone qui compose ces miroirs mesure le son du «allô» qui provient de la bouche du visiteur à travers tous les obstacles de la salle, et tous ces signaux sont enre-

gistrés dans des mémoires électroniques. Lorsque la dernière composante du «allô» a été enregistrée, on passe à la phase de retournement temporel, qui consiste à relire l'ensemble des mémoires électroniques «en verlan». Plus exactement, on inverse la chronologie des signaux reçus par chaque microphone (et non la succession des syllabes). Les signaux arrivés les derniers sont relus en premier, et *vice versa*. Tous les microphones passent alors, de façon synchrone, en mode haut-parleur et sont alimentés par les signaux inversés stockés dans les mémoires électroniques. Ce qui sort du réseau de haut-parleurs est maintenant une onde sonore qui parcourt toutes les étapes de sa vie passée et qui se propage au travers de la pièce, sur les mêmes trajectoires

que le «allô» original et qui termine dans la bouche du locuteur.

Afin de fabriquer simplement ces miroirs, on utilise des transducteurs piézo-électriques, qui rassemblent les deux fonctions, microphone et haut-parleur, sur le même composant.

Le retournement temporel requiert également que la quantité d'énergie dissipée sous forme de chaleur soit faible : la chaleur est un mouvement aléatoire des molécules de l'air, alors qu'un son correspond à un mouvement collectif ordonné à l'échelle de la longueur d'onde, qui, seul, peut être retourné temporellement dans nos expériences. Cette condition est de même nature que la nécessité d'une faible friction dans les expériences de mécanique. En pratique, des boules de billard n'auront jamais le mouvement inverse, car elles sont freinées à l'aller par les frottements contre le support et par la résistance de l'air ; or on ne peut réaccélérer ces boules sur une trajectoire «retournée» dans le temps.

Lorsque les pertes d'énergie par dissipation sont suffisamment faibles, les équations auxquelles obéissent les ondes garantissent que, pour chaque émission sonore à partir d'une source, il existe en théorie un ensemble d'ondes qui emprunteraient exactement la même trajectoire en sens inverse jusqu'à la source du son. Cette propriété est vérifiée même quand le milieu de propagation est compliqué par la présence d'objets et par des variations de densité qui réfléchissent, dispersent et réfractent le son. Les ondes inversées font alors les mêmes tours et détours qu'à l'aller, et convergent simultanément à la source, comme si le cours du temps s'inversait. En 1988, nous avons construit et testé un tel miroir acoustique à retournement temporel, pour des ultrasons se propageant dans un milieu modérément hétérogène comparable à des tissus biologiques.

Une remarque permet de simplifier la construction des miroirs à retournement temporel : le réseau de transducteurs n'a pas besoin d'être continu pour assurer un retournement temporel optimal. Les lois de la diffraction nous apprennent qu'il suffit que les transducteurs soient répartis sur un réseau dont le pas (la distance entre deux transducteurs) est égal à la moitié de la plus petite longueur d'onde utilisée. Pour les mêmes raisons, les ondes se focalisent sur une

tache qui ne peut être plus petite que la moitié de la plus petite longueur d'onde utilisée. Autrement dit, les informations sur la source plus petites que cette grandeur sont perdues.

Dans l'idéal, le réseau de transducteurs couvrirait tous les murs de la pièce, sol et plafond compris, de sorte que l'on puisse engendrer la totalité de l'onde finale (voir la figure 1). En pratique, il est rarement possible d'entourer complètement la source avec des transducteurs, et l'on se contente d'un réseau de transducteurs de surface limitée, le miroir à retournement temporel. Évidemment, de l'information est alors perdue, et plus la dimension du miroir est faible, plus la taille du point focal augmente. Ce phénomène est l'analogue de la perte de résolution entre une image obtenue avec un grand miroir et celle obtenue avec un miroir plus petit. De fait, les opticiens étudient depuis une vingtaine d'années l'équivalent optique des miroirs à retournement temporel : les miroirs à conjugaison de phase. Ces dispositifs permettent, pour des ondes dans le domaine visible qui vibrent de façon bien sinusoïdale, d'observer une rétro-réflexion du faisceau : la lumière est réfléchie vers sa source, quelle que soit sa position relativement à celle du miroir. Cependant, ces miroirs ne peuvent retourner tous les détails d'une onde de lumière visible dont la modulation d'amplitude serait ultrarapide, comme on sait le faire en acoustique.

Un flipper chaotique

En 1994, Arnaud Derode, Philippe Roux et moi avons réalisé une expérience de retournement temporel d'ultrasons au travers d'un milieu analogue au flipper chaotique mentionné précédemment. Les ondes se réfléchissaient entre 2 000 tiges de métal parallèles, réparties aléatoirement dans une cuve d'eau (voir la figure 2). Un petit transducteur émettait pendant une microseconde une impulsion qui se propageait au travers de cette «forêt» de tiges jusqu'à un réseau linéaire de 96 transducteurs. Ce réseau détectait d'abord un premier front d'onde, correspondant à la partie du signal sonore qui s'était propagée en ligne droite à travers la forêt, puis une deuxième onde d'allure chaotique, pendant près de 200 microsecondes. Cette onde chaotique résultait de l'interférence entre toutes les ondelettes qui ont été diffusées sur les obstacles et qui emprun-

tent les multiples trajectoires possibles entre les tiges.

Dans la deuxième partie de l'expérience, nous avons retourné temporellement ces signaux et utilisé un hydrophone pour mesurer l'onde reçue là où elle avait été initialement émise. Le réseau renvoya un signal étalé sur 200 microsecondes environ, à travers la forêt de tiges, mais le signal récupéré à la source fut une impulsion d'une durée voisine d'une microseconde, comme celle qui avait été initialement émise. Nous avons également fait l'expérience sans les tiges. Aussi étonnant que cela paraisse, le retournement fut meilleur avec les tiges : le faisceau retourné temporellement se focalisait en une tache six fois plus petite avec les tiges que sans elles. En effet, les multiples réflexions à l'intérieur de la forêt de tiges redirigent vers le miroir une partie de l'onde initiale qui, sans ces obstacles, passerait à côté du réseau de transducteurs. Après l'opération de retournement temporel, l'ensemble de ce milieu diffusant se comporte à la manière d'une lentille convergente, comme si le miroir avait une ouverture six fois plus grande, et donc une résolution six fois meilleure.

Ces expériences ont montré que le phénomène de retournement temporel est stable. D'une part, les résultats étaient bons, alors que les signaux enregistrés étaient échantillonnés par des convertisseurs analogique-numérique, qui introduisaient des erreurs de numérisation. D'autre part, après de petits mouvements du réseau et des tiges d'une petite fraction de la longueur d'onde (0,5 millimètre), le retournement temporel donnait encore de bons résultats. En revanche, dans une expérience similaire avec des particules, le résultat serait désastreux, car chaque particule suit un trajet bien défini, et une petite erreur de vitesse ou de position initiale suffit pour que la particule manque un obstacle et que sa trajectoire ultérieure soit complètement altérée. Avec les ondes qui se propagent dans toutes les directions, l'amplitude est beaucoup plus stable, puisqu'elle résulte des interférences de toutes les trajectoires possibles.

Retournement temporel sur silicium

Quel serait le résultat si l'on réduisait à un le nombre de transducteurs de retournement temporel? Comment

pourrait-on rediriger toute l'information concernant une source vers un unique transducteur de retournement temporel? Nous avons enfermé la source et le transducteur dans une cavité «ergodique», aux parois parfaitement réfléchissantes. Une table de

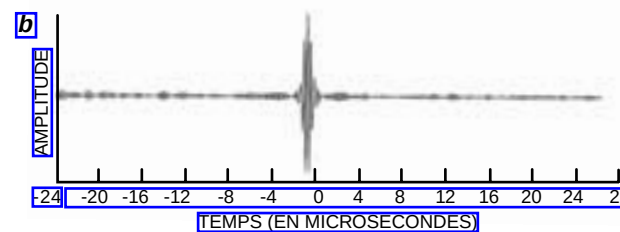
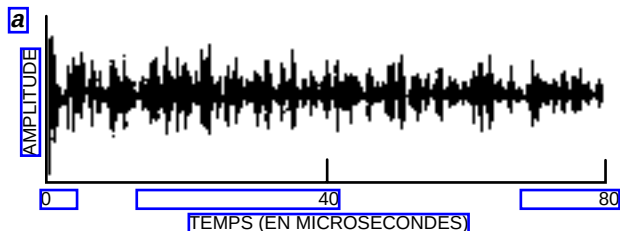
billard serait ergodique si ses bords étaient incurvés comme dans un stade: quelle que soit la direction initiale du tir, une boule finirait par passer en tout point de la table. De la même manière, dans une cavité ergodique, à condition d'attendre suffisamment longtemps,

toutes les ondes sonores émises par la source arrivent au transducteur.

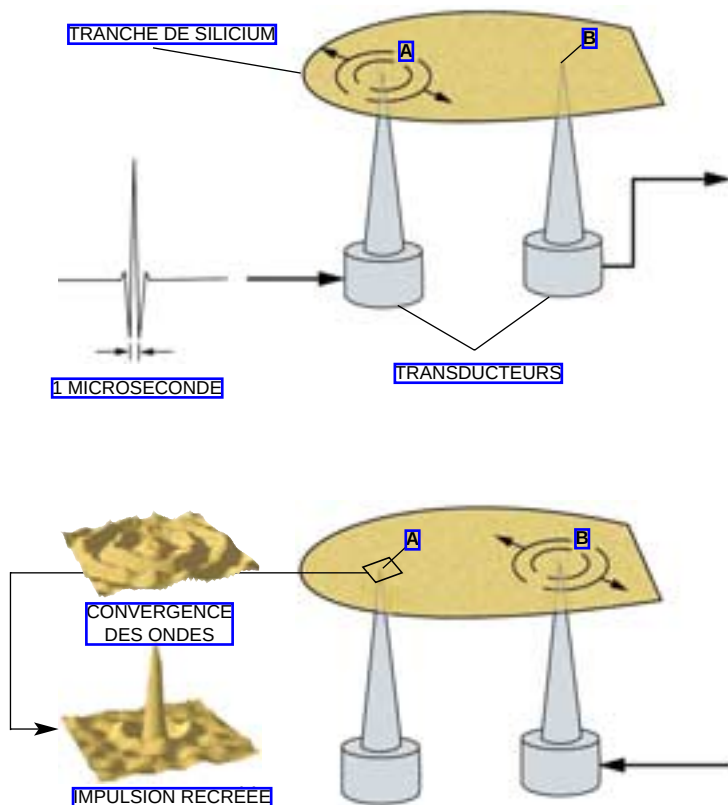
Voici trois ans, avec Carsten Draeger, nous avons mis en évidence un retournement temporel sur des ondes élastiques qui se propageaient à la surface d'un disque de silicium tronqué



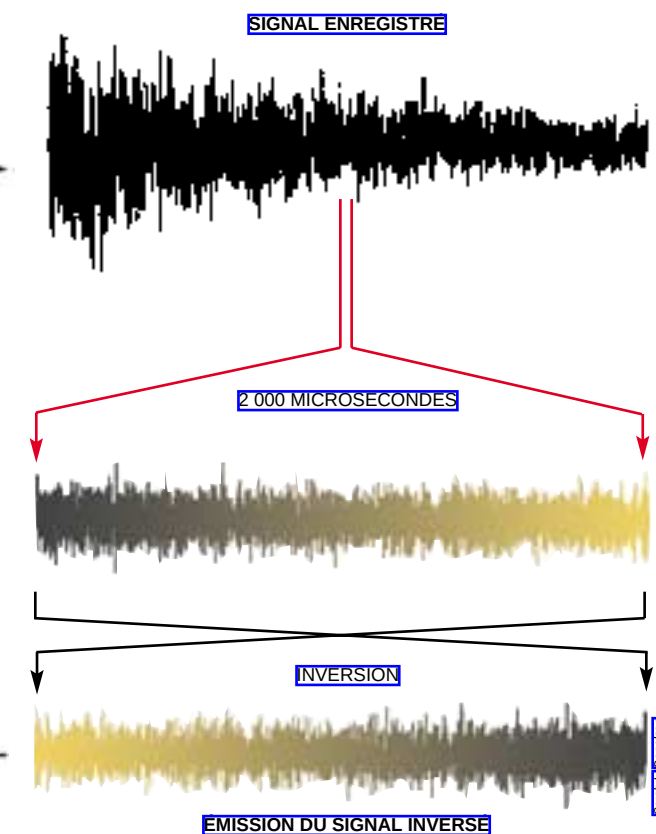
2. UNE PARTIE DE FLIPPER CHAOTIQUE à ondes acoustiques se joue lorsqu'une impulsion ultrasonore d'une durée d'une microseconde est émise dans l'eau par un transducteur (à gauche sur la photographie): les ondes ricochent en tous sens au milieu de 2 000 tiges de métal réparties au hasard, avant d'atteindre un miroir à retournement temporel constitué de 96 transducteurs (à droite sur la photo-



graphie). Chaque élément du miroir reçoit un signal ultrasonore apparemment chaotique (on en voit une partie en (a)), d'une durée très supérieure à celle de l'impulsion initiale. Lorsque le miroir renvoie les signaux chaotiques, inversés et synchrones, ils ricochent en marche arrière à travers le labyrinthe de tiges et se combinent pour redonner une impulsion bien nette (b) sur le transducteur de gauche.



3. UN UNIQUE TRANSDUCTEUR suffit à retourner temporellement une onde dans une «cavité» fermée. Un transducteur source émet une impulsion en un point A d'une petite tranche de silicium (en haut). Un transducteur situé en B enregistre les réverbérations chaotiques de l'impulsion, qui subit des centaines de



réflexions successives sur les bords de la tranche de silicium. Le transducteur placé en B réémet ensuite une petite partie de ce signal inversé (en bas). Après de nombreuses réflexions, les différentes composantes de ce signal se recombinaient pour recréer la brève impulsion initiale en A.

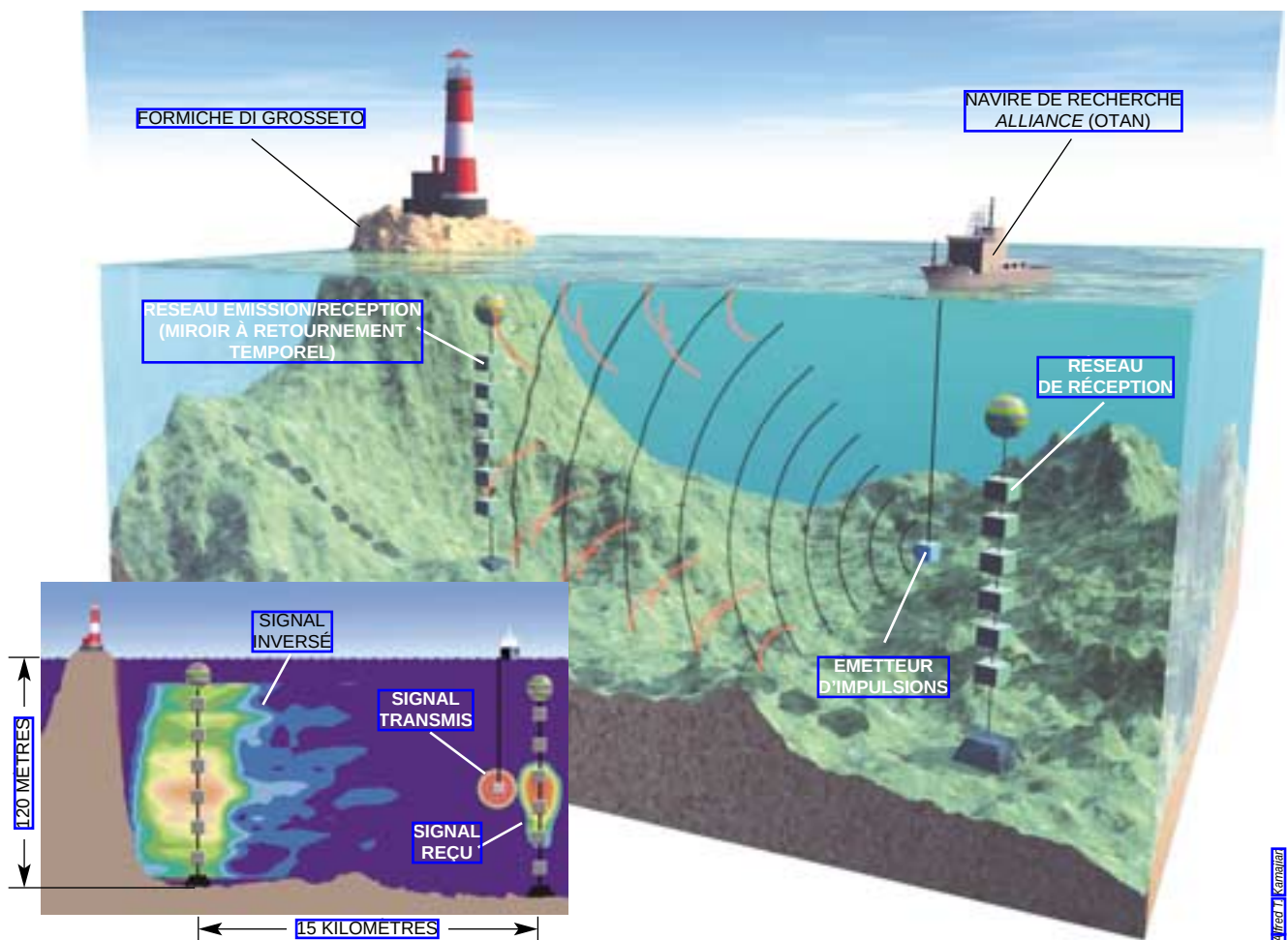
en utilisant un transducteur unique (voir la figure 3). Le transducteur source placé en un point A émettait une onde de surface circulaire, d'une microseconde de durée. Le transducteur de retournement temporel, situé au point B, enregistrait alors un signal chaotique pendant plus de 50 millisecondes (soit 50 000 fois la durée de l'impulsion initiale), correspondant à une centaine de réflexions successives de l'impulsion initiale sur le bord du disque. Nous avons ensuite retourné temporellement deux millisecondes du signal enregistré et avons réémis ce signal au moyen du transducteur situé en B. À l'aide d'un interféromètre optique, nous observions les déplacements verticaux que les ondes élastiques engendraient à la surface du silicium, autour du point A.

Nous avons alors assisté, au point A, à une remarquable restitution de l'impulsion originale, focalisée dans l'espace

sur un rayon d'environ une demi-longueur d'onde et dans le temps sur une durée de l'ordre d'une microseconde. En utilisant les réflexions sur les bords, le champ d'onde retourné temporellement a convergé en provenance de toutes les directions vers l'origine, et a produit une tache circulaire. La forme de l'onde retournée enregistrée en B, d'une durée de deux millisecondes (correspondant à la superposition de près de 2 000 oscillations), est le code permettant de focaliser exactement sur le point A à partir du point B. Ce principe pourrait servir de base à un système cryptographique où l'on engendrerait des impulsions en différents points de la cavité à partir de différents codes provenant de B.

Les miroirs à retournement temporel peuvent également être utiles dans les communications acoustiques sous-marines. Les performances des

systèmes classiques sont médiocres, en eau peu profonde, car le son s'y réfléchit entre le fond et la surface, de sorte qu'une seule impulsion donne de multiples échos sur le récepteur, comme dans la cavité ergodique. Cependant, les «parois» d'un chenal sous-marin ne sont pas ergodiques, et un miroir à retournement temporel doit comporter plusieurs transducteurs. Des chercheurs de l'Institut Scripps, de l'Université de San Diego, et du Centre de recherche sous-marin SACLANT, en Italie, ont récemment construit un miroir à retournement temporel de 20 éléments qu'ils ont testé, au large des côtes italiennes (voir la figure 4) : ce miroir focalisait des ondes sonores jusqu'à une distance de 30 kilomètres, dans 120 mètres d'eau. Comme dans l'expérience avec des tiges de fer, la tache focale du faisceau retourné était bien inférieure à celle que l'on



4. LES COMMUNICATIONS SOUS-MARINES seraient améliorées par l'utilisation du retournement temporel. L'efficacité de cette technique a été testée dans des eaux d'une profondeur de 120 mètres, près de l'île d'Elbe, au large de l'Italie. Une impulsion sonore a été émise à partir de l'emplacement de la cible. Déformé par la réfraction et par les multiples réflexions (en rouge) sur la surface et sur le fond, le signal a été enregistré jus-

qu'à 30 kilomètres de la source par un réseau de transducteurs. Le signal retourné et renvoyé par le réseau était bien focalisé sur la cible. Sur le cartouche (en bas à gauche), les contours de couleur indiquent l'intensité du signal sonore. L'impulsion de départ (disque rouge) arrive très déformée sur le miroir à retournement temporel, mais quand celui-ci renvoie le signal retourné, on obtient une impulsion bien focalisée sur le réseau récepteur (à droite).



5. LA POROSITE DE LA BOÎTE CRANIENNE engendre une forte dissipation de l'énergie ultrasonore, d'où la grande difficulté de la focalisation des ultrasons sur les tumeurs du cerveau. Néanmoins, un miroir à retournement temporel muni d'un algorithme de correction de dissipation permet d'obtenir des taches focales très fines à l'intérieur du crâne.

obtient avec les sonars classiques (une amélioration de la résolution d'un facteur 50 a été observée). Philippe Roux et moi-même avons réalisé des expériences similaires en utilisant des guides d'ondes ultrasonores, où se produisent de multiples réflexions. La focalisation de l'onde retournée dans l'espace et dans le temps engendre une impulsion acoustique très puissante, avec laquelle on peut créer une onde de choc.

Parmi les nombreuses applications envisageables des miroirs à retournement temporel, l'une des plus intéressantes est l'échographie : après l'émission d'une brève impulsion, on détecte les échos renvoyés par des cibles. Ainsi on explore le corps humain, on obtient des images des fonds marins (pour la détection de mines, de sous-marins ou d'objets enfouis), on teste des pièces mécaniques (contrôles non destructifs, à la recherche de fissures ou de défauts). Dans tous ces cas, une détection de bonne qualité requiert un faisceau acoustique très fin. Or, beaucoup de milieux de propagation distordent les faisceaux et dégradent la focalisation. En imagerie médicale, par exemple, les ultrasons traversent de la graisse, des os et des muscles avant d'atteindre des cibles comme des tumeurs ou des calculs rénaux. Comment corriger la déformation des faisceaux ultrasonores sans connaître la manière dont ils sont distordus ? Le miroir à retournement temporel pallie ces difficultés.

L'échographie ultrasonore

Dans un premier temps, une partie du réseau de transducteurs envoie une brève impulsion à travers le milieu afin d'«illuminer» la région à étudier. Si une cible est présente dans le milieu, elle réfléchit l'onde, et le réseau enregistre, retourne temporellement et réémet cette onde réfléchie. Le retournement temporel garantit que cette onde retournée se focalisera sur la cible, malgré les distorsions engendrées par le milieu traversé.

Lorsque la région à étudier ne contient qu'une cible, cette technique d'auto-focalisation est très efficace. En revanche, avec plusieurs cibles réfléchissantes, le problème est plus délicat. On sélectionne alors une cible en répétant la procédure plusieurs fois. Imaginons le cas simple où le milieu comporte deux cibles de réflectivités différentes. L'écho de l'impulsion initiale engendré par la cible la plus brillante a une amplitude supérieure à celle de l'écho provenant de la cible la moins réfléchissante. Par conséquent, le premier signal retourné temporellement focalise une onde de plus forte amplitude sur la plus réfléchissante des deux cibles. L'écho de ces ondes fait ressortir encore davantage la cible la plus brillante, et, après quelques itérations, on obtient un signal qui se focalise préférentiellement sur cette cible. Des techniques plus complexes, mises au point par

Claire Prada-Julia, permettent de sélectionner la cible la moins réfléchissante.

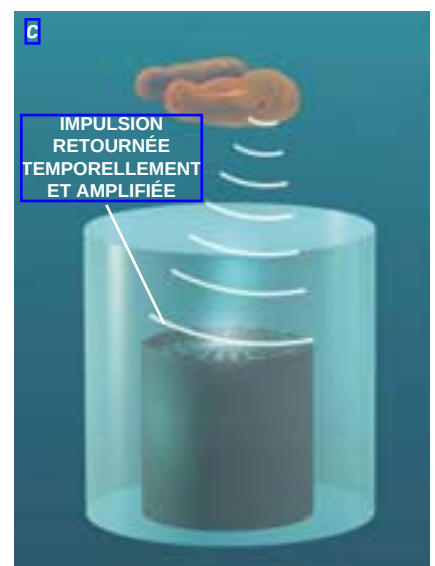
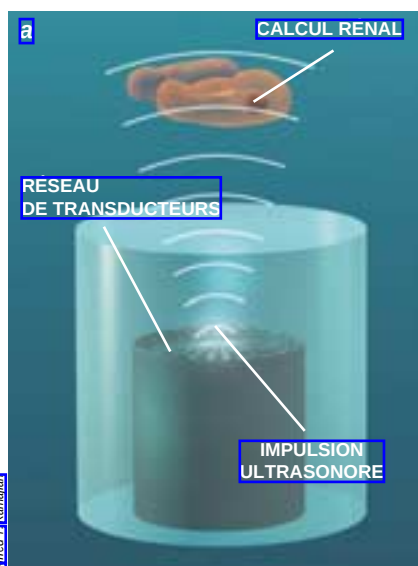
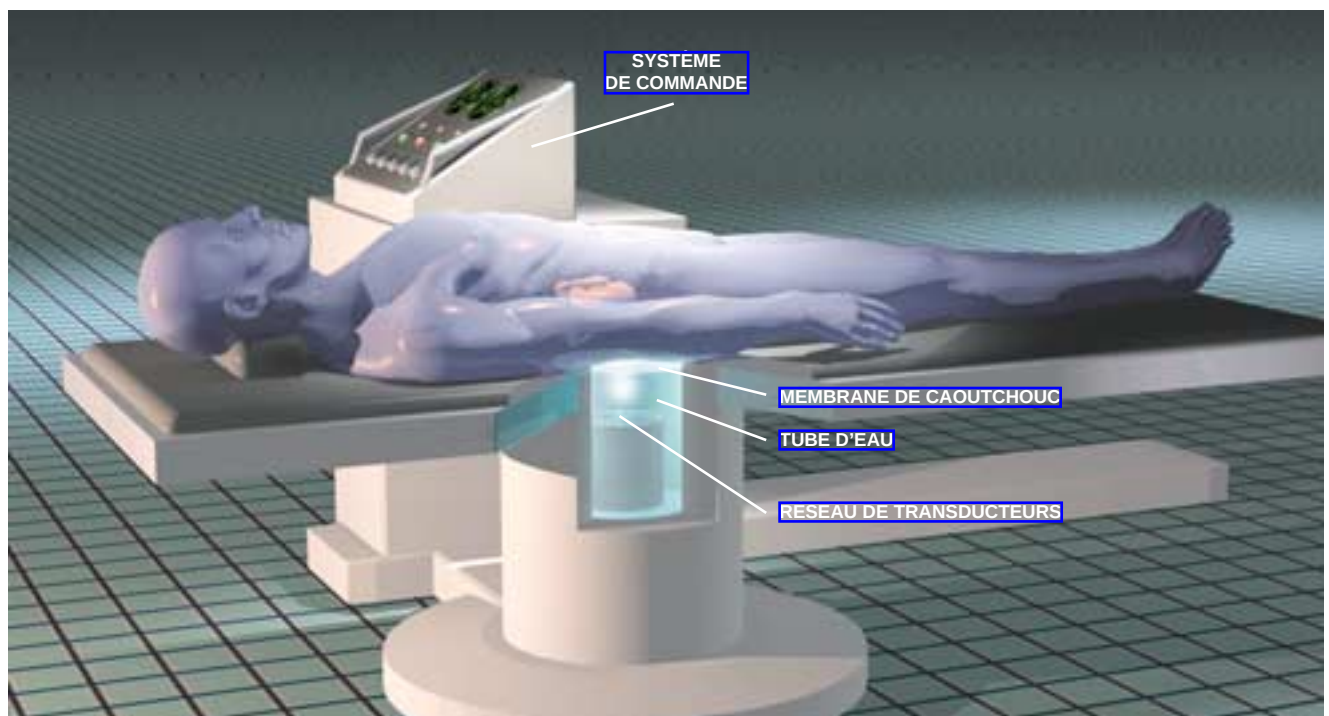
De toutes les applications médicales du retournement temporel, la destruction des calculs rénaux et biliaires est la plus avancée (voir la figure 6). Par des techniques classiques d'imagerie par ultrasons ou par rayons X, on localise avec précision de tels calculs, mais les tissus environnants empêchent une focalisation suffisante des ondes ultrasonores pour pulvériser efficacement les calculs. De

surcroît, les calculs bougent avec la respiration, et sont donc difficiles à suivre. Seuls 30 pour cent des tirs atteignent le calcul, qui n'est détruit que par plusieurs milliers de tirs.

Les techniques de retournement temporel des ultrasons optimisent les tirs : après plusieurs itérations de l'opération de retournement temporel, le faisceau ultrasonore se focalise sur la zone la plus réfléchissante du calcul. On peut alors renvoyer vers la cible une onde retournée de forte puissance, qui se focalise sur le cal-

cul et le détruit. Ce processus peut être répété pour suivre en temps réel les mouvements du calcul. Jean-Louis Thomas, François Wu et moi-même avons mis au point un miroir à retournement temporel de 20 centimètres de diamètre destiné à cette application. La procédure de focalisation et de poursuite sur des calculs a été testée avec succès dans deux hôpitaux.

L'hyperthermie par ultrasons est une autre application médicale prometteuse. Dans cette technique, on chauffe des tissus malades à l'aide d'ul-



6. LES CALCULS RÉNAUX peuvent être pulvérisés par des ultrasons, grâce à la propriété de focalisation automatique des miroirs à retournement temporel. Une impulsion ultrasonore émise par une partie d'un réseau d'émetteurs (a) est réfléchi et déformée par le calcul (b).

Cet écho, retourné temporellement et fortement amplifié, traverse les tissus et organes intermédiaires, se focalise sur le calcul (c) et le détruit. En itérant l'opération, on améliore la focalisation sur le calcul malgré ses mouvements, dus à la respiration du patient.

trasons de forte intensité : les températures supérieures à 65 °C détruisent des tissus biologiques en quelques secondes. Des appareils faisant appel aux techniques classiques pour focaliser les ultrasons existent déjà sur le marché, mais leur application est restreinte aux tissus statiques, comme les tumeurs cancéreuses de la prostate. Les mouvements du cœur et de la respiration limitent les applications abdominales et cardiaques. Emad Ebbini et ses collègues de l'Université du Michigan mettent au point des réseaux à focalisation automatique pour surmonter le problème. Avec Mikael Tanter et Jean-Louis Thomas, nous étudions l'hyperthermie du cerveau. Nous voulons focaliser les ondes au travers de la boîte crânienne, qui réfracte et disperse considérablement le faisceau d'ultrasons. De surcroît, le crâne est un matériau poreux : il dissipe une partie de l'énergie de l'onde en chaleur et brise la symétrie par retournement temporel des équations de propagation de l'onde. Nous avons mis au point une technique de focalisation qui corrige ces effets de dissipation avant l'opération de retournement temporel. Grâce à cette technique, nous envoyons un faisceau d'ultrasons au travers du crâne, qui se focalise sur une tache de 1,5 millimètre (voir la figure 5).

Nous avons également utilisé des miroirs à retournement temporel pour la détection de défauts dans des pièces. Lorsque les défauts sont petits, que la forme de la pièce est complexe ou que le matériau est hétérogène, la détection des défauts est délicate. Habituellement, on immerge la pièce à tester et les transducteurs dans une piscine, mais les faisceaux sont déviés par réfraction au passage de l'interface entre l'eau et le solide, ce qui complique la détection de petits défauts. De surcroît, dans les solides, les ondes ultrasonores engendrent des ondes variées, de types et de polarisation différentes. Nous avons montré que les techniques de focalisation à l'aide de miroirs à retournement temporel compensent automatiquement tous ces effets. Dans le cadre d'une collaboration avec la SNECMA (Société nationale d'étude et de construction de moteurs d'aviation), nous avons mis au point, avec F. Wu, un miroir à retournement temporel formé de 128 transducteurs capable de détecter des défauts de faible contraste dans des alliages de

titane utilisés dans les moteurs d'avion. Le titane possède une microstructure hétérogène, qui engendre un bruit échographique gênant, parce qu'il masque l'écho résultant des défauts. Par l'itération du retournement temporel, nous avons détecté des défauts de 0,4 millimètre dans des billettes de titane de 250 millimètres de diamètre, avec un rapport signal sur bruit bien meilleur que classiquement.

Maintenant que la technique de retournement temporel des ondes acoustiques est bien maîtrisée en laboratoire, un travail d'application s'impose. Le retournement d'un «allô» est amusant, mais le principe de la focalisation du «olla» au niveau de la bouche du locuteur peut également servir à engendrer des hologrammes acoustiques : le réseau de transducteurs peut, par exemple, être programmé pour focaliser simultanément le son «bonjour» près d'une personne, et «hello» près d'une autre.

D'autres ondes que les ondes sonores peuvent également être retournées temporellement. Des ingénieurs explorent les applications de ces techniques au radar pulsé, en utilisant les ondes électromagnétiques. Un autre type d'onde intervient en mécanique quantique : les fonctions d'onde quantiques qui décrivent la matière. Lorsque la fonction d'onde d'un électron heurte la frontière entre un conducteur et un supraconducteur, on assiste à une réflexion qui s'apparente au retournement temporel. À quels tours de magie assisterions-nous si l'on parvenait à retourner des ondes quantiques!

Mathias FINK est directeur du Laboratoire ondes et acoustique à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI) et professeur à l'Université Paris VII (Denis Diderot).

D. ROYER et E. DIEULESAINT, *Ondes élastiques dans les solides*, tome 1, Masson, 1996.

M. FINK et C. PRADA, *Ultrasonic Focusing with Time-Reversal Mirrors*, *Advances in Acoustic Microscopy* Serie, sous la direction de A. Briggs et W. Arnold, Plenum Press, 1996.

M. FINK, *Time-Reversed Acoustics*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 3, pp. 34-40, mars 1997.

M. FINK, *Ultrasound Puts Materials of the Test*, in *Physics World*, vol. 11, n° 2, pp. 41-45, février 1998.

Les reines esclavagistes

HOWARD TOPOFF

Chez certaines espèces de fourmis, les invasions, les meurtres et les prises d'otages font partie de la vie quotidienne. Les reines qui mènent ces assauts pratiquent une forme de parasitisme social.

Les parasites vivent aux dépens d'autres espèces. Pourquoi sont-ils moins bien considérés que les prédateurs, qui font de même? De nombreuses associations collectent des fonds pour la protection des loups ou des orques, mais personne ne se préoccupe des vers solitaires. Nous associons ces parasites à la maladie et les percevons comme des organismes sournois qui, contrairement à des prédateurs décents, s'insinuent dans notre corps et nous détruisent lentement.

Le parasitisme social est beaucoup moins macabre. Il est pratiqué par des animaux variés, tels les oiseaux et les fourmis. Par exemple, les coucous pondent leurs œufs dans le nid d'autres espèces, telle la fauvette, à

qui ils laissent le soin d'élever leur progéniture. Le pique-bœuf à tête brune aussi. Dans les deux cas, les œufs du parasite ressemblent à ceux du «baby-sitter».

Les fourmis esclavagistes ont des comportements de parasitisme social plus variés que les oiseaux. Depuis 15 ans, au Muséum d'histoire naturelle d'Arizona, nous étudions celui de la fourmi *Polyergus breviceps*. Comme les quatre autres espèces de *Polyergus* existantes, ces fourmis sont incapables d'assurer elles-mêmes leur survie. Leurs ouvrières ne rapportent pas à manger, ne nourrissent pas les jeunes ni la reine et ne nettoient même pas la fourmilière. Elles font ces travaux

1. POUR CAPTurer DES ESCLAVES, les fourmis *Polyergus* attaquent les colonies de fourmis *Formica* (1) : elles s'emparent de leurs cocons, qu'elles rapportent ensuite dans leur propre fourmilière. Lors de ces raids, de jeunes reines *Polyergus* s'accouplent, puis partent établir leur propre colonie (2). L'une d'entre elles reste dans la colonie de *Formica* qu'elle cherche à dominer : elle affronte les ouvrières (3), puis pénètre dans la fourmilière, souvent distante de quelques mètres de la sienne seulement. Elle se fraye un passage vers la chambre inférieure où se trouve la reine *Formica* et tue cette dernière (4). Puis, elle la lèche pour s'imprégner de ses phéromones, grâce auxquelles les ouvrières l'acceptent comme nouvelle reine et s'occupent de ses œufs (5).



3

4

5

à la place des fourmis d'une espèce voisine, *Formica*, qu'elles capturent et utilisent comme esclaves : périodiquement, des armées de quelque 1 500 *Polyergus* partent en raid (elles vont parfois jusqu'à 150 mètres de leur propre nid), pénètrent dans une fourmilière construite par l'espèce *Formica*, expulsent la reine et les ouvrières, et capturent les cocons. De retour chez elles, elles laissent à leurs esclaves le soin de s'en occuper, jusqu'à ce que les ouvrières *Formica* qu'ils contiennent soient prêtes à en sortir. Celles-ci se chargent alors de toutes les tâches nécessaires au maintien de la colonie, par exemple de l'approvisionnement en nectar et en insectes morts, de régurgiter de la nourriture pour leurs maîtres et d'entretenir la fourmilière en enlevant les débris et en creusant de nouvelles chambres. Quand la population devient excessive, les quelque 3 000 esclaves d'une colonie

de *Polyergus* cherchent un endroit où construire une nouvelle fourmilière et y transportent les ouvrières *Polyergus* (2 000 environ), les œufs, les larves, les cocons et la reine.

Chez les fourmis, l'esclavagisme n'est pas rare. Sur près de 8 000 espèces, au moins 200 ont une relation symbiotique avec une autre espèce. À une extrémité du continuum de comportements, les *Formica wheeleri* sont des parasites facultatifs : elles savent subvenir à leurs propres besoins, mais capturent des esclaves pour augmenter leur force de travail. À l'opposé, d'autres espèces esclavagistes, telles les *Polyergus*, sont des parasites sociaux obligatoires : sans esclaves, elles ne survivent pas.

Nous nous intéressons aux fourmis *Polyergus* parce que nous voulons déterminer les adaptations évolutives liées au parasitisme social obligatoire. Les raids pour capturer des esclaves existent aussi chez d'autres espèces de fourmis, mais les *Polyergus* ont un comportement spécifique que nous avons étudié : la prise de pouvoir par la reine sur une fourmilière *Formica*, sans l'aide d'aucune ouvrière.

Chez la plupart des fourmis, la fondation d'une nouvelle colonie se déroule de la manière suivante : la reine s'accouple le plus souvent lors de son vol nuptial (toutes les espèces ne le pratiquent pas), puis elle se débarrasse de ses ailes, creuse un trou, y pond quelques œufs, nourrit les larves avec des aliments qu'elle a en réserve, jusqu'à ce que celles-ci parviennent à maturité et assurent l'entretien de la nouvelle fourmilière. Toutefois, les reines *Polyergus* sont incapables d'élever leur première ponte sans esclaves. Elles semblent condamnées : comment parviendraient-elles à envahir une fourmilière *Formica*, à tuer la reine et à se faire accepter par ses ouvrières, sans l'aide d'une seule ouvrière pour les aider ?

Tous les ans, une centaine d'œufs pondus par chaque reine *Polyergus* se développent en fourmis sexuées, qui quittent la colonie parentale pour tenter d'en fonder une nouvelle. En Arizona, les jeunes reines *Polyergus breviceps* ont abandonné le vol nuptial. Au lieu de s'élancer vers le ciel, elles partent avec les ouvrières, lors d'un raid, s'arrêtent au milieu de la cohorte, attirent un mâle à l'aide d'une phéromone sécrétée par leur glande mandibulaire, s'accouplent et se débarrassent de leurs ailes. Ensuite, elles ont une alternative : continuer le raid et atteindre une colonie *Formica* déjà envahie, ou trouver seules une autre colonie *Formica* plus éloignée. La dispersion des ouvrières *Formica* facilite la première solution, mais d'autres *Polyergus* risquent de détruire ultérieurement la nouvelle colonie, car ces espèces ne tolèrent pas de colonies de congénères sur leur territoire. La deuxième solution est l'abandon du raid : la reine augmente ses chances en partant seule chercher une fourmilière d'accueil hors du territoire d'une population de *Polyergus* déjà installée.

Des machines à tuer

Quand elle trouve une fourmilière *Formica*, une reine *Polyergus* l'usurpe par une méthode qu'on ne peut pas observer directement : tout se passe sous terre. Aussi, avec mes collègues, nous étudions le comportement des fourmis dans des fourmilières artificielles transparentes : nous plaçons une reine, 15 cocons et 15 ouvrières de *Formica gnava* (une vraie colonie contient environ 5 000 ouvrières) dans une fourmilière de notre construction, puis nous plaçons une reine



2. UNE OUVRIÈRE de l'espèce *Polyergus* transporte un cocon de l'espèce *Formica* (en haut à gauche) vers sa fourmilière, où il sera pris en charge par les esclaves *Formica* capturées lors d'un raid précédent. Près de 1 500 ouvrières *Polyergus* participent à chaque raid de pillage des cocons (ci-dessus). Elles en volent jusqu'à 14 000 par saison.

Polyergus tout juste fécondée devant la fourmilière.

La reine *Polyergus* trouve vite l'entrée, se dirige sans hésitation vers la reine *Formica*, écartant les ouvrières, qui l'attaquent en les mordant avec ses mandibules ou en les repoussant avec une phéromone sécrétée par sa glande de Dufour, située dans l'abdomen. Une fois la résistance des ouvrières vaincue, la reine *Polyergus* s'attaque à la reine *Formica* en lui mordant la tête, le thorax et l'abdomen pendant près de 25 minutes. Entre deux assauts, elle lèche les plaies de sa victime agonisante. Quelques secondes après la mort de la reine *Formica*, ses ouvrières changent de comportement : elles ne sont plus agressives et commencent à toiletter la reine *Polyergus*, exactement comme leur ancienne souveraine. La reine *Polyergus* rassemble les cocons *Formica* en une pile ordonnée et se poste triomphalement au sommet. Le pouvoir est alors pris.

Pourquoi les ouvrières *Formica* acceptent-elles la reine usurpatrice ? Apparemment parce qu'elle s'imprègne des phéromones de l'ancienne reine, lorsqu'elle la tue et la lèche. Pour vérifier cette hypothèse, Ellen Zimmerli et moi-même avons modifié l'expérience précédente, en tuant d'abord la reine *Formica*, en la congelant, puis en la décongelant juste avant de placer la reine *Polyergus* à l'entrée de la fourmilière. Celle-ci a attaqué la reine morte, l'a mordue et léchée pendant près de 25 minutes, comme si elle était vivante. Dès la fin de cette tâche, les ouvrières *Formica* ont toiletté la reine *Polyergus*, l'adoptant définitivement.

D'après nos hypothèses, les ouvrières *Formica* n'accepteraient pas la reine *Polyergus* en l'absence de leur souveraine dans la fourmilière. Nous avons testé cette prévision en modifiant l'expérience précédente sans reine *Formica* dans la fourmilière : les ouvrières ont attaqué la reine *Polyergus* avec leurs mandibules, ont immobilisé ses pattes, puis l'ont mordue jusqu'à la mort.

Recherche reine et ouvrières

Les fourmilières des espèces *Formica* contiennent souvent plusieurs reines. Que se passerait-il si une jeune reine *Polyergus*, fraîchement fécondée, envahissait une fourmilière contenant plusieurs reines *Formica* ? Nous avons fait l'expérience avec des fourmilières ren-



Avec l'amabilité de l'autrice de la photo : Howard Tordoff

3. EN SORTANT DE SON COCON, une ouvrière de l'espèce *Formica* considère qu'elle appartient à l'espèce *Polyergus*, car les phéromones de cette dernière espèce sont les seules qu'elle rencontre. Elle s'occupe de nourrir ses maîtres, de nettoyer la fourmilière et, même, de déménager la colonie, en cas de surpeuplement. Une colonie de 2 000 *Polyergus* ne survit que grâce aux quelque 3 000 esclaves de l'espèce *Formica*, qui l'entretiennent.

fermant 2 à 25 reines : leur nombre ne dissuade pas la reine *Polyergus* d'attaquer. Une fois qu'elle a éliminé la première reine *Formica*, elle est acceptée comme nouvelle reine. Puis, jour après jour, sans se presser, elle localise et tue méthodiquement toutes les autres reines *Formica*. Plusieurs semaines lui sont parfois nécessaires pour venir à bout des derniers vestiges d'opposition.

Cependant, les reines *Polyergus* ne réussissent pas toujours à prendre le pouvoir. Parfois, elles rencontrent des phalanges d'ouvrières *Formica* qui les mettent en pièces. Ont-elles une autre stratégie d'attaque ? Comme la période de reproduction des *Polyergus* et des *Formica* se chevauche, nous avons supposé que, si les reines se rencontraient peu après l'accouplement et que la reine *Polyergus* s'imprégnait des phéromones de son adversaire lorsqu'elle l'attaque, ce « passeport » chimique lui donnerait accès à n'importe quelle colonie *Formica*, sans avoir à combattre.

L'expérience a montré que nous avons tort : quand on réunit une jeune reine *Polyergus* et une jeune reine *Formica gnava*, elles passent quelques secondes à s'examiner avec leurs antennes, mais elles ne se battent pas. Les jeunes reines *Formica* ont-elles une signature chimique différente de celle des reines plus âgées ? Pour déterminer le moment où une reine *Formica* acquiert les phéromones propres au statut de reine établie, Christine Johnson et moi-même avons placé des reines *Formica* fécondées dans des fourmilières artificielles, jusqu'à ce qu'elles pondent. Puis

nous les avons confrontées à de jeunes reines *Polyergus*, qui les ont encore ignorées. Après plusieurs semaines, quand les œufs sont devenus des larves, les reines *Polyergus* ont continué d'ignorer les reines *Formica*.

Pour comprendre ce comportement, nous avons essayé de raisonner comme des fourmis. Si une reine *Polyergus* fraîchement fécondée pénètre dans une fourmilière *Formica* et tue la reine, alors que celle-ci élevait son premier couvain, l'envahisseur, incapable de se nourrir ou d'alimenter le couvain, mourrait rapidement de faim. En toute logique, les reines *Polyergus* ne devraient tenter d'usurper une colonie *Formica* que lorsque celle-ci a des ouvrières pour rapporter de la nourriture et faire les autres travaux ; sinon, le meurtre de la reine *Formica* ne sert à rien.

Une vie dangereuse

Deux mois s'écoulent entre la fécondation et le développement complet du premier couvain de la reine *Formica*. Dès que huit ouvrières sont arrivées à maturité, C. Johnson a confronté la colonie à une reine *Polyergus* qui avait déjà régné sur des ouvrières *Formica*, mais elle n'a toujours pas observé de réaction. Cinq mois plus tard, quand la colonie comptait 19 ouvrières, la reine *Polyergus* a tué la reine *Formica*, avant de se faire accepter comme nouvelle souveraine. Les phéromones de la reine *Formica* changent donc progressivement, au cours de l'établissement d'une colonie, mais la nature de ces modifications chimiques reste à élucider.

Ma collègue Linda Goodloe a découvert que les reines *Polyergus lucidus* ne s'attaquent qu'aux espèces de *Formica* avec lesquelles elles ont été élevées, c'est-à-dire qui étaient esclaves de la colonie de leur mère, car le parasitisme social nécessite des interactions comportementales complexes entre les deux espèces.

Comment ce parasitisme est-il apparu ? Une reine fraîchement fécondée a-t-elle envahi un jour une colonie d'une espèce différente de la sienne ? L'aventure, bien que risquée, aurait été payante, car la reine aurait alors pondu beaucoup plus d'œufs que si elle était restée seule, puisqu'elle avait des ouvrières étrangères pour

s'en occuper. Puis la colonie aurait crû rapidement, nécessitant la mise en place des premiers raids de pillage vers d'autres colonies et favorisant la perpétuation du comportement.

Ce scénario est-il le bon ? Pour le savoir, nous avons étudié des fourmis *Polyergus* vivant en altitude, qui s'attaquent aux *Formica occulta*, plutôt qu'aux *Formica gnava*. Nous avons capturé des colonies de *Formica occulta*, les avons installées dans nos fourmilières artificielles et y avons introduit une reine *Polyergus* fraîchement fécondée qui provenait d'une colonie de basse altitude.

Comme nous le supposions, les attaques des reines *Polyergus* contre des ouvrières dont elles n'avaient pas l'ha-

bitude ne furent pas toutes réussies. Sur sept reines *Polyergus*, cinq n'ont pas attaqué. Parmi elles, trois, qui n'étaient pas agressives, ont été tuées par des ouvrières *Formica occulta* et deux ont fui. Toutefois, deux reines *Polyergus* ont tué la reine *Formica*. Après avoir terminé de lécher les reines mortes, elles ont été adoptées par les ouvrières *Formica occulta*.

Le «parasitisme social» est-il un terme adapté ?

Dans *De l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle*, Charles Darwin décrit déjà les comportements de *Polyergus*. Il s'interroge sur l'évolution du



Avec l'amabilité de l'association C. Howard / roch



Avec l'amabilité de l'association C. Howard / roch



Raymond Z. Vénier

4. LE COMBAT ENTRE DEUX REINES, l'une de l'espèce *Formica* (en haut à gauche) et l'autre de l'espèce *Polyergus* (en haut à droite) dure environ 25 minutes. Les reines, qui ont à peu près la même taille et la même force, se mordent avec leurs mandibules

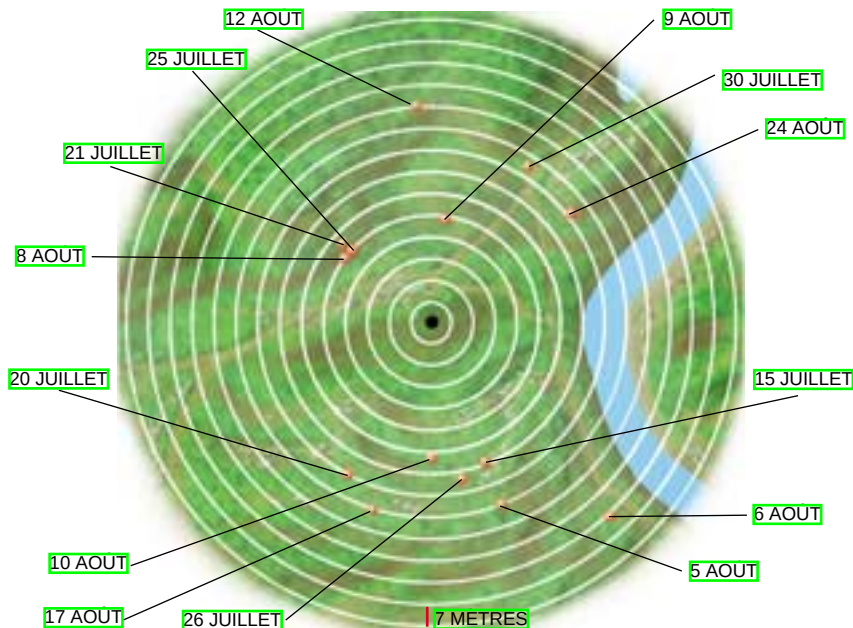
(en bas). Quand la reine de l'espèce *Polyergus* est victorieuse, elle lèche les plaies de sa victime, s'imprégnant ainsi de ses phéromones, grâce auxquelles les ouvrières l'adoptent comme nouvelle souveraine.

parasitisme social et se demande notamment ce qu'en tirent les esclaves. Une colonie de *Formica* perd parfois plus de 14 000 cocons par saison de raids. Sa seule «défense» évolutionniste est le remplacement du couvain, grâce à l'énorme potentiel reproductif de la reine *Formica*.

Pourquoi les fourmis esclaves n'abandonnent-elles pas leurs maîtres pour rejoindre leur colonie d'origine? Peut-être parce que les esclaves fraîchement écloses considèrent les ouvrières, le couvain et la reine *Polyergus* comme leur famille, grâce à un phénomène d'empreinte : les phéromones auxquelles elles ont été exposées quand elles sont sorties de leur cocon déterminent ce comportement, de même que des stimuli visuels ou sonores déterminent le comportement des canetons, vis-à-vis de leur mère. Même si elles ne participent pas aux raids, elles agressent les *Formica* qu'elles rencontrent. Le terme d'adoption correspond mieux à la réalité que celui d'esclavagisme, puisque les ouvrières *Formica* n'ont jamais connu d'autre domicile que la fourmilière *Polyergus*.

Les liens sociaux entre différentes espèces de fourmis sont d'autant plus favorisés qu'elles se sont déjà côtoyées. Toutefois, toutes les espèces ne peuvent cohabiter : plus deux espèces sont éloignées sur le plan de l'évolution, moins elles sont aptes à entretenir des relations. L'entomologiste italien Carlo Emery avait déjà énoncé cette règle : une parenté étroite entre les parasites sociaux et leurs hôtes implique des ressemblances nécessaires à l'établissement de leurs relations. Chez les fourmis, ces relations fonctionnent bien parce que les ouvrières *Formica* ont les mêmes activités dans la fourmilière *Polyergus* que dans leur colonie d'origine. Leur comportement ne change pas.

Depuis Darwin, les scientifiques citent le parasitisme social chez les insectes et chez les oiseaux comme un exemple d'évolution convergente. Les études éthologiques confirment cette convergence en révélant les similitudes. En Angleterre, les coucous parasitent quatre espèces d'hôtes, mais chaque femelle confie toujours ses œufs à l'espèce qui l'a élevée. Ces oiseaux font comme les reines *Polyergus*, qui parasitent l'espèce *Formica* de leur fourmilière d'origine, à cause du phénomène d'empreinte.



5. LES FOURMILIÈRES de l'espèce *Polyergus* (au centre) sont souvent à moins de 150 mètres des fourmilières *Formica* qu'elle attaque (en rouge). Ce schéma correspond au cas d'une colonie qui a mené 14 raids sur 12 fourmilières, en l'espace de six semaines (du 15 juillet au 24 août).



6. CETTE REINE de l'espèce *Polyergus* est au sommet de son butin de cocons de l'espèce *Formica*. La survie de la colonie dépend des esclaves qui éclore. Bien que près de 200 espèces de fourmis soient esclavagistes, les reines de l'espèce *Polyergus* sont les seules à prendre le pouvoir sans l'aide d'aucune ouvrière, sur les colonies qu'elle asservissent.

Au début de ma carrière, je trouvais que l'expression «parasitisme social» était inappropriée : le mot «social» suppose une communication, une coopération, voire de l'altruisme, qui me semblaient incompatibles avec les comportements égoïstes des parasites. Ultérieurement je suis revenu sur cette opinion, car les parasites sociaux communiquent avec leur hôte, comme avec les membres de leur propre espèce. Après 15 ans de recherche, je comprends pourquoi Darwin a cherché à intégrer le parasitisme social dans sa théorie de l'évolution. Il disait avoir abordé le sujet avec scepticisme, comme n'importe qui l'aurait fait, confronté à un phénomène aussi extraordinaire que l'instinct esclavagiste.

Howard TOPOFF travaille au Muséum d'histoire naturelle d'Arizona.

Howard TOPOFF et Ellen ZIMMERLI, *Colony Takeover by a Socially Parasitic Ant, Polyergus Breviceps*, in *Animal Behaviour*, vol. 46, 3^e partie, pp. 479-486, septembre 1993.

Howard TOPOFF et Ellen ZIMMERLI, *Queens of the Socially Parasitic Ant Polyergus Do Not Kill Queens of Formica That Have Not Formed Colonies*, in *Insect Behavior*, vol. 7, n° 1, pp. 119-121, janvier 1994.

Howard TOPOFF, *Adaptations for Social Parasitism in the Slave-Making Ant Genus Polyergus*, in *Comparative Psychology of Invertebrate*, sous la direction de Gary Greenberg et Ethel Tobach, Garland Publishing, 1997.

La vision : une fenêtre sur la conscience

NIKOS LOGOTHETIS

Afin de comprendre ce qu'est la conscience, les neurobiologistes analysent la perception visuelle et, notamment, l'interprétation des signaux optiques captés par l'œil.

Au premier coup d'œil, on voit, au centre du tableau de Salvador Dali (voir la figure 1), le visage d'un homme, les yeux levés vers le ciel, les lèvres pincées sous une épaisse moustache. En regardant mieux, on perçoit une image plus complexe : le nez et les moustaches blanches sont la coiffe et le châle d'une femme assise, qui tourne le dos ; les reflets dans les yeux sont les fenêtres éclairées (ou les reflets sur les toits) de deux chaumières nichées au creux des collines. Les taches sur la joue représentent un enfant en bermuda, à côté de la femme assise. Avec un peu de recul, on comprend même qu'ils sont au bord d'un lac et regardent les chaumières sur l'autre rive, à travers un trou dans un mur de briques, qu'on avait d'abord pris pour le contour du visage de l'homme.

Avec ce tableau intitulé *Vielliesse, Adolescence, Enfance (Les Trois Âges)*, Dali jouait sur le système visuel humain, qui interprète parfois une même image de deux manières différentes. Que se passe-t-il dans le cerveau, au moment où l'on comprend que les trois visages n'en sont pas vraiment ? Pour identifier l'activité cérébrale correspondant à la conscience, les neurobiologistes utilisent des stimuli visuels ambigus.

La conscience est un concept beaucoup plus difficile à définir qu'à étudier. Récemment, les neurosciences ont progressé dans la compréhension de l'activité des cellules nerveuses nommées neurones, dans le cerveau.

Pourtant, de nombreux physiologistes et scientifiques rechignent à admettre que cette activité, qui n'est après tout qu'électrique et chimique, explique l'esprit. Toutefois la conscience revêt plusieurs aspects, dont certains se prêtent à des études expérimentales (voir *L'orchestration de la pensée*, par Francis Crick et Christof Koch, *Pour la Science*, novembre 1992). Notamment, au lieu de se préoccuper inlassablement de la nature de la conscience, on gagne à chercher quelles activités neuronales correspondent à une expérience consciente et quelles activités n'en relèvent pas.

Les stimuli visuels ambigus

Les stimuli visuels ambigus sont utiles dans de telles analyses. L'interprétation d'un stimulus visuel ambigu ne dépend pas du fonctionnement de l'œil, mais de celui du cerveau, c'est-à-dire de son organisation interne et de la façon dont il nous rend conscients des informations sensorielles. En 1890, le psychologue William James a proposé d'examiner la phrase « Pas de lieu Rhône que nous », qui n'a pas de sens. Un anglophone qui la relit plusieurs fois finit par comprendre qu'elle se prononce comme *paddle your own canoe* (« pagayez pour faire avancer votre propre

1. LES STIMULI AMBIGUS, tel ce tableau de Salvador Dali, *Vielliesse, Adolescence, Enfance (Les Trois Âges)*, sont utilisés pour l'étude de la conscience.

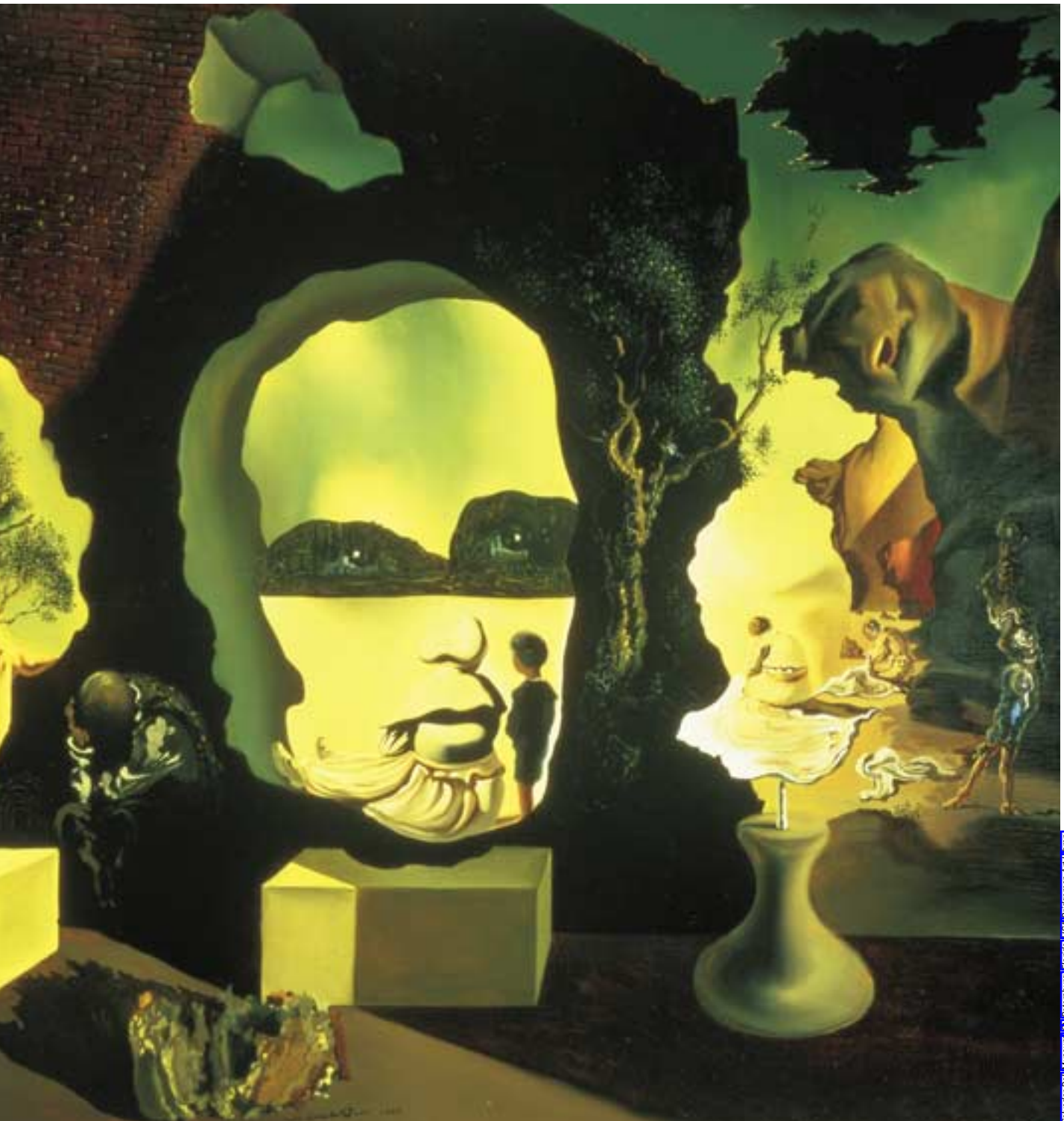


barque», c'est-à-dire «réussissez par vous-même»). Comment l'activité neuronale change-t-elle quand il prend conscience du sens de cette phrase?

Dans les expériences sur les stimuli visuels ambigus, les neurobiologistes utilisent des images qui engendrent deux perceptions distinctes, alternant dans la conscience. Par exemple, la

perspective du cube de Necker (voir la figure 2) semble s'inverser toutes les quelques secondes. Ce phénomène doit correspondre à un événement cérébral particulier, accessible aux analyses neurobiologiques. Pour savoir si un stimulus a atteint la conscience d'un être humain, il suffit de lui poser la question. Cependant, on ne peut pas corréler la perception d'un stimulus à

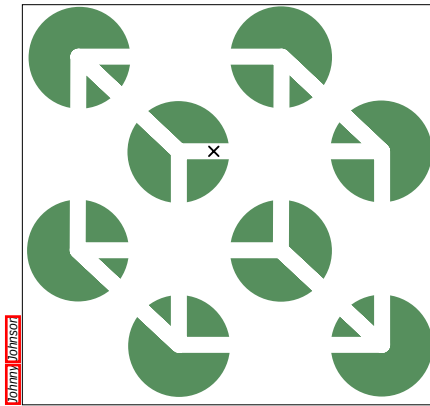
l'activité des neurones, car celle-ci est impossible à mesurer directement sur une personne. Pour obtenir de telles informations, nous étudions des singes, entraînés à signaler ce qu'ils perçoivent, par exemple en tirant sur des leviers. Le cerveau des singes est organisé comme celui des humains et leurs réactions aux stimuli visuels ambigus est similaire. D'ailleurs, de nombreux



Salvador Dalí, *Musée d'Art Moderne de la Ville de Paris*, Paris, France, 1931

neurobiologistes admettent que les singes sont conscients, un peu comme l'homme.

Avec mes collègues, nous étudions la rivalité binoculaire, c'est-à-dire ce qui se passe quand on présente simultanément aux deux yeux deux images différentes. Dans une telle situation, le cerveau humain prend d'abord conscience d'une image, puis de l'autre ; ensuite, ces deux images alternent lentement (voir l'encadré ci-dessous). Les singes auxquels nous apprenons à utiliser des stéréoscopes signalent aussi un changement de leur perception, toutes les quelques secondes. Nous enregistrons les modifications d'activité neuronale correspondantes.



2. LE CUBE DE NECKER s'interprète de plusieurs façons : l'arête marquée de la croix noire semble appartenir à la face avant ou à la face arrière du cube ; les cercles semblent placés derrière le cube ou être des trous dans une feuille derrière laquelle se trouve le cube.

De l'œil à la conscience

Des décennies de telles études ont révélé que l'information visuelle captée par l'œil gagne le cerveau en passant par plusieurs systèmes successifs de traitement de l'information. Chaque système, ou « module », traite un aspect différent de l'information, avec un degré de spécialisation d'autant plus grand que l'information s'éloigne de l'œil (voir la figure 3).

Captée par les rétines, l'information visuelle passe d'abord par les corps genouillés latéraux, dont les neurones sont activés par l'information venant d'un œil ou de l'autre, mais pas des deux à la fois. Chacun réagit aux changements de luminosité ou de couleur

La rivalité binoculaire

Pour ressentir l'effet de rivalité binoculaire, roulez une feuille de papier en un tube que vous tenez contre l'œil droit, à l'aide de la main droite. Placez la paume de votre main gauche à dix centimètres de votre œil gauche, de sorte qu'elle touche le tube.

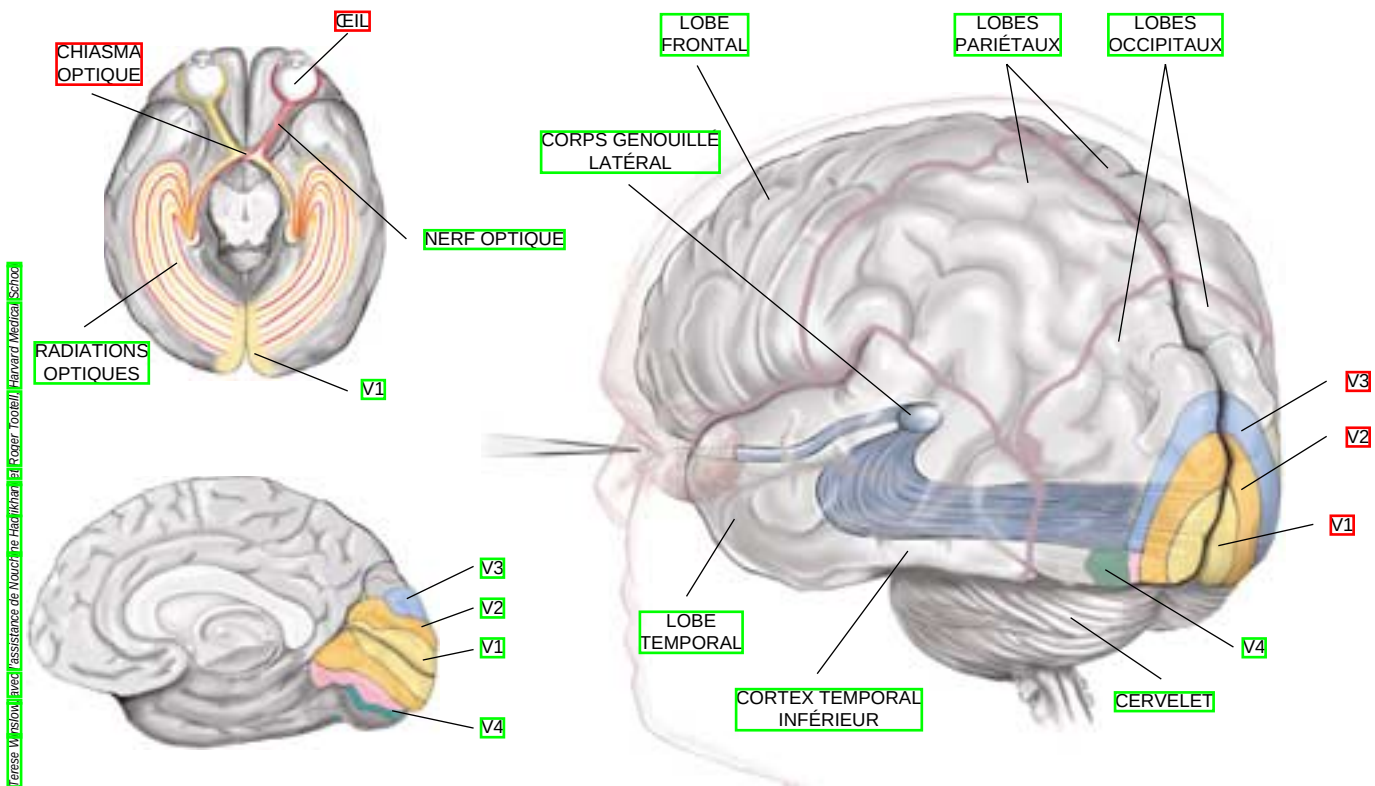


Vous verrez d'abord un trou dans votre main, correspondant à la perception de l'œil droit. Après quelques secondes, le « trou » sera remplacé par l'image floue de votre paume, correspondant à la perception de l'œil

gauche. Ensuite, les deux images alternent, car votre cerveau se concentrera sur la perception d'un œil, puis de l'autre, et ainsi de suite.

Vous percevrez sûrement le trou plus longtemps que votre paume, pour deux raisons. D'abord, parce que votre paume est floue, car elle est proche du visage. Ensuite, parce qu'elle est moins contrastée et qu'elle a moins de contours que l'image que vous voyez à travers le cylindre. Au laboratoire, nous sélectionnons les images pour qu'elles soient autant perçues les unes que les autres, en situation de rivalité binoculaire.





3. LE SYSTÈME VISUEL commence à l'œil et passe par plusieurs aires internes du cerveau avant d'atteindre les aires du cortex visuel (V1, V2, etc.). Les deux nerfs optiques se croisent (au chiasma optique), de sorte que chaque hémisphère cérébral reçoit des signaux provenant des deux yeux. L'information passe d'abord par les corps

genouillés latéraux, dont chaque neurone ne réagit qu'aux stimuli provenant d'un seul œil. Elle traverse entre autres le cortex temporal inférieur, sensible aux formes. Chaque aire corticale comporte des neurones qui ne s'activent qu'au moment où l'on prend conscience d'un stimulus donné.

dans une petite partie du champ visuel, nommée champ récepteur, qui est particulière à chaque neurone et dont la taille varie suivant les aires corticales.

Des corps genouillés latéraux, l'information visuelle atteint le cortex visuel primaire (V1), à l'arrière de la tête. Les neurones de V1 sont activés par l'information venant des deux yeux simultanément. Ils sont sensibles à des caractéristiques spécifiques de l'information visuelle, telle la direction du mouvement d'un stimulus dans leur champ récepteur. De là, l'information est transmise à plus de 20 aires corticales différentes.

Une partie de l'information visuelle passe alors dans des aires nommées V2 et V4, avant d'atteindre le cortex temporal inférieur. D'après de nombreuses études, portant notamment sur des patients souffrant de lésions cérébrales, le cortex temporal inférieur jouerait un rôle important dans la perception des formes et dans la reconnaissance des objets. Les neurones de l'aire V4 réagissent aux aspects de l'information visuelle qui permettent de discerner les formes. Dans le cortex temporal inférieur, certains neurones se comportent comme ceux de l'aire V4, mais

d'autres ne sont actifs que lorsque leur champ récepteur contient des objets entiers, tels des visages.

D'autres signaux émis par l'aire V1 passent par les aires V2, V3 et V5, aussi nommée MT (*Middle temporal area*, c'est-à-dire aire temporale moyenne), avant d'atteindre le lobe pariétal. La plupart des neurones de l'aire MT/V5 réagissent à des stimuli qui se déplacent dans une direction précise. Les neurones d'autres aires du lobe pariétal réagissent lorsque les animaux sont attentifs à un stimulus ou s'approprient à faire un mouvement dans sa direction.

Lors des premières études expérimentales du traitement de l'information visuelle, les neurobiologistes se sont étonnés des réactions des animaux complètement anesthésiés : chez ces animaux, de nombreux neurones, aussi bien de V1 que d'autres aires plus hautes dans la hiérarchie du traitement, continuent de réagir aux stimuli visuels. Ainsi les animaux (et l'être humain) ne sont-ils pas conscients de toute l'activité neuronale de leur cerveau.

Cette observation conduit à une question : la conscience correspond-elle à l'activation de certaines aires corticales ou de certains groupes de neurones ? Les

études de la rivalité binoculaire, chez des singes préalablement entraînés à signaler ce qu'ils perçoivent et récompensés avec du jus de fruit, donnent un début de réponse. À chaque singe, on présente des images projetées sur un écran (voir l'encadré de la page 84), tandis que l'on enregistre l'activité des neurones qui traitent l'information visuelle, grâce à des électrodes. Les neurones réagissent à des stimuli très spécifiques. Une fois identifié un stimulus auquel réagit un neurone particulier (que l'on nommera son stimulus préféré) en enregistrant son activité, et un autre stimulus auquel le même neurone ne réagit pas, on présente simultanément les deux stimuli, chacun à un œil : comme les êtres humains, les singes perçoivent alternativement les deux stimuli. En enregistrant l'activité des neurones au cours de présentations successives de paires d'images, on identifie les neurones dont l'activité change seulement quand on change les stimuli et ceux dont l'activité change avec la perception du singe (sans changement de stimuli).

Jeffrey Schall, de l'Université Vanderbilt, et moi-même avons réalisé une variante de cette expérience, où un œil voit une grille dérivant lentement vers

le haut, tandis que l'autre œil voit une grille dérivant lentement vers le bas. Nous avons enregistré l'activité neuronale dans l'aire corticale MT/V5, sensible aux mouvements : 43 pour cent des neurones avaient une activité qui changeait quand les singes rapportaient un changement de perception. La plupart des neurones dont l'activité changeait ainsi font partie des couches les plus profondes de l'aire MT/V5.

On s'attendait à une proportion supérieure, car presque tous les neurones de l'aire MT/V5 sont sensibles à la direction du mouvement. Pourtant, la majorité des neurones de l'aire MT/V5 se comportent comme ceux de l'aire V1 : ils restaient actifs tant que l'un des deux yeux voyait leur stimulus préféré, que le singe en soit conscient ou non.

Les expériences ont réservé d'autres surprises. Parmi les neurones étudiés, seuls 11 pour cent devenaient actifs quand le singe signalait qu'il percevait le stimulus préféré par le neu-

rone (la grille qui monte ou la grille qui descend) ; mais, paradoxalement, une proportion analogue de neurones était également excitée quand le stimulus préféré n'était pas perçu, alors qu'il était vu par un des deux yeux. Pour les autres neurones, on n'a pas réussi à caractériser leur stimulus préféré.

Au Collège de médecine de Baylor, David Leopold et moi-même avons exploré les aires qui reconnaissent les objets : nous avons enregistré l'activité neuronale des aires V1, V2 et V4, tandis que les singes regardaient des lignes inclinées vers la droite ou vers la gauche. Dans l'aire V4, 40 pour cent des neurones avaient une activité révélatrice d'une perception, comme dans l'aire MT/V5. La majorité des neurones étaient actifs lorsque le singe ne percevait pas leur stimulus préféré. Dans les aires V1 et V2, au contraire, moins d'un neurone sur dix était actif lorsque son stimulus préféré était perçu, et aucun lorsqu'il n'était pas perçu.

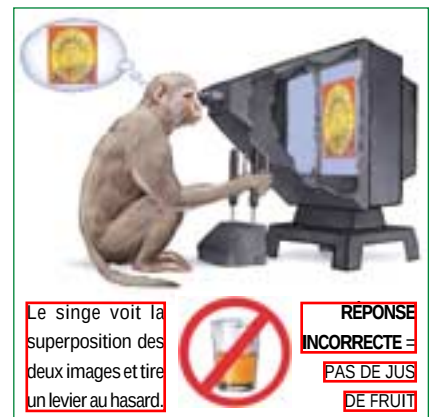
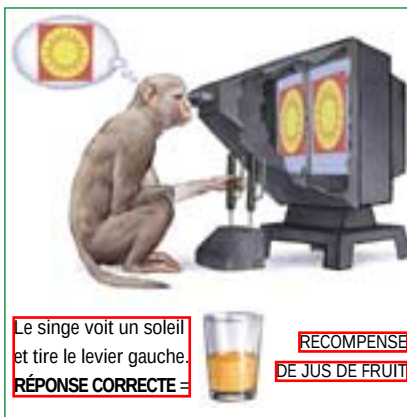
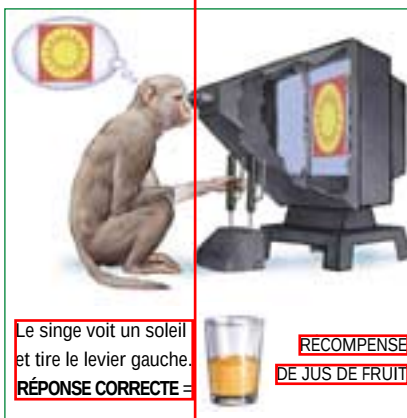
L'activité neuronale du cortex temporal inférieur diffère du tout au tout. Nous avons entraîné les singes à indiquer leurs perceptions lorsqu'ils voyaient deux images différentes en même temps, représentant par exemple des êtres humains, des animaux ou des objets manufacturés. Environ 90 pour cent des neurones sont actifs quand leur stimulus préféré est perçu. Sinon, leur activité est inhibée. Ainsi, la réaction de la grande majorité des neurones du cortex temporal inférieur serait liée à la perception.

A Harvard, Frank Tong, Ken Nakayama et Nancy Kanwisher ont étudié la rivalité binoculaire chez l'être humain, en établissant des cartes de l'activité cérébrale, par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), une technique qui mesure l'augmentation du débit sanguin dans les tissus : l'activité du cortex temporal inférieur est plus intense quand les stimuli sont des images de visages.

Les singes sont-ils honnêtes ?

Dans les expériences avec des singes, comment s'assurer qu'ils indiquent bien ce qu'ils voient ? Ne trichent-ils pas, pour qu'on leur donne plus de jus de fruit ? Au cours des sessions d'entraînement (*ci-dessous*), on apprend à un singe à tirer sur le levier de gauche quand il voit un soleil, et sur le levier de droite quand il voit un cow-boy. On lui présente une seule image ou deux images identiques, et l'on vérifie qu'il répond correctement. Dans ce cas, on le récompense avec du jus de fruit. On lui présente aussi l'image du soleil superposée à celle du cow-boy (*dernier panneau*). Si le singe tire sur un levier au hasard, on sait qu'il triche et on ne lui donne pas de jus de fruit. D'après nos résultats, les singes relatent leur perceptions avec précision. En pratique, les singes indiquaient correctement leurs perceptions après la

phase d'apprentissage. Mieux encore, les singes obtiennent d'aussi bons résultats que les êtres humains, sur le même appareil, dans différentes tâches.



En somme, la plupart des neurones des premières étapes corticales du système visuel réagissent surtout selon que leur stimulus visuel préféré est vu ou non. Quelques-uns seulement sont sensibles aux changements de perception de l'animal. En revanche, dans les étapes ultérieures, la proportion des neurones dont l'activité correspond à une perception augmente jusqu'à 90 pour cent.

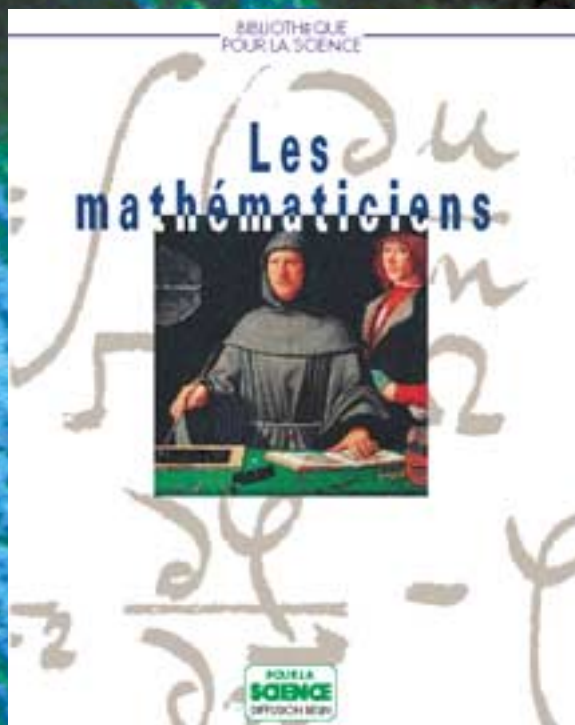
Les changements que signalent les singes seraient-ils dus à la suppression par le cerveau de l'information visuelle venant d'un œil, puis de l'autre? Sans doute pas, car les expériences montrent bien que le cerveau traite en continu l'information visuelle venant des deux yeux, au cours des rivalités binoculaires. En effet, chez l'être humain, la rivalité binoculaire induit une lente alternance des perceptions, même quand on commute les images plusieurs fois par seconde, entre les deux yeux ; si la perception dépendait seulement de l'œil auquel le cerveau est attentif, l'observateur devrait alors voir une alternance rapide des stimuli. La concurrence de deux perceptions semble avoir son rythme propre, différent de l'alternance des images. Grâce à la rivalité binoculaire, on accède à la manière dont le cerveau détermine ce que nous percevons, même lorsque les deux yeux voient (presque) la même chose.

Les neurones de la conscience

Que révèlent ces expériences? Tout d'abord, que l'être humain est inconscient d'une partie importante de son activité cérébrale. On sait depuis longtemps que l'individu n'est pas conscient de l'activité cérébrale qui gère l'organisme. Cette fonction est l'une des plus anciennes du cerveau. Aujourd'hui, on découvre que l'être humain n'a pas conscience de la plus grande partie de l'activité neuronale qui génère ses perceptions : de nombreux neurones du cerveau réagissent à des stimuli que nous ne percevons pas. L'activité de quelques uns seulement correspond aux stimuli qui atteignent la conscience. Les physiologistes parlent alors de «corrélats neuronaux» de la perception consciente.

Les quelques neurones dont le comportement reflète la perception sont dispersés dans différentes aires corticales, mais c'est le cortex temporal inférieur qui en a le plus. Les autres n'ont pas

BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE



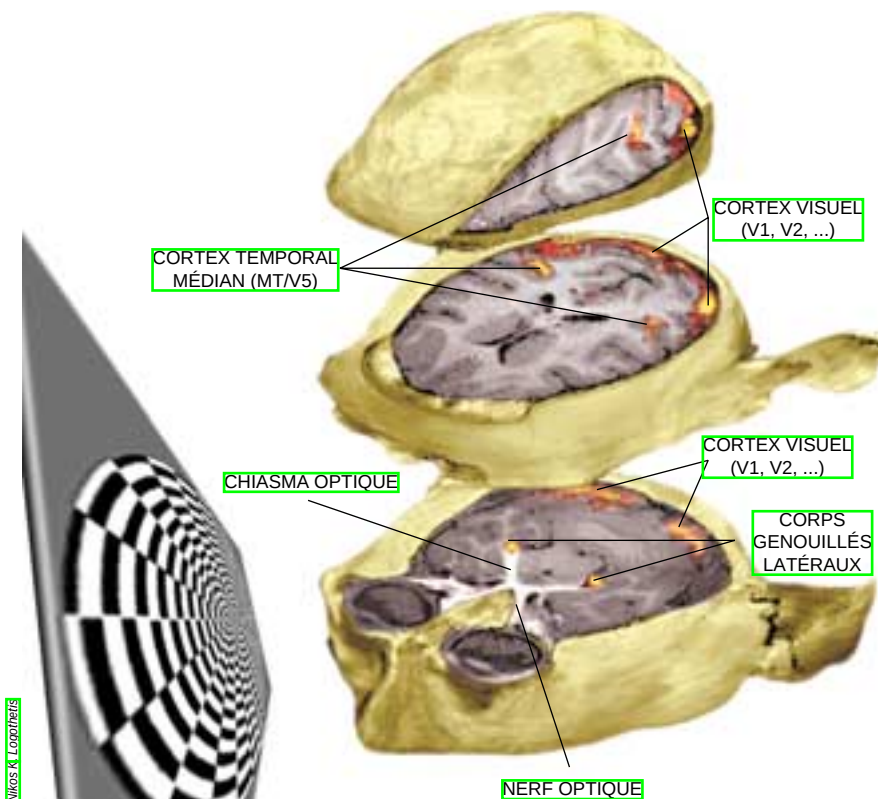
LES MATHÉMATICIENS

Pour comprendre le processus de la création mathématique, il faut saisir ce qui fait l'originalité d'un mathématicien. Cet ouvrage réunit les portraits de quinze grands mathématiciens. Leurs rapports avec leur époque, le regard qu'ils portent sur leur activité sont plus qu'anecdotiques : ils révèlent la genèse des idées nouvelles et mettent en lumière le caractère audacieux, dynamique et imaginaire de l'invention mathématique.

Code 1899 – 208 pages – 141 F

Voir bon de commande p. 90

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN



4. L'ACTIVITÉ DU CERVEAU d'un singe a été étudiée par des techniques d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, alors que l'animal, anesthésié, était confronté à un stimulus visuel très contrasté, en rotation (en bas à gauche). Certaines aires de traitement visuel (dont les corps genouillés latéraux, le cortex visuel primaire et le cortex temporal médian) sont actives, bien que le singe soit inconscient.

encore été localisés. D'autres aires corticales, qui ne font pas partie du chemin qu'emprunte l'information visuelle, sont peut-être aussi responsables de la perception. Erik Lumer et ses collègues du Collège universitaire de Londres ont étudié cette possibilité par IRMF : chez l'être humain comme chez le singe, la perception consciente d'un stimulus active le lobe temporal du cerveau. Le changement de perception active les aires corticales pariétales et préfrontales, au moment précis où il a lieu.

Quels sont les neurones responsables de la prise de conscience? Les expériences déjà réalisées montrent que la conscience visuelle ne dépendrait pas seulement des étapes successives de traitement de l'information initiale, mais aussi de l'activité de toutes les aires corticales, pariétales et préfrontales, qui participent aux processus cognitifs supérieurs. Au début du système visuel, la perception résulte de l'activité d'une minorité de neurones dans V1 et V2 ; seule la proportion de neurones actifs augmente dans les centres supérieurs.

Aujourd'hui, on ignore si l'activité des neurones des premières aires corticales sur le chemin de l'infor-

mation visuelle est déterminée par des connexions avec d'autres neurones des mêmes aires ou par des connexions rétroactives émanant des lobes temporaux et pariétaux. L'information visuelle chemine entre les niveaux supérieurs et les niveaux inférieurs dans les deux sens. Or des systèmes avec de telles rétroactions présentent souvent une dynamique complexe, évoluant vers plusieurs états stables. Ces divers états stables pourraient correspondre à différents états de conscience visuelle.

La perception des animaux est-elle réellement déterminée par l'activité du type de neurones que nous avons considéré dans ces études? Ces neurones sont peut-être sous le contrôle d'une autre région du cerveau, qui détermine la prise de conscience. Les expériences de William Newsome et de ses collègues, à l'Université de Stanford, répondent à la question : dans l'aire MT/V5, au moins l'activité neuronale détermine directement ce qu'un singe perçoit. W. Newsome a d'abord identifié les neurones sensibles à un stimulus qui se déplace dans une certaine direction, puis il les a activés à l'aide de faibles courants

électriques : les singes indiquaient qu'ils percevaient le mouvement correspondant à l'activation artificielle même lorsque le stimulus se déplaçait dans l'autre sens.

Les neurones d'autres aires corticales, par exemple du cortex temporal inférieur ou des niveaux inférieurs, participent-ils à l'élaboration de la conscience? Leur stimulation ou leur inactivation temporaire devraient alors changer la perception des singes en situation de rivalité binoculaire. La compréhension de la conscience visuelle passe par la prise en compte de ce qu'on sait des autres processus cognitifs, telle l'attention ou tels certains types de mémoire à court terme. D'après les expériences de Robert Desimone et de ses collègues de l'Institut américain de psychiatrie, les interactions compétitives de la rivalité binoculaire ressemblent beaucoup aux processus impliqués dans l'attention. Nos collègues ont entraîné des singes à indiquer leur perception quand ils voyaient des objets qu'on leur avait annoncés. Là encore, la réaction de nombreux neurones dépend du stimulus que le singe s'attend à voir, ou de l'endroit où il s'attend à le voir. On gagnerait à savoir si ces neurones sont les mêmes que ceux dont l'activité reflète la perception, en situation de rivalité binoculaire.

La conscience visuelle ne dépendrait donc pas seulement des étapes de traitement de l'information, mais aussi de l'expérience acquise par chaque singe (ou chaque personne). Les neurosciences ont encore un long chemin à parcourir pour découvrir les circuits neuronaux qui en sont responsables. L'identification des neurones qui jouent un rôle dans la conscience est déjà un bon début.

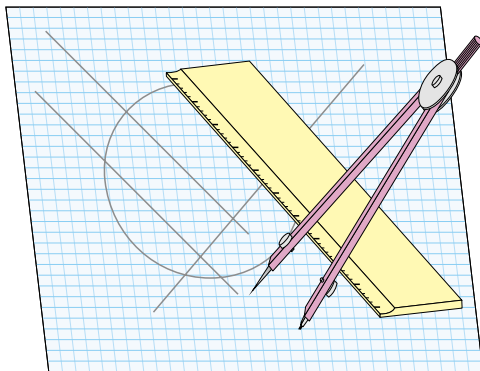
Nikos LOGOTHETIS est directeur de la division de physiologie cognitive à l'Institut Max Planck de cybernétique, en Allemagne.

Semir ZEKI, *A Vision of the Brain*, Blackwell Scientific Publications, 1993.

Francis CRICK, *The Astonishing Hypothesis : The Scientific Search for the Soul*, Scribner's, 1994.

David H. HUBEL, *L'œil, le cerveau et la vision*, in *Pour la Science*, Collection l'Univers des sciences, 1994.

A. David MILNER et Melvyn A. Goodale, *The Visual Brain in Action*, Oxford University Press, 1996.



Les théorèmes de l'impossible

IAN STEWART

A l'impossible nul n'est tenu... surtout en mathématiques.

Dans le langage quotidien, quand on déclare une chose impossible, c'est souvent que l'on n'y croit pas. Combien d'hommes ont jugé impossible une machine volante plus lourde que l'air ou un engin flottant plus lourd que l'eau, avant que l'ingéniosité de quelques inventeurs ne les contredise? Le génie humain surmonte fréquemment d'apparentes impossibilités.

Cependant, en mathématiques, où les mots ont un sens plus strict, l'impossibilité est souvent définitive et démontrable. Par exemple, aucune puissance entière de 2 n'est égale à 3. Pour le prouver, remarquons simplement que $2^1 = 2$ est trop petit et que 2^k est toujours supérieur à 3 quand k est supérieur à 1. Ce résultat, valable pour l'ensemble des entiers naturels, peut devenir faux lorsqu'on change les règles. Ainsi, dans l'ensemble des entiers «modulo 5», où tout entier usuel est remplacé par le reste de sa division par 5 (à 2 correspond 2, à 5 correspond 0, à 7 correspond 2, à 11 correspond 1...), $2^3 = 3$. La démonstration précédente n'est pas fautive, mais des précisions sont indispensables, telle la définition claire des objets mathématiques utilisés.

Les démonstrations d'impossibilités mathématiques sont parfois frustrantes. Par exemple, imaginez que vous ayez calculé pendant dix ans, noircis-

sant des cahiers entiers, et que vous soyez convaincu d'avoir trouvé un nouveau nombre premier de plusieurs milliers de chiffres ; mieux encore, ce nombre premier est pair ! Excité par cette découverte extraordinaire, vous envoyez votre travail à un mathématicien... qui vous le réexpédie aussitôt en le déclarant fautif. Pis encore : lorsque vous lui demandez où se trouve l'erreur, il vous répond qu'il n'a pas lu votre étude et qu'il n'en sait donc rien. Et il ose répéter qu'il y a une faute ?

Voilà le nœud de l'incompréhension : ce qui passe pour de l'arrogance n'est en fait que de la logique : le seul et unique nombre premier pair est deux.

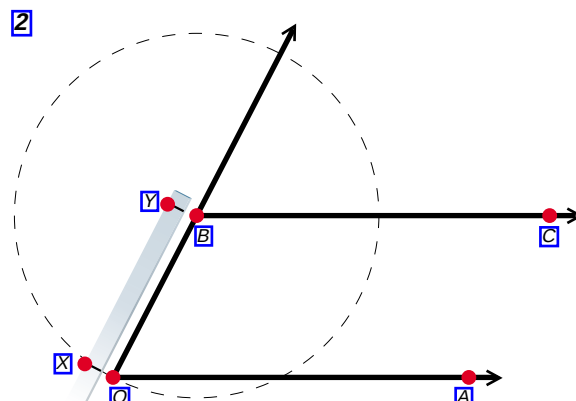
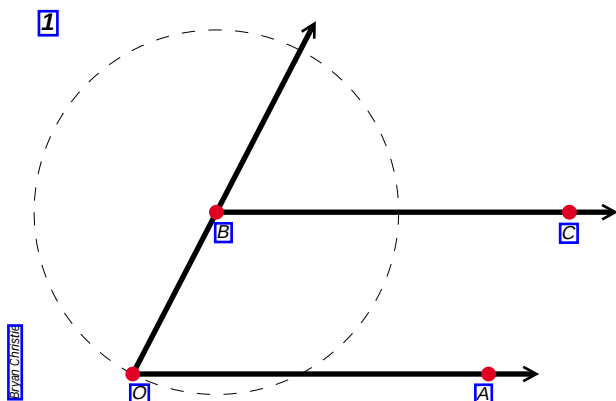
Un des théorèmes d'impossibilité les plus importants a été découvert au début du XIX^e siècle, indépendamment, par les mathématiciens norvégien, Niels Abel (1802-1829), et français, Évariste Galois (1811-1832). Par des méthodes différentes, ils ont montré que, le plus souvent, les solutions d'équations algébriques du cinquième degré ne peuvent s'écrire avec seulement les quatre opérations arithmétiques et des radicaux (les racines carrées, cubiques, etc.). Les mathéma-

ticiens avaient découvert des formules utilisant seulement les quatre opérations et les radicaux pour exprimer les solutions des équations algébriques de degré inférieur à cinq, mais leurs tentatives avec le degré cinq restaient infructueuses. Abel et Galois ont mis fin à ces recherches.

Comment de telles démonstrations sont-elles possibles ? Considérons un échiquier à 64 cases. Avec 32 dominos dont la surface couvre exactement deux cases de l'échiquier, le nombre de pavages de l'échiquier est considérable (voir la figure 2). Lorsque vous excluez deux coins adjacents de l'échiquier, le pavage reste possible (avec 31 dominos et sans difficultés). En revanche, quand vous supprimez deux coins opposés, toutes vos tentatives échouent.

Les échecs répétés ne sont pas une preuve d'impossibilité, car une vie entière à tester des pavages ne suffirait pas à examiner toutes les possibilités. Alors, le pavage est-il possible ? Non ; en voici une preuve : un domino recouvre une case blanche et une case noire ; donc, un pavage recouvre ou laisse découvertes autant de cases noires que de

1. La trisection d'un angle, tel AOB, est possible avec un compas et une règle graduée. Tracez d'abord le cercle centré en B et passant par O, puis la demi-droite BC parallèle à OA (1). Sur la règle, repérez ensuite les points X et Y, tel que XY = OB (2). Enfin, placez la règle afin qu'elle passe par O, et amenez le point X sur le cercle et le point Y sur la demi-droite BC (3). L'angle AOY est le tiers de l'angle AOB initial.





Grandeur et décadence des arbres

ROLAND LEHOUCQ

Le spectacle des forêts dévastées par la récente tempête interpelle le physicien : comment tant d'arbres ont-ils pu être cassés ou déracinés ?

Plusieurs dizaines de millions d'arbres ont été mis à mal par les vents de tempête qui balayèrent la France les 26 et 27 décembre 1999. Nous allons examiner les mécanismes physiques qui déséquilibrent les arbres, les cassent, voire les arrachent.

Même en l'absence de vent, un arbre ne peut croître indéfiniment, car le tronc doit résister à son propre poids : la pression qui s'exerce sur une section droite du tronc doit rester inférieure à la pression d'écrasement (quelques dizaines de millions de newtons par mètre carré). Ainsi, un arbre vertical dont la densité est de 0,8 (la plupart des bois flottent) pourrait atteindre une hauteur de six kilomètres avant de s'écraser sur son propre poids.

Apparemment aucun arbre de la nature ne reste strictement vertical...

Les arbres se courbent

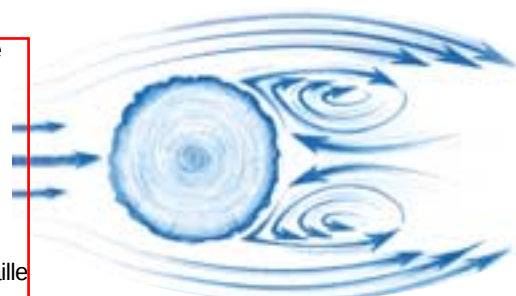
sous l'action du vent et la nécessité de résister aux forces de cisaillement limite la taille des arbres. La limite de rupture pour le cisaillement est identique à la pression d'écrasement, mais les contraintes de cisaillement sont bien supérieures aux forces d'écrasement de sorte que la limitation de taille est plus sévère.

LE VENT, SOURCE DE FORCE AÉRODYNAMIQUE

Tout corps plongé dans un fluide en mouvement subit une force dont une composante, perpendiculaire à la direction de la vitesse du fluide vue par l'obstacle, est la poussée, et l'autre, parallèle à la vitesse du fluide, est la traînée.

La force de poussée maintient les avions en l'air, tandis que la force de traînée, utile aux parachutes, est celle que l'on ressent face au vent. La pression de l'air résulte du choc des molécules d'air contre l'obstacle : chaque molécule qui frappe le tronc est déviée et transmet une partie de sa quantité de mouvement à l'arbre. Les chocs des molécules sur le tronc sont permanents et la somme de leur contribution engendre une pression dont la distribution autour du tronc crée la traînée.

Sur la surface d'un tronc d'arbre face au vent, la vitesse du fluide est quasi nulle, car l'air ne peut pénétrer dans le tronc. Dans un fluide en mou-

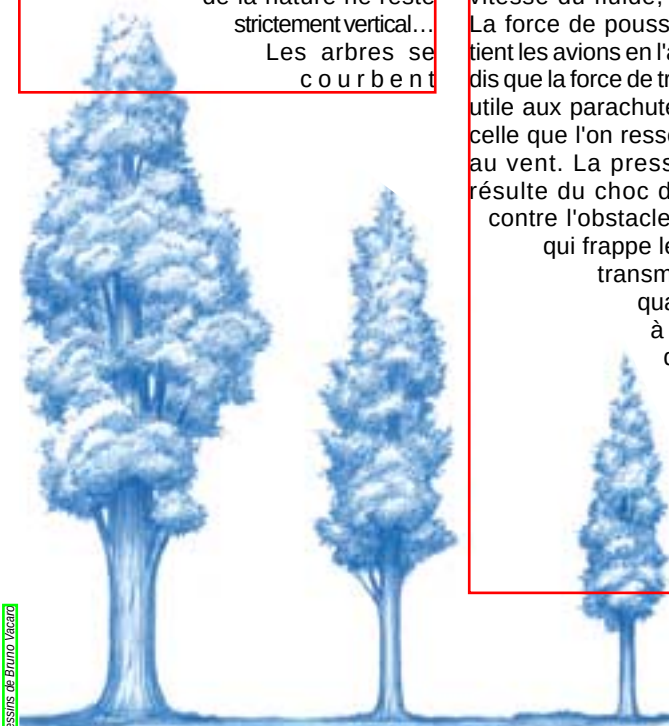


Lorsque le vent rencontre un tronc d'arbre, les filets d'air sont déviés. La couche d'air qui est au contact du tronc se décolle et à l'arrière du tronc existe une zone où la pression est inférieure à celle de la partie avant. De cette différence de pression résulte la force de traînée, responsable de l'arrachage.

vement, la pression est d'autant plus faible que la vitesse est grande (une grande vitesse augmente le volume d'une même masse de fluide et donc diminue la pression). Ainsi, la pression régnant sur la surface frontale du tronc est maximale, puisque la vitesse y est minimale. Comme les filets d'air sont déviés par le tronc, il se crée une dépression derrière l'arbre.

De cette asymétrie entre l'amont et l'aval résulte la traînée. Au total, la force de traînée subie par le tronc est le produit d'un coefficient de traînée (nombre sans dimension qui dépend à la fois de la direction du vent et de la forme du tronc), de la densité de l'air, de la section frontale et du carré de la vitesse du vent. En raison de cette variation avec le carré de la vitesse, la force exercée sur des arbres balayés par des vents de près de 200 kilomètres par heure est 16 fois celle exercée par un vent fort, mais assez fréquent, de 50 kilomètres par heure. On comprend aussi pourquoi les arbres dont la prise au vent (surface du tronc et surtout du feuillage) est la plus forte, tels les chênes, subissent une force supérieure. Un grand arbre attire-t-il le vent, comme le prétend un proverbe chinois ?

*Les vents me sont
moins qu'à vous redoutables.
Je plie, et ne romps pas.*



Dessins de Bruno Vézard

Le diamètre d'un tronc augmente comme la puissance $3/2$ de la hauteur d'un arbre : les grands arbres ont proportionnellement un tronc plus gros que les petits.

Du bout de l'horizon accourt avec
furie /Le plus terrible des enfants/Que
le Nord eût portés jusque-là dans
ses flancs.

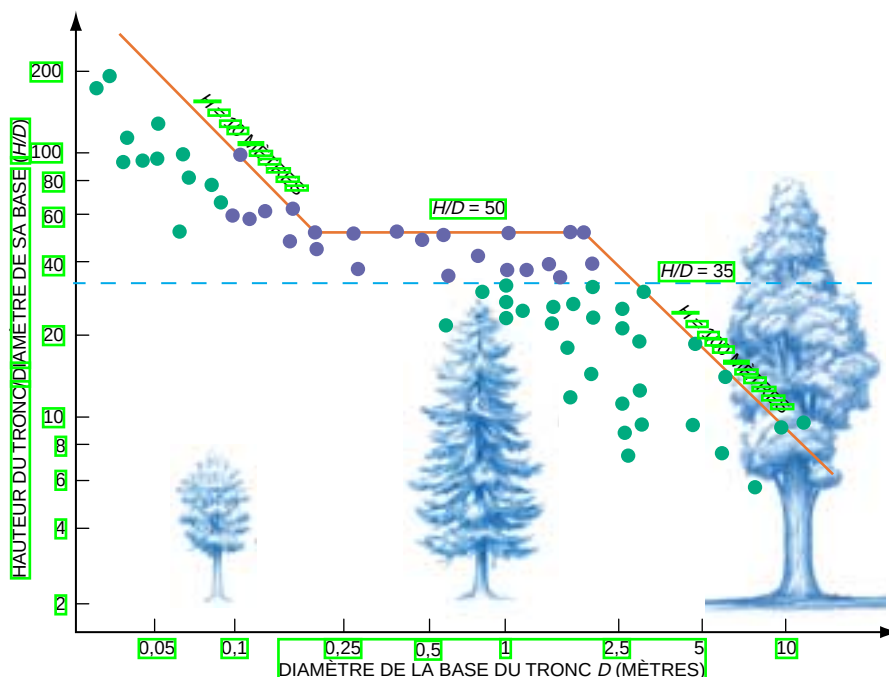
L'arbre se déforme selon sa nature et selon l'intensité de la contrainte. Dans un premier stade de déformation, la force et la déformation sont proportionnelles et, lorsque la force est supprimée, le tronc reprend sa forme initiale. Au-delà d'un seuil de contrainte, nommé limite élastique, la déformation augmente plus vite que la contrainte. De surcroît, en supprimant la contrainte, le tronc ne reprend pas sa forme initiale : la déformation est permanente. Cette limite élastique diminue avec l'âge de l'arbre : «Vieil arbre est mal à redresser». Quand la force augmente encore, la limite de rupture est atteinte et le tronc se brise.

Si le roseau plie et reprend sa forme initiale, la déformation maximale que peut subir un tronc de chêne, par exemple, avant de se rompre est limitée : quelques millièmes de sa taille. Les solides sont très rigides, car les liaisons chimiques entre les atomes qui les constituent leur imposent une séparation précise.

La tempête gronde, le chêne se déforme et se courbe. Dès lors, son centre de gravité n'est plus à la verticale de la base du tronc et il en résulte un moment additionnel dû à la gravité (le produit du poids par le bras de levier) qui accentue la déformation de l'arbre. L'arbre reste en équilibre tant que le moment de la force imposée par le vent et le moment du poids de l'arbre sont compensés par le moment de la force de rappel élastique qui traduit la «répugnance» de l'arbre à subir une déformation. La contrainte liée à la courbure du tronc est bien supérieure à la simple compression due au poids lorsque l'arbre est strictement vertical : c'est lorsqu'ils sont courbés par le vent que les arbres risquent



La flexion d'un arbre engendre un couple dû au poids, parce que le centre de gravité n'est plus à la verticale de la base du tronc.



La «hauteur relative» d'un arbre, H/D , ici indiquée en fonction de son diamètre, D , détermine sa résistance au vent. Les points correspondent à des arbres mesurés. La partie gauche correspond aux arbres fins, tandis que la partie droite correspond aux arbres à forte base. Par grand vent (rafales de 200 kilomètres par heure), les arbres situés au-dessus de la ligne horizontale $H/D = 35$ sont susceptibles d'être abattus (points violets). Les arbres très fins sont plus élastiques et, comme le roseau, ils plient mais ne rompent pas.

d'atteindre leur limite de rupture. Il en est d'ailleurs de même pour les cheminées ou pour les poteaux.

Pour des vents assez faibles, le moment de la force imposée par le vent peut être négligé devant le moment du poids et l'arbre adoptera à peu près la forme d'un arc de cercle de grand rayon de courbure. La condition d'équilibre mécanique de l'arbre (tous les moments des forces doivent se compenser) impose alors que le diamètre de sa base varie comme la puissance $3/2$ de sa hauteur : les arbres dont le diamètre varie plus lentement tombent et les arbres dont le diamètre varie plus vite tiennent, mais ne respectent pas le principe d'économie de la nature. Cette corrélation se retrouve dans d'autre aspect du monde vivant, car elle gouverne aussi les dimensions longitudinales et transversales des os de mammifères, par exemple.

LA HAUTEUR RELATIVE

Par vent fort, son moment l'emportera et les contraintes engendrées dans le tronc de l'arbre dépasseront parfois la limite de rupture du bois. Pour un vent soufflant à 140 kilomètres par heure (environ 40 mètres par seconde) et contre des arbres dont le feuillage est peu développé, par exemple des peupliers, les arbres qui sont plus de 50 fois plus haut que le diamètre de leur tronc sont abattus par le vent. Cette vitesse de 40 mètres par seconde correspond à des vents fréquents en France ce qui explique que les arbres dont la hauteur relative (le quotient de la hauteur du tronc et de son diamètre à la base) est plus grand que 50 n'existent pas, excepté pour

Le vent
redouble ses efforts,
Et fait si bien qu'il déracine
Celui de qui la tête au Ciel était voisine, et
dont les pieds touchaient à l'Empire des
Morts.
Jean de La Fontaine

des petits arbres, qui sont les plus jeunes et dont le bois est plus souple. Pour des vents plus violents, la hauteur relative au-delà de laquelle l'arbre est abattu diminue. Ainsi s'explique que dans les régions touchées par cette dernière tempête, dans les rafales ont atteint 200 kilomètres par heure, beaucoup d'arbres dont la hauteur relative était supérieure à 35 aient été abattus.

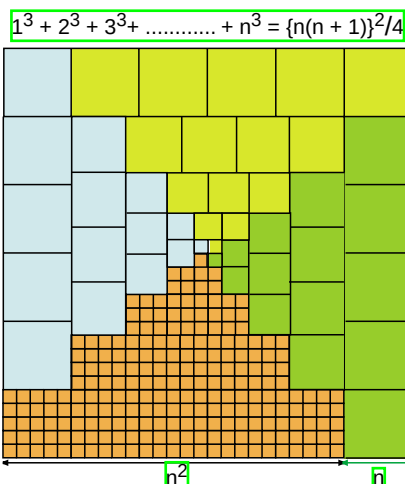
Un modèle plus complet devrait prendre de nombreux effets supplémentaires : l'écrantage des petits arbres par les grands, l'effet domino (un arbre abattu en fait tomber un autre), etc. De surcroît, le fait que de fortes pluies aient mouillé la terre est sans doute pour beaucoup dans la proportion d'arbres arrachés (les racines tenaient moins bien dans le sol) par rapport à celle d'arbres cassés.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

A. MINEYEV, *Why do trees grow so tall, but not taller?*, in *Quantum*, janvier / février 1994.

T.A. MACMAHON, *The mechanical design of trees*, in *Scientific American*, juillet 1975.

S. VOGEL, *Life's device*, Princeton University Press, 1988.



Raccourcis dans les démonstrations

JEAN-PAUL DELAHAYE

La concision risquée des preuves humaines contraste avec le bavardage impraticable des preuves formelles.

Comment savoir si une démonstration est juste ? On imagine qu'il suffit qu'un mathématicien prenne la peine de la lire soigneusement, ligne par ligne, après s'être informé des définitions et des résultats connus qui peuvent y être utilisés. Si certaines questions sont non résolues, ce qui bien sûr est le cas, nous saurions parfaitement lesquelles, et le travail des chercheurs consisterait uniquement à résoudre ces énigmes répertoriées. Partout en mathématiques régnerait la certitude.

Cette situation, si elle était vraie, opposerait catégoriquement les mathématiques à la physique où rien n'établit définitivement une théorie, laquelle n'est qu'une hypothèse susceptible d'être mise en cause par de nouvelles données. On sait ainsi qu'on ne prouve pas une loi physique, qui est un énoncé général, à partir d'observations et d'expérimentations, qui ne sont que des énoncés particuliers.

Les logiciens soutiendront la vision idéalisée des mathématiques en maintenant que, depuis le début du siècle, on dispose de systèmes codifiés pour écrire des démonstrations qu'on appelle des systèmes formels. Lorsqu'on écrit une preuve avec l'un de ces systèmes, un ordinateur peut en vérifier la justesse sans intervention humaine. La justesse d'une preuve formelle, disent les logiciens, est mécaniquement vérifiable et ne demande aucune intelligence. Or une multitude de raisons compliquent le tableau idéal et atténuent l'image trop belle d'une science mathématique sans états d'âme, sans disputes, sans erreurs où l'unanimité se ferait sur toute question et où les désaccords pourraient se régler en prenant des ordinateurs pour arbitres.

Nous allons évoquer les difficultés rencontrées pour écrire des démonstrations formelles mécaniquement vérifiables. Ces difficultés ne signifient pas que les sys-

tèmes codifiés pour l'écriture des démonstrations sont inutiles ou insatisfaisants – personne n'envisage aujourd'hui de s'en passer, et c'est à tort qu'on évoque les théorèmes d'incomplétude de Gödel comme arguments contre les formalismes (voir les rubriques des mois de novembre et décembre 1999). Les difficultés signifient simplement que l'utilisation des formalismes logiques est beaucoup plus délicate qu'il n'y paraît et que le monde des mathématiques déborde d'une complexité qu'on ne sait pas, en pratique, enfermer dans les boîtes aseptisées que sont les systèmes formels des logiciens.

Dans l'introduction de son grand traité de mathématiques, Nicolas Bourbaki a exprimé très lucidement ce point de vue au cœur de la conception moderne des mathématiques : «...conservant toujours présente, comme une sorte d'horizon, la possibilité d'une formalisation totale, notre Traité vise à une rigueur parfaite. [...] Du fait que nous cherchons à nous tenir constamment aussi près d'un texte formalisé qu'il semble possible sans longueurs insupportables, la vérification, en principe, est aisée ; les erreurs (inévitables en pareille entreprise) peuvent être localisées sans excessive perte de temps, et le risque de les voir entacher de nullité un chapitre ou un Livre entier demeure très faible.»

Certaines figures de cet article reproduisent des démonstrations sans mots qui viendront compléter celles déjà proposées dans cette rubrique en février 1998. Ces démonstrations graphiques illustrent une idée forte : à côté de la présentation des démonstrations en langue vernaculaire ou formelle, une exposition silencieuse et géométrique des preuves mathématiques est parfois possible.

Les preuves réelles qu'écrivent les mathématiciens sont très différentes des preuves formelles pour une première raison : l'utilisation généralisée d'abréviations. Parmi les abréviations, il y a celles, bénignes, qui n'introduisent aucune ambiguïté. Le mathématicien indiquera par exemple que, pour gagner un peu

1. INDIGESTES SYSTÈMES FORMELS

```

*52.2.  $\vdash. 1 \in Cls$ 
  Dem.
     $\vdash. *52.1. \supset \vdash : \alpha \in 1. \supset. (\exists x). \alpha = t'x.$ 
    [*51.11]  $\supset. (\exists x). \alpha = 2(z=x).$ 
    [*20.54]  $\supset. (\exists x. \phi). 2(\phi!z) = 2(z=x). \alpha = 2(\phi!z).$ 
    [*10.5]  $\supset. (\exists \phi). \alpha = 2(\phi!z).$ 
    [*20.4]  $\supset. \alpha \in Cls : \supset \vdash. Prop$ 

*52.21.  $\vdash. \Lambda \sim e 1$ 
  Dem.
     $\vdash. *52.16. \supset \vdash : \alpha \in 1. \supset. \exists! \alpha :$ 
    [*24.63]  $\supset \vdash : \Lambda \sim e 1$ 
  
```

La codification des démonstrations rend celles-ci testables par ordinateur, mais pas très agréables aux humains. L'un des premiers systèmes entièrement codifiés de preuves est celui de B. Russell et A. Whitehead, qui ont essayé de rester le plus près possible du formalisme qu'ils définissaient. Voici un extrait de leur ouvrage *Principia Mathematica*, proposé ici pour en montrer l'intérêt... esthétique. On reconnaît en 52.21 un énoncé qui signifie que l'ensemble vide (le V retourné) n'est pas élément de 1 qui, par définition, dans ce système, est la classe de toutes les classes ayant un seul élément. Chaque énoncé est soigneusement justifié par sa preuve donnée juste après, qui en permet, en théorie, la vérification mécanique. Pas un mot n'apparaît.

2. LES ABUS DANS LES EXPOSÉS MATHÉMATIQUES...

Les raccourcis et omissions pratiqués lors d'exposés sont bien pires que ceux qu'on trouve dans les textes écrits. Des recensions humoristiques de ces abus ont plusieurs fois été proposées. En voici une, largement inspirée par celle de la revue *Plot* (APMEP Orléans-Tour, n° 86).

- Démonstration par l'évidence : «La démonstration est triviale» ; «Immédiat à partir des définitions» ; «On obtient sans peine que...» ; «On voit que...»
- Démonstration par la confiance : «Vous n'avez qu'à essayer, vous verrez, ça marche». Variante : «Je l'ai démontré hier chez moi, aucune difficulté.»
- Démonstration par consensus : «Tous ceux qui sont d'accord lèvent la main». Variante encore plus efficace : «Tous ceux qui ne sont pas d'accord lèvent la main.»
- Démonstration par commodité dénommée «nos désirs sont des réalités» : «Ce serait si beau si c'était vrai, donc...» (Redoutablement dangereuse.)
- Démonstration par nécessité : «Ça doit être vrai, sinon toutes les mathématiques s'effondreraient.» Variante : «Le cas contraire contredirait un résultat bien connu qui ne peut pas être faux.» (Peu de travail est nécessaire pour en tirer une bonne vieille preuve par l'absurde.)
- Démonstration par plausibilité : «Ça a l'air bon, donc ça doit être vrai.» (Très utilisé pour évaluer le résultat d'un long calcul ; ne pas en abuser.)
- Démonstration par intimidation : «Ne soyez pas stupide ! Bien sûr que c'est vrai.» Variantes du débutant : «Même un débutant sait ça» ; «Vous l'avez vu en sixième.» Variante du devoir pour demain : «Ceux qui en doutent feront la démonstration pour demain sur une feuille qu'ils me rendront.» Variante du tableau : «Si quelqu'un a des doutes, il passe au tableau le démontrer.»
- Démonstration par manque de temps : «Il ne me reste pas assez de temps, vous ferez la démonstration vous-même.»
- Démonstration par complexité : «La démonstration est trop compliquée pour être donnée ici.» Variantes : «Je ne peux pas vous le faire, car ça fait partie du programme de l'année prochaine.» «J'ai fait le calcul en 1985, c'est assez pénible, je n'ai pas envie de le refaire.»
- Démonstration par accident : «Tiens, tiens, qu'avons-nous



là...» (En fait, tout était calculé par avance pour obtenir le résultat prétendument inattendu.)

- Démonstration par la définition dite méthode du postulat d'Euclide : «On le définit comme vrai.» (En abuser risque de diminuer l'intérêt de votre cours.)
- Démonstration par la tautologie : «C'est vrai, parce que c'est vrai.» (Risque de vous faire perdre du crédit, mieux vaut utiliser une des autres méthodes.)
- Démonstration par référence : «Comme c'est établi à la page 289 du ...» (Là encore, si vous en abusez, vous viderez votre cours de sa substance.)
- Démonstration par perte de référence : «Je sais que j'ai vu la démonstration quelque part.» (Même si c'est du bluff, préférez la méthode précédente.)
- Démonstration par manque d'intérêt : «Y a-t-il quelqu'un qui souhaite vraiment voir la démonstration?» Variante en combinant avec la démonstration par complexité : «La démonstration est longue et pénible. Est-ce que je la fais?» Variante dite du calcul merdique : «En général, quand je me lance dans ce calcul, je me plante. On y va?»
- Démonstration par obstination : «Vous pouvez croire ce que vous voulez, moi je vous dis que c'est vrai.» Variante du contre-exemple : «Trouvez-moi un contre-exemple, en attendant je considère que c'est vrai.» (Contraire à la déontologie la charge de la preuve ne serait pas à celui qui affirme.)
- Démonstration par analogie : «C'est la même chose que...» ; «Il suffit de s'inspirer de...» «On procède comme pour...» (Moyen efficace d'obtenir des résultats faux : le procédé a coûté cher à de nombreux mathématiciens.)
- Démonstration par autorité : «Borsnuch l'a dit.» Variante dite de l'ascenseur : «J'ai rencontré Borsnuch dans l'ascenseur, et il est d'accord.»
- Démonstration par symbolisme excessif : « $\forall a > 0 \exists b > a$ $F(-A(a)) > 0 \wedge B(b)$ si ...» Variante dite du renvoi multiple : «On conclut en combinant les lemmes 1, 3, 8 et 15 avec le théorème 12, puis en utilisant les propositions 7, 9 et 21.»
- Démonstration par appel à l'opinion publique : «Si c'était vrai ça se saurait, donc c'est faux...» (Contrairement aux apparences, ce procédé marche bien, car les résultats simples qui n'ont pas été démontrés sont généralement faux.)



3. LE VIDE ET LES ENTIERS DE VON NEUMANN

Un exemple remarquable de situation où un formalisme élégant conduit à des notations impraticables si on ne les accompagne pas de notations raccourcies est celui des entiers de von Neumann, qui permettent en théorie des ensembles de construire les nombres à partir de l'ensemble vide. Ceux-ci sont définis en posant $0 = \{\}$ (l'ensemble vide), $n + 1 = n \cup \{n\}$, ce qui donne :

 $0 = \{$
$$1 = \{\{\}\}$$
$$2 = \{\{\}, \{\{\}\}\}$$
$$3 = \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}$$
$$4 = \{\{\}, \{\{\}\}, \{\{\}, \{\{\}\}\}, \{\{\}, \{\{\}, \{\{\}\}\}\}$$
$$5 = \{\{\}, \{\{\}\}, \{\{\}, \{\{\}\}\}, \{\{\}, \{\{\}, \{\{\}\}\}\}, \{\{\}, \{\{\}, \{\{\}, \{\{\}\}\}\}, \{\{\}, \{\{\}, \{\{\}, \{\{\}, \{\{\}\}\}\}\}\}$$
$$6 = \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}\}$$
$$7 = \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}\}\}$$
$$\{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}\}\},$$

Imagine-t-on combien il serait pénible d'écrire les tables de multiplication dans ce formalisme!

de place, il note a^7 à la place de $a \times a \times a \times a \times a \times a \times a$, ou $\sin^{(5)}(x)$ à la place de $\sin(\sin(\sin(\sin(\sin(x)))))$; les parenthèses autour du 5 évitent la confusion entre $\sin^{(5)}(x)$ et $\sin^5(x)$.

Si seules de telles abréviations étaient utilisées, il serait facile de traduire une preuve humaine en preuve formelle (et donc de la vérifier mécaniquement). On demanderait à l'ordinateur de remplacer systématiquement chaque notation abrégée par sa version complète et, même si cette pratique allonge le texte, ce ne serait pas une gêne sérieuse pour l'ordinateur chargé de le contrôler.

LES RACCOURCIS ET LES ABRÉVIATIONS

Malheureusement la plupart des abréviations sont ambiguës, et seul le contexte permet d'en déterminer la signification. La notation dx , par exemple, peut représenter le produit de la variable d par la variable x , ou bien la différentielle de x utilisée en calcul intégral. Le mathématicien Littlewood cite l'anecdote où un professeur qui écrivait le polynôme $ax^4+bx^3+cx^2+dx+e$ commentait la formule en disant : « e n'est pas nécessairement, mais peut l'être, la base des logarithmes naturels.» Le signe $+$ désigne l'addition entre entiers ou celle entre matrices ou toutes sortes d'autres opérations (il n'est pas rare que, dans un même texte mathématique, plusieurs signes $+$ soient utilisés, chacun se référant à un concept différent). La notation i , selon le texte, désignera un entier naturel, ou le nombre complexe dont le carré vaut -1 , ou autre chose encore.

On trouve aussi fréquemment des indications qui introduisent une ambiguïté : «Le paramètre k sera fixé dans le reste du paragraphe, et à la place de $f_k(x)$ nous écrirons $f(x)$.» Les textes mathé-

matiques sont remplis de ces raccourcis qui rendent difficile la traduction dans un langage formel. Les mathématiciens en sont conscients, comme cette citation de Nicolas Bourbaki (*Algèbre linéaire*, Chapitre II, p. 53) l'atteste : «La notation $u \otimes v$ pourra donc prêter à confusion, et il sera nécessaire que le contexte indique s'il s'agit d'un produit tensoriel ou d'une application linéaire.» Mille autres exemples pourraient être donnés.

PARTOUT DES MANQUES

Toutes ces abréviations, après un travail attentif et minutieux, pourraient être traquées et supprimées du texte d'une démonstration, alors qu'en revanche les abréviations dans la structure même des démonstrations sont bien plus graves. Les textes mathématiques en sont pour-tant truffés.

On comprend ce que signifie «le lecteur vérifiera sans peine que le chiffre des unités de 2^{100} est 6» ou «quand on développe $(x + 4x^5)^{12}$, le coefficient de x^{20} est 1056»; en prenant une feuille de papier, le lecteur (supposé patient) s'assurera de la justesse de ce qui est affirmé, et le bout de démonstration qui manque – un calcul – sera ainsi reconstitué.

Parfois le calcul qui permettrait la vérification est impossible à faire sans l'utilisation d'ordinateurs munis de programmes particuliers. Imaginez ce que vous devriez faire pour vous assurer de l'affirmation «il y a 9,98 % de '7' parmi le premier million de décimales du nombre π » (ce qui est un énoncé vrai qu'on trouve dans certains ouvrages). On doit faire confiance à l'auteur qui affirme cela, ou travailler des heures, voire des jours, pour le vérifier.

Lorsqu'il ne s'agit que de calculs, combler le trou présent dans la preuve humaine ne semble pas totalement insurmontable.

En revanche, comment ne pas être inquiet quand le mathématicien, après avoir donné la démonstration du théorème dans le cas b positif, écrit : «le cas b négatif se traite facilement» ou «est analogue»? Va-t-on y arriver? Comment ne pas devenir franchement anxieux quand, dans le texte d'une démonstration, on découvre le laconique et pourtant très fréquent «Laisse en exercice au lecteur»?

Voici quelques exemples de ce type, tirés du livre d'*Algèbre linéaire* du traité Bourbaki. D'abord le classique : «On vérifie facilement que...» (chapitre I, p. 107). Une telle phrase ne semble pourtant pas pouvoir guider le lecteur. Pas plus d'ailleurs que celle-ci qui, si vous rencontrez un obstacle dans la démonstration omise, risque de vous faire désespérer de vous-même : «La démonstration est encore plus simple pour...» (Chapitre II, p. 85).

L'inévitable «on voit que...» fait bien sûr partie de l'arsenal démonstratif du traité (Chapitre III, p. 158). Lorsque des précisions sont données, elles ne sont pas nécessairement parlantes, et l'on n'est pas certain de pouvoir s'en sortir avec celles, cryptiques, de la démonstration de la proposition 3 du Chapitre II, p. 39, qui se termine par : «La conclusion résulte donc de la déf. 1 et de II, p. 10, prop. 5(ii).» Plus délicate encore est l'étonnante démonstration en une ligne d'un énoncé qui en occupe quatre : «Cela résulte de E, III, p. 29, prop.12, et E.,III, p. 42, cor.1» (Chapitre III, p. 87).

ON PEUT MÊME OMETTRE
LES THÉORÈMES!

Les non-mathématiciens seront étonnés, mais les raccourcis, même dans les meilleurs traités, peuvent s'étendre au-delà des démonstrations. Ainsi, parfois, les définitions et les énoncés eux-mêmes sont omis. Toujours dans le traité de N. Bourbaki, on trouvera l'admirable : «Nous laissons au lecteur le soin de formuler les définitions et remarques analogues pour les systèmes d'équations linéaires à gauche» (Chapitre II, p. 146), et aussi : «On laisse au lecteur le soin de définir un système projectif d'anneaux... et de vérifier que...» (Chapitre II, p. 146). Pourquoi ne pas confier au lecteur le soin d'écrire le chapitre suivant tout seul?

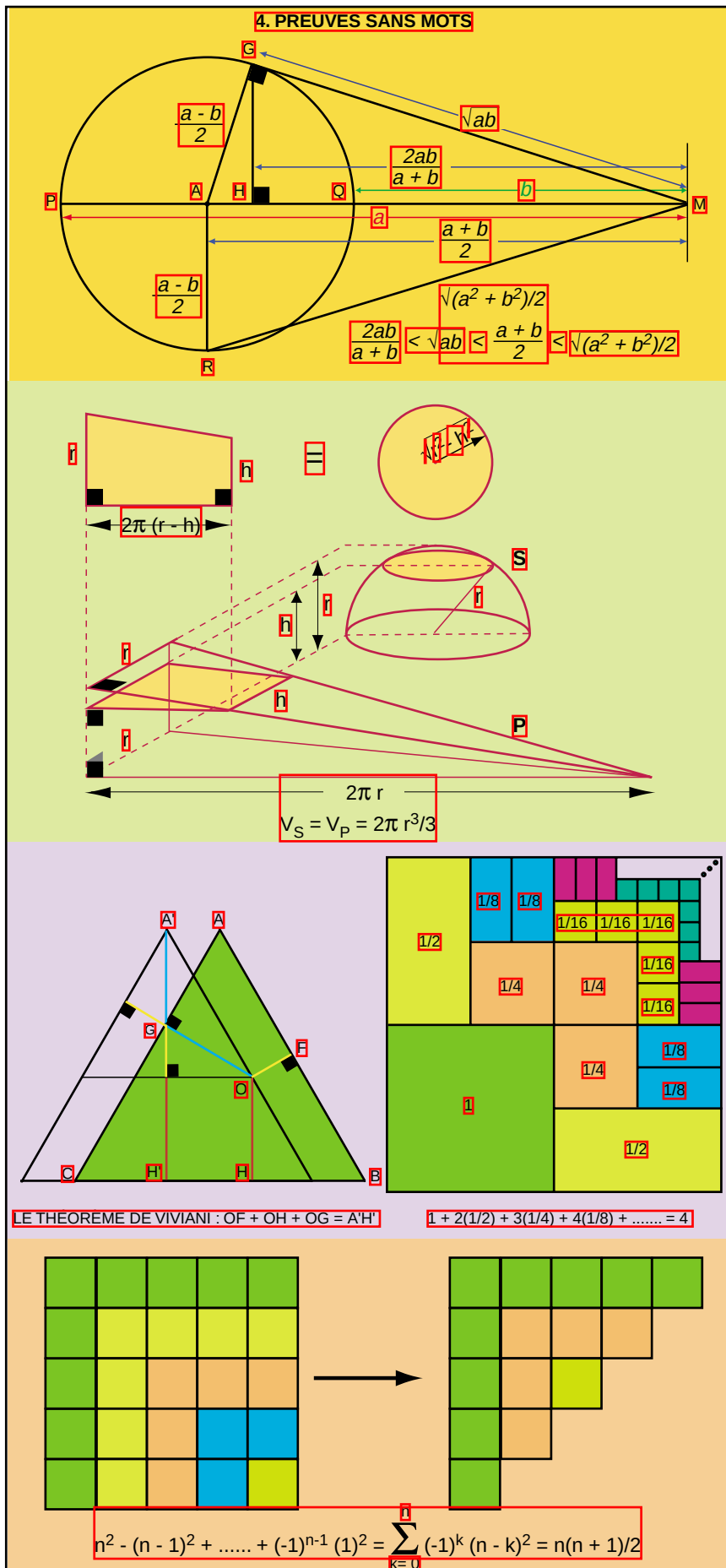
Ces omissions ne sont pas sans danger, et beaucoup de mathématiciens vous diront que, même si elles paraissent inévitables, elles restent périlleuses. Il est fréquent en effet que des erreurs se produisent dans les textes mathématiques, précisément en ces endroits incomplètement détaillés par un mathématicien pressé et sincèrement persuadé que la démonstration est possible à partir des indications succinctes qu'il propose à titre d'argument.

Ces facilités autorisées par les «laisés au lecteur», et autres «à titre d'exemple, démontrons le cas numéro 5», sont dangereuses, car tous ceux qui écrivent des textes mathématiques savent que bien souvent ils n'ont pas détaillé pour eux-mêmes sur une feuille à part ces parties manquantes qu'ils suggèrent au lecteur de reconstituer seuls. Ils y ont réfléchi, ils sont intimement convaincus que «ça passe», mais est-ce suffisant ? Pourtant comment pourrait-on s'interdire ces facilités, puisque Bourbaki lui-même reconnaît que, dans les textes mathématiques, «l'emploi des ressources de la rhétorique est nécessaire» (Bourbaki, Introduction, p. 7) ?

Encouragé par le plaisir de l'économie et l'élégance de la concision, soucieux aussi de ne pas passer pour un imbécile en donnant des détails sur un passage vraiment facile, tout mathématicien écourte ses démonstrations, et cela d'autant plus qu'il s'adresse à des mathématiciens de haut niveau. Assez étrangement donc, les risques sont maximaux dans les textes présentant des résultats de recherches. Dans un cours destiné à des étudiants, le mathématicien essaiera de contenir son penchant pour les brèves esquisses de preuves, sans toutefois résister à la tentation d'un «le cas 1 est trivial» et surtout au coup de l'exercice. Ces laconiques pirouettes font le désespoir des étudiants moyens, incapables de boucher ces trous prétendument aisés, et donnent un sentiment de culpabilité au lecteur trop pressé qui se dispense des travaux suggérés, dont pourtant, dans l'introduction, l'auteur a indiqué, avec perfidie, qu'il était important de les traiter soigneusement pour s'assurer de la bonne assimilation du cours.

UN TROU FAMEUX

Un des plus fameux trous dans une preuve mathématique provient d'un de ces raccourcis imprudents. On sait que, le mercredi 23 juin 1993, à l'issue de trois jours de conférence Andrew Wiles concluait en public une présentation de la preuve du Grand Théorème de Fermat (qu'il démontrait comme cas particulier de résultats plus généraux). Personne sur le coup ne put vérifier la démonstration bien trop complexe, dont seules les grandes lignes avaient été expliquées oralement. La démonstration, d'environ deux cents pages, fut soumise à un comité d'experts composé de six spécialistes qui travaillèrent des mois durant. De nombreuses fois, ils durent interroger A. Wiles pour obtenir des explications leur permettant de saisir le sens de ce qui était écrit. Face à une preuve formelle, les experts mathématiciens n'au-



5. PREUVE HEURISTIQUE IMPOSSIBLE (AUJOURD'HUI) À TRANSFORMER EN PREUVE FORMELLE

On considère la suite des nombres entiers définie par :

$$x_1 = 2,$$

$$x_2 = [\text{le plus petit facteur premier de } x_1 + 1] = 3,$$

$$x_3 = [\text{le plus petit facteur premier de } x_1 x_2 + 1] = 7, \dots,$$

$$x_{n+1} = [\text{le plus petit facteur premier de } x_1 x_2 \dots x_n + 1], \dots$$

Le début est 2, 3, 7, 43, 13, 53, 5, 6221671, 38709183810571, 139, 2801,

11, 17, 5471, ...

Cette suite d'Euclide-Mullin n'énumère que des nombres premiers différents. En effet, $y_n = x_1 x_2 \dots x_n + 1$ n'est pas divisible par x_1 (sinon 1 le serait comme différence de deux nombres divisibles par x_1). Le nombre y_n n'est pas divisible par x_2 (sinon 1 le serait), etc. Puisque y_n n'est divisible par aucun des nombres premiers, $x_1, \dots, x_n$, x_{n+1} est un nouveau nombre premier, et donc tous les x_i sont des nombres premiers distincts. La question est de savoir si cette suite énumère tous les nombres premiers sans en oublier (bien sûr, ce sera dans le désordre). On pense que oui et l'on propose la preuve heuristique suivante.

Supposons que la suite ne contienne pas tous les nombres premiers. Soit p le plus petit nombre premier qui n'est pas dans la suite. À partir d'un certain N , tous les nombres premiers inférieurs à p seront parmi les nombres $x_1, \dots, x_N$. Si n est un entier quelconque plus grand que N , le nombre $y_n = x_1 x_2 \dots x_n + 1$ peut être considéré comme un nombre quelconque vis-à-vis de p , et donc ce nombre a une chance sur p d'être un multiple de p (car un entier sur p est multiple de p). Le nombre y_n a donc une probabilité de $(1-1/p)$ de n'être pas multiple de p , qui est aussi la probabilité que x_{n+1} soit différent de p . La probabilité pour que ni $x_N + 1$ ni $x_{N+2} \dots x_{N+k}$ ne soient égaux à p est donc $(1-1/p)^k$ qui tend vers 0 à l'infini. Autrement dit, la probabilité pour que p n'apparaisse pas dans la suite x_n est nulle. Donc p apparaît dans la suite, ce qui contredit sa définition. Donc, tout nombre premier p apparaît dans la suite x_n , qui n'est pas autre chose que la liste des nombres premiers, sans répétition et écrite dans le désordre.

Un tel raisonnement est presque bon, mais il suppose que y_n est tiré au hasard, ce qui n'est pas le cas, et donc, sans un complément (que personne n'a réussi à découvrir et qui semble hors de portée des méthodes mathématiques actuelles), la preuve heuristique n'est pas une preuve acceptable.

raient pas eu à contacter A. Wiles ! A. Wiles lui-même prétendait avoir vérifié chaque étape de la démonstration deux fois avant de la confier à ses collègues. À chaque question des experts, il proposait d'ailleurs une réponse qui levait la difficulté soulevée. Petit à petit, A. Wiles rendait compréhensible son document, qui, si les mathématiciens se conformaient à la description idéalisée évoquée au début de cet article, aurait dû l'être dès le départ.

On avançait lentement vers une validation totale, jusqu'au jour où une réponse ne contenta pas totalement un expert, ni le complément de réponse du jour suivant : il y avait un trou dans la démonstration, que, malgré tout le soin pris par A. Wiles, ce dernier n'avait pas vu. Le « bogue » provenait de l'utilisation, hors des conditions précises où il avait été démontré, d'un procédé que A. Wiles, dans une généralisation hâtive, avait utilisé sans faire dans ce cas tous les contrôles exigés.

On connaît la suite : plus de deux ans furent nécessaires pour corriger l'erreur et arriver, en empruntant un chemin différent de celui proposé en 1993, à une démonstration complète et accep-

tée des experts. Notons, pour rassurer les inquiets, qu'une fois cet accord des experts obtenu, la preuve fut confirmée par d'autres experts. Plus aucun doute ne persiste aujourd'hui sur sa validité, c'est-à-dire sur la possibilité d'écrire une preuve formelle du théorème de Fermat. La longueur de la preuve interdit, pour l'instant, cette transcription formelle complète, mais il n'y a aucune controverse sur son existence. La difficulté évoquée dans la rubrique de novembre concernant la transcription de la preuve de A. Wiles dans le formalisme de l'arithmétique élémentaire de Peano (plus limité que celui de la théorie des ensembles qui sert de référence implicite aujourd'hui) n'entache en rien l'unanimité qui règne sur la validité de la preuve de A. Wiles, et, sauf à imaginer que la théorie des ensembles est contradictoire, la victoire est définitive.

LES CONTROVERSES

Aujourd'hui, lorsqu'il y a une controverse en mathématiques sur la validité d'une démonstration, il est donc vrai en défini-

tive qu'elle ne dure jamais longtemps, et cela à cause de la possibilité de s'approcher de plus en plus de ce que serait la preuve formelle complète du résultat.

Le rapport entre *preuves formelles* et *preuves réelles* peut donc se résumer en disant : les preuves formelles ne sont que très rarement écrites par les mathématiciens parce qu'elles sont très longues, mais ce sont quand même elles qui servent de recours ultime dans l'évaluation d'une *preuve réelle* dont la validité est douteuse. C'est, en effet, en cherchant à s'approcher pas à pas de ce que serait la *preuve formelle* du résultat discuté qu'on obtient l'accord définitif : ou bien on ne rencontre pas d'obstacles sur le chemin qui y conduit (et qu'on emprunte rarement jusqu'au bout) et la *preuve réelle* est considérée juste, ou bien un trou insurmontable apparaît et la preuve est insuffisante, donc inexistante...

La suppression des controverses en mathématiques est relativement nouvelle, car, avant les progrès logiques du début du siècle, il s'en présentait régulièrement et de graves incertitudes divisaient les esprits, même en mathématiques. Ce fut le cas à la fin du XVIII^e siècle quand le calcul différentiel fut découvert et que la notion de limite n'était qu'imparfaitement maîtrisée (elle le fut par A. Cauchy, 1789-1857, et par K. Weierstrass, 1815-1897). Au moment de la mise au point de la topologie, d'autres controverses prolongées eurent lieu, comme celle que le philosophe Imre Lakatos détaille dans son livre à propos de la formule d'Euler $s - a + f = 2$ (a est le nombre d'arêtes d'un polyèdre ; s le nombre de sommets ; f le nombre des faces) dont il fut difficile de préciser exactement le domaine de validité.

Au début du siècle, une des dernières grandes controverses en mathématiques fut celle concernant les fondements mais elle ne porta pas sur l'exactitude ou l'inexactitude de preuves précises, ce fut une discussion sur les modes de raisonnement qu'on pouvait légitimement mettre en œuvre (notions ensemblistes, axiome du choix, raisonnements non constructifs, etc.). Aujourd'hui, grâce aux systèmes formels, la controverse sur les fondements des mathématiques s'est éteinte et n'est plus qu'un problème pour philosophes dont peu de mathématiciens se soucient. Sur toute question importante, un accord unanime s'établit, ce qui fait véritablement des mathématiques une science à part.

Des doutes concernant le théorème de Gödel exprimés juste après sa parution par quelques mathématiciens et les incompréhensions graves qui font douter des amateurs de tel ou tel résultat

(par exemple, la non-dénombrabilité des nombres réels ou l'impossibilité de la quadrature du cercle) ne doivent pas être pris plus au sérieux que les tentatives de réaliser un mouvement perpétuel qui obsède les inventeurs du dimanche. Oui, en mathématiques aujourd'hui, l'unanimité existe concernant la justesse, et aucune controverse véritable n'a plus cours.

PROGRÈS DANS LA FORMALISATION

Bien que peu de mathématiciens se soucient au quotidien de la formalisation complète de leurs preuves, les progrès faits sur ces questions ne sont pourtant pas négligeables.

Poincaré se moquait du fait que, pour écrire 1 dans le formalisme du système des *Principia* de Russell et Whitehead (le premier système formel complet permettant l'écriture d'un volume important de mathématiques), il fallait un grand nombre de symboles, ce qu'il trouvait absurde. Passionné par le traité de *Mathématiques* de N. Bourbaki, dont les premières pages sont constituées par la description détaillée du système formel sur lequel le traité s'appuie ensuite, un ami s'était amusé à écrire explicitement la suite des symboles représentant l'ensemble des parties d'un ensemble sans utiliser aucune abréviation. Le tout, une fois transcrit sur un rouleau de papier, avait une longueur de trois mètres.

Les systèmes formels d'aujourd'hui ne présentent pas tous ces défauts ridicules, car, dans le but de les manipuler, on a conçu avec des ordinateurs des notations plus efficaces. On a d'ailleurs, grâce à cela, pu écrire des preuves de résultats assez avancés de mathématiques. Les techniques mises au point à cette occasion servent aussi à prouver la validité de programmes informatiques, et c'est là tout un domaine de recherche actif où la logique vient en aide à l'informatique.

LES INFINIMENT PETITS FORMALISÉS

D'autres progrès logiques ont étonné les mathématiciens. On désespérait de justifier par un formalisme précis les méthodes de calcul qui fonctionnent pourtant bien et qui se fondent sur la manipulation des infiniment petits. L'analyse des XVIII^e et XIX^e siècles avait d'ailleurs débarrassé les mathématiques de ces troubles infinis qui paraissaient indomptables. Le système formel de l'Analyse non standard de A. Robinson, dans les années 1960, a réussi l'exploit de proposer un usage réglé des infiniment petits. Celui qui souhaite

profiter de son intuition de physicien pour calculer dispose maintenant d'un formalisme qui pourra valider ses calculs, jusque-là considérés comme non rigoureux. Les résultats logiques connus concernant l'Analyse non standard sont remarquables, et l'un d'eux indique que toute propriété ne mentionnant pas les infiniment petits démontrés dans le cadre formalisé de l'Analyse non standard peut aussi être démontrée sans utiliser les infiniment petits dans le formalisme ensembliste usuel. Ce résultat justifie *a posteriori* le choix fait historiquement par les mathématiciens de se passer des infiniment petits, mais, le connaissant, il permet aujourd'hui à celui qui trouve commode de les utiliser de laisser libre cours à son goût.

PREUVES HEURISTIQUES ET «PRESQUE PREUVES»

À côté de la notion de preuve formelle qui sert à mettre tout le monde d'accord pour savoir ce qui est vraiment démontré, il existe une multitude de preuves non formelles et résolument non formalisables (du moins avec les systèmes connus aujourd'hui) qui fournissent des presque-certitudes. Ces preuves heuristiques, c'est ainsi qu'on les appelle, sont étranges, car quand on les suit, elles persuadent de la vérité des propositions visées. Pourtant, comme pour les preuves démontrées autrefois par les infiniment petits, les mathématiciens les refusent. Bien qu'elles «fassent voir que c'est vrai», tant qu'on ne disposera pas de bons systèmes formels (analogues à celui de A. Robinson pour l'Analyse non standard), il sera impossible de les transformer en preuves formelles, ce qui signifie tout simplement qu'aux yeux des mathématiciens elles ne démontrent rien!

Un exemple de preuve heuristique difficile à transformer en preuve formelle est indiqué sur la figure 5.

PRESQUE, MAIS PAS VRAIMENT

Un autre exemple de résultat presque prouvé est celui qui concerne les nombres parfaits impairs, résultat qui résiste à une démonstration depuis 20 siècles. Un nombre parfait est un nombre qui est égal à la somme de ses diviseurs différents de lui-même. Le nombre 6 qui est divisible par 1, 2, 3 est un nombre parfait, car $6 = 1 + 2 + 3$. C'est le plus petit nombre parfait, et les trois suivants sont 28, 496, 8128. Existe-t-il des nombres parfaits impairs? La question est posée depuis plus de deux millénaires. Personne n'en a jamais trouvé, mais personne n'a

démonstré qu'il n'en existait pas. Malgré cette absence de démonstration, tout le monde est persuadé aujourd'hui qu'il n'existe pas de nombre parfait impair, car on a démontré (rigoureusement) une grande quantité de propriétés que devrait posséder un tel nombre parfait impair N , s'il en existe.

– Un nombre parfait impair N , s'il en existe, possède au moins 8 facteurs premiers différents et, s'il est multiple de 3, il doit en posséder au moins 11 (P. Hagis, 1983).

– Un nombre parfait impair N , s'il en existe, est tel que la somme des inverses de ses facteurs premiers est située entre 0,596 et 0,694 (D. Suryanarayan, P. Hagis, 1970).

– La plus grande puissance d'un nombre premier qui divise un nombre parfait impair N , s'il en existe, est plus grande que 10^{20} (G. L. Cohen, 1988).

– Un nombre parfait impair N , s'il en existe, est plus grand que 10^{300} (R. Brenti, G.L. Cohen, H. te Riele, 1989).

– Un des facteurs premiers d'un nombre parfait impair N , s'il en existe, dépasse 10^6 (P. Hagis, G.L. Cohen, 1998), un autre dépasse 10^4 , et un autre encore dépasse 10^3 (1999, D. Iannucci).

Remarquez que certains résultats ont été démontrés il y a seulement quelques mois. Il semble qu'aucun nombre ne puisse vérifier toutes ces conditions à la fois (mais ce n'est pas rigoureusement établi), et donc on croit plus fortement que jamais qu'il n'existe aucun nombre parfait impair. Ce sentiment et l'idée qu'on est arrivé à quelques millimètres du résultat final ne constituent pas une preuve mathématique formalisable, et donc, comme c'est toujours le cas, aucune controverse n'a cours sur ce point : aussi fort que soit notre sentiment qu'on a qu'il n'existe pas de nombres parfaits impairs, personne ne prétend que c'est prouvé.

Nicolas BOURBAKI, *Éléments de mathématique*, Paris.

Imre LAKATOS, *Preuves et réfutations*, Éditions Hermann, Paris 1984.

Roger NELSEN, *Proofs Without Words : Exercices in Visual Thinking*, The Mathematical Association of America, 1993, ISBN 0-88385-700-6.

J. DIEUDONNÉ, *Pour l'honneur de l'esprit humain*, Hachette, 1987.

Jean-Michel SALANSKIS, *Le constructivisme non standard*, Presse universitaires du Septentrion, ISBN 2-85939-604-7, 1999. (À propos de l'Analyse non standard).

Simon SINGH, *Le dernier théorème de Fermat*, Éditions J.-C. Lattès, 1998.

Astronomie

La vie sur Mars

Charles Frankel. Éditions du Seuil, 1999 (312 pages, 135 francs).

Dès l'Antiquité, l'homme hésite : la Terre est-elle immuable, au centre de l'Univers, entourée d'«ornements célestes», ou bien est-elle en orbite autour du Soleil, au même titre que les autres planètes ? L'Église catholique cautionne la première hypothèse, et tout dissident à la doctrine officielle de la création termine dans les flammes de l'Inquisition. Ainsi périt Giordano Bruno (1548-1600), prêtre italien, hérésiarque, qui s'est emparé des idées héliocentriques de Nicolas Copernic (1473-1543) et qui a proclamé que les différentes planètes pouvaient abriter la vie ; les étoiles sont autant de soleils, avec leurs planètes, leurs races, leurs cultures et leurs religions. Bernard de Fontenelle (1657-1757), dans ses *Entretiens sur la pluralité des mondes*, conçoit également des systèmes stellaires peuplés d'habitants, de plantes, d'animaux divers.

L'héliocentrisme l'emporte, alors que les lunettes astronomiques montrent les astres. En 1659, Christiaan Huygens (1629-1695) propose les premiers croquis de Mars, planète plus éloignée du Soleil que la Terre : il imagine un cli-

mat plus froid que le nôtre, et des habitants adaptés à cette rigueur.

Au XIX^e siècle, les spéculations sur la pluralité des mondes continuent, et Camille Flammarion (1842-1925) propose une exploration systématique des planètes, afin d'y rechercher la vie. Dans ce contexte, il n'est pas étonnant que Giovanni Schiaparelli (1835-1910), puis Percival Lowell (1855-1916) décrivent des chenaux ou des canaux sur Mars : une race extraterrestre serait-elle obligée de lutter contre la sécheresse pour conserver sa végétation et assurer son agriculture ?

Au XX^e siècle, les télescopes contredisent les intuitions de Lowell : les canaux n'étaient que des artefacts. En revanche, on observe des changements polaires saisonniers : un voile humide se déplacerait-il vers l'équateur, autorisant la reprise périodique de la végétation martienne ? La recherche d'une atmosphère devient prioritaire, mais les premiers résultats, décevants, font reculer l'hypothèse de la vie sur Mars.

Après beaucoup d'essais soviétiques et américains, c'est en 1965 que la sonde *Mariner 4* fournit enfin des renseignements partiels et peu encourageants sur la planète rouge : elle est deux fois plus petite que la Terre, et son atmosphère a une pression 100 fois inférieure à celle qui nous fait vivre. Les sondes suivantes donnent une couverture photographique plus complète, et la géologie martienne se révèle pleine de surprises. Tandis que les calottes glaciaires feuilletées recouvrent les pôles, l'hémisphère Sud se compose de vieux

terrains cratérisés, et l'hémisphère Nord de volcans géants, élevés ou plats qui reposent sur des plaines. Outre ces formations, on découvre un canyon long et profond, qui serait la preuve d'un effondrement du sol lors de la fonte de glaces souterraines. De plus, des formations typiques de bassins hydrographiques sont observables dans les deux hémisphères.

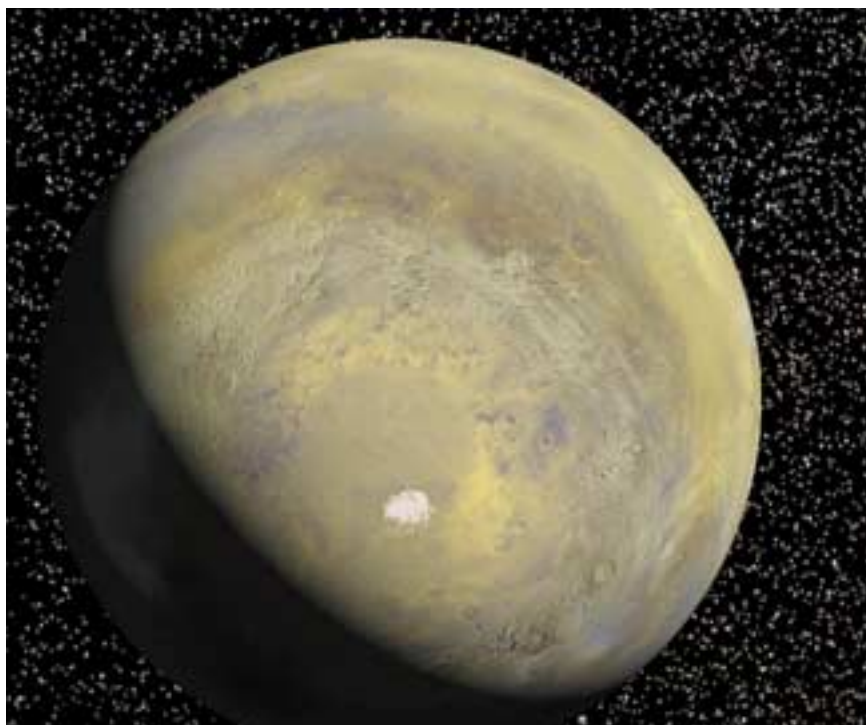
La température oscille entre -15 °C le jour et -80 °C la nuit, et l'atmosphère ténue comprend du dioxyde de carbone (95 pour cent), de l'azote (2,7 pour cent), de l'argon (1,6 pour cent), et des traces d'oxygène, de monoxyde de carbone et d'eau. Cependant, dans un passé lointain, des variations climatiques ont existé, et il est raisonnable d'envisager une atmosphère plus chaude et plus dense, favorable à la vie.

Ainsi la recherche de la vie sur Mars ne repose plus sur l'existence d'intelligences extraterrestres avec lesquelles on chercherait à communiquer, mais sur la compréhension d'un passé géologique, climatique et chimique qui pourrait avoir favorisé l'apparition de la vie. Les recherches sur les milieux extrêmes terrestres, telles les sources hydrothermales ou les glaces de l'Antarctique, nous autorisent à étudier, sur d'autres planètes que la Terre, des mécanismes prébiotiques, puis biotiques.

C'est une météorite martienne découverte le 27 décembre 1984 en Antarctique, ALH 84001, qui relance un débat passionné et justifie de nouveaux espoirs. On connaît bien l'histoire de cette pierre de deux kilogrammes : elle est née avec la planète dans le magma en fusion, il y a 4,5 milliards d'années, à plus de 100 mètres de profondeur, a subi des chocs qui l'ont zébrée il y a quatre milliards d'années, des fluides chauds ont circulé dans les stries, déposant des carbonates, il y a 3,6 milliards d'années. C'est à cette époque que la vie aurait pu apparaître. Puis la planète a perdu son atmosphère, la pierre est restée congelée durant trois milliards d'années, avant d'être éjectée dans l'espace ; après un séjour de quelque 15 millions d'années, elle serait arrivée sur la Terre il y a 13 000 ans. L'analyse de la roche a montré des particularités surprenantes : des globules de carbonates avec, en surface, des larmes de magnétite et des microformes qui font penser à de très petites bactéries.

Ces caractéristiques, sans constituer des preuves absolues, permettraient d'envisager une activité biologique. Les indices discutés depuis des années incitent partisans et adversaires de la vie sur Mars à considérer l'exploration de la planète comme essentielle.

En 1997, le remarquable petit robot *Sojourner* a roulé sur le sol martien et



La planète Mars.

exploré une plaine d'inondation. Sur le site, il a montré des rochers qui avaient été violemment charriés il y a un milliard d'années. Toujours pas de trace de vie à la surface de la planète... mais en profondeur ?

A la recherche d'un site approprié pour la recherche d'une vie profonde, on envisage des vols habités, qui déposeraient sur la planète rouge tout le matériel nécessaire à ces missions humaines de longue durée. Outre la recherche de la vie, les prospections concerneraient les ressources minérales : la planète est jugée colonisable, le sol fertile. On envisage d'enrichir l'atmosphère et de la réchauffer («terraformage»). Quand l'effet de serre sera enclenché, la température et la pression augmentées, les calottes polaires fourniront de l'eau, et du dioxyde de carbone s'échappera du sol. On parle d'un millénaire pour que l'homme vive sur Mars...

Ainsi, de la recherche de nos origines à l'exploration d'autres planètes, les questions essentielles demeurent, mais la science, faite de propositions audacieuses et d'expérimentations novatrices, nourrit le rêve. Le livre de Charles Frankel est une brillante réussite. Vulgarisation scientifique bien maîtrisée, documentation actualisée, objectivité : il ne bascule jamais dans le sensationnel. De cette histoire passionnante, le lecteur éprouve le besoin impérieux de connaître la suite.

Michèle FEBVRE

Biologie

La sculpture du vivant

Jean-Claude Ameisen. Éditions du Seuil, 1999 (340 pages, 145 francs).

La mort cellulaire programmée, aussi nommée apoptose, est aujourd'hui l'un des phénomènes les plus étudiés par la recherche biomédicale : plus de 10 000 articles concernant l'apoptose ont été publiés dans des revues scientifiques, en 1999 seulement.

La mort des cellules était connue, depuis le ^{xix}^e siècle, comme un processus de sculpture du corps au cours du développement embryonnaire, mais la recherche biologique du ^{xx}^e siècle s'est concentrée, pendant plusieurs décennies, sur la multiplication et la différenciation des cellules, négligeant la mort de ces dernières comme phénomène structurant. C'est seulement en 1972 qu'a été redécouverte la mort cellulaire et que le mot

«apoptose» est apparu ; à partir de cette date, la biologie, la science du vivant, se penche sur les mécanismes moléculaires de la mort des cellules au cours des processus physiologiques (reproduction, développement, homéostasie de l'organisme adulte, vieillissement) et décrit les nombreuses situations où des cellules superflues, âgées, endommagées ou placées en dehors de leur contexte habituel, disparaissent par apoptose.

On doit évidemment vaincre une petite résistance intuitive pour concevoir que, dans notre organisme, des millions de cellules meurent chaque seconde, que cette mort massive sculpte inlassablement notre corps, que son bon déroulement, sans excès et sans oubli, est même indispensable à notre survie. Concept plus surprenant encore, les cellules ne sont pas assassinées par leurs voisines, mais contribuent activement à leur mort : elles s'autodétruisent ou, pour utiliser une expression anthropomorphe, «se suicident».

Dans cet ouvrage qui porte le sous-titre «Le suicide cellulaire ou la mort créatrice», Jean-Claude Ameisen conte avec un style parfois lyrique, adapté à la dimension philosophique de la question, l'importance du suicide cellulaire pour la physiologie et la physiopathologie des organismes supérieurs. Il donne une vision intégrée des étapes qui ont contribué à l'explosion de ces champs de recherche, tout en procurant suffisamment d'informations de base pour que le livre soit lisible par un assez large public, notamment les étudiants des facultés des sciences ou de médecine. Je regrette l'absence de schémas, de graphiques et de références bibliographiques qui, du texte, permettraient de remonter à la source des informations données, mais je dois admettre que ce texte, le premier dans son genre en langue française, a le mérite de rendre concevable l'idée de la mort (et du suicide) des cellules comme partie intégrante de la vie.

L'auteur n'hésite pas à soulever les très grandes questions philosophiques et pratiques liées à l'apoptose ; il les aborde d'une manière claire, souvent à l'aide de métaphores simples. Ainsi une grande partie du livre est consacrée aux mécanismes de régulation de la mort, de sa programmation intrinsèque et extrinsèque, de la destruction enzymatique de la cellule, du ramassage des dépouilles cellulaires au sein de l'organisme, et de l'implication de la mort cellulaire dans les pathologies et dans le vieillissement.

Le livre se demande également pourquoi, pendant l'évolution, des structures vivantes ont acquis les mécanismes fins et régulés d'autodestruction qui permettent la mort des cellules, indispensables au fonctionnement des organismes pluri-



Cellule en apoptose au microscope électronique : sa membrane bourgeonne et son cytoplasme se divise en petits ballonnements.

cellulaires, les «sociétés des cellules». C'est dans les organismes pluricellulaires que l'absence d'apoptose, pendant l'embryogenèse, peut engendrer des malformations majeures ou, plus tard, contribuer à la prolifération incontrôlée, à l'immortalisation des cellules qui, normalement, s'élimineraient (cas du cancer).

Comment le vivant a-t-il inventé la mort en son sein ? La réponse est complexe, puisqu'elle demande une réflexion inductive, non vérifiable au laboratoire (l'évolution ne se récapitule pas dans un tube à essai) : la démarche doit être plus philosophique que scientifique («scientifique» au sens de Karl Popper, qui revendique la possibilité d'invalidation expérimentale). Néanmoins, J.-C. Ameisen a le mérite d'ébaucher un scénario qui rend plausible l'invention de la mort. Il part d'un constat : même si, intuitivement, l'apoptose n'a qu'un sens dans les organismes pluricellulaires (où le sacrifice «altruiste» de certaines cellules s'effectue au profit de la collectivité) et n'a pas d'utilité dans les organismes unicellulaires (qui, *a priori*, n'ont pas besoin de comportements altruistes), il apparaît que certains êtres unicellulaires eucaryotes, lorsqu'ils meurent, par exemple dans des conditions de culture défavorables, présentent des altérations biochimiques et morphologiques qui ressemblent à l'apoptose des cellules humaines.

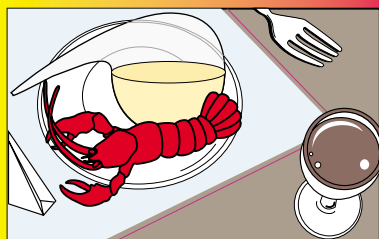
Le programme officiel de la mort pourrait donc avoir été développé par des bactéries (dont des colonies ont parfois un comportement social, y compris la mort «altruiste») ; l'incorporation symbiotique de celles-ci, sous la forme de mitochondries, dans les cellules eucaryotes primitives unicellulaires (les précurseurs des organismes pluricellulaires) constituerait l'élément fondateur de la mort programmée, d'abord dans les eucaryotes unicellulaires, puis dans leurs dérivés pluricellulaires. L'auteur propose également une autre solution, sans exclure la première : le suicide des cellules pourrait être l'expression extrême de réactions cataboliques qui résulteraient de l'inversion de

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 28 février 2000.



réactions biochimiques bâtisseuses, et la mort serait un simple sous-produit de la vie. L'énigme est servie.

Telles sont les grandes contradictions qui opposent vie et mort des cellules, individualisme et altruisme, santé et vieillissement, normal et pathologique, et qui sont habilement esquissées dans ce livre, dont la lecture profitera notamment aux non-spécialistes.

Guido KROEMER

Entomologie

Guide des libellules d'Europe et d'Afrique du Nord (nouvelle édition)

J. d'Aguilar et J.-L. Dommangeat.
Éditions Delachaux et Niestlé, 1998.

La première édition du *Guide des libellules*, parue en 1985, avait obtenu un très vif succès auprès des naturalistes, car, depuis des années déjà, le très fameux livre de M. Robert, *Les libellules* (1958), était épuisé et celui de M. Aguesse, *Les odonates de l'Europe occidentale...*, de dix ans son cadet, s'adressait à un public beaucoup plus spécialisé. Une quinzaine d'années après, il était temps que ce livre soit réédité dans la collection des *Guides du naturaliste*, elle-même remise au «goût du jour».

L'ouvrage est découpé en deux grandes parties : le texte, réservé aux généralités et à la description des espèces, et l'illustration (planches en couleur et cartes de répartition). Les généralités, comprenant tout ce qu'il faut savoir de la biologie des libellules actuelles, ont fait l'objet d'additions et de modifications qui concernent essentiellement l'écologie (aspect de la vie des odonates, ou libellules, qui a fait le plus de progrès ces dernières années), la conservation des milieux et, surtout, les réglementations régionales ou nationales relatives au prélèvement de ces insectes, certains pays allant jusqu'à interdire toute collecte.

Les chapitres concernant la récolte et l'élevage ont également été modifiés. Si les clés d'identification ont subi peu de changements dans leur contenu, leur illustration a toutefois été augmentée pour les larves ; en revanche, elles paraissent moins lisibles que dans la précédente édition. Il reste un regret, que nous faisons déjà pour l'édition précédente : l'absence de clés d'identification pour les espèces, au moins pour les adultes.

La faune de l'Europe comprend actuellement 137 espèces et environ 37 sous-espèces. Le nombre des espèces a augmenté (sept ou huit espèces selon la lecture que l'on fait de l'édition précédente), suivant en cela les données nouvelles de la systématique et de la biogéographie. Les additions les plus conséquentes concernent les genres *Boyeria*, avec son espèce *cretensis* endémique de Crète, et *Cordulegaster*, dont les représentants sont de très grande taille ; ainsi deux espèces font leur entrée dans le *Guide*, soit qu'elles aient été confondues, soit que leur statut ait changé. Cinq autres espèces, en limite de leur répartition géographique ou dont nous connaissons mieux la répartition, sont maintenant considérées comme faisant partie de la faune européenne. Ce sont : *Ischnura hastata*, aux Açores ; *Macromia amphigena fraenata*, dans l'extrême Est de la région considérée ; *Acisoma panorpoides ascalaphoides*, également très localisée (Algérie orientale) ; *Orthetrum taeniolatum* (Moyen-Orient) ; *Rhyothemis semihyalina*, déjà signalée dans l'édition précédente, présente dans la péninsule Arabique et dont les populations d'Algérie et d'Israël auraient disparu ; *Trithemis festiva*, au Moyen-Orient.

La nomenclature a suivi les quelques changements proposés par les systématiciens. Chaque espèce donne lieu à une petite monographie où est résumé tout ce qu'il en est aujourd'hui connu : les synonymes, les noms vernaculaires, les caractères permettant de les identifier, les variations spécifiques, les formes infraspécifiques quand il en existe, les habitats, les mœurs et une nouvelle rubrique fort utile traitant des espèces ressemblantes. Les espèces présentes en France, au nombre de 85, sont repérées par un petit pictogramme, suivant leur nom, représentant notre pays. Les regrets concernant cette partie ont trait, comme pour l'édition précédente, à l'iconographie, qui est insuffisante ou inutilisable pour identifier les espèces (la plupart des figures étant de la taille du timbre-poste).

La partie centrale de l'ouvrage réservée aux planches en couleur a été augmentée par de très belles photographies. De nombreuses espèces protégées en Europe et en Île-de-France sont photographiées. Les magnifiques planches de René Préchac ont pour la plupart été conservées, sauf celle illustrant les *Cordulegaster*, qui a été remplacée par deux pages de belles photographies, trop petites néanmoins pour que les caractères propres à chaque espèce soient bien visibles. Les cartes de répartition, fort utiles pour avoir une vision synthétique de la répartition des espèces, sont

parfois difficiles à lire. L'utilisation de couleurs, au lieu de grisés, en aurait facilité la lecture malgré leur petite taille.

L'ouvrage est considérablement plus volumineux que la première édition (463 pages contre 341), mais ce ne sont pas environ 120 pages supplémentaires de la vie des odonates. Cet embonpoint est davantage dû à des artifices éditoriaux, changement de police de caractères, augmentation de l'interlignage, sauts de page, présentation..., qu'à des informations nouvelles liées à la biologie des odonates. Je ne trouve pas que ce restylage soit une réussite.

Malgré les regrets exprimés, il reste que ce *Guide des libellules d'Europe* est indispensable à tous ceux qui s'intéressent à ces insectes.

Jean LEGRAND

Physiologie

Éloge de l'odorat

André Holley, Éditions Odile Jacob, 1999.

Tout individu doté d'un appendice nasal devrait lire cet ouvrage. Il y trouvera les informations les plus récentes sur ce sens encore un peu énigmatique que l'on nomme l'odorat. La qualité de la présentation des données scientifiques de ce livre et son niveau de réflexion devraient en faire une référence.

Discourir sur l'odorat n'est pas aisé tant les perspectives possibles sont nombreuses. André Holley, scientifique mondialement reconnu pour ses travaux sur l'odorat, adopte essentiellement deux points de vue : celui du scientifique pour nous présenter l'histoire des idées et les connaissances les plus récentes permettant de comprendre les mécanismes de la perception des molécules odorantes ; celui d'un penseur qui s'interroge sur le statut de l'odorat dans nos sociétés modernes.

Une histoire évolutive de l'odorat montre tout d'abord à quel point les principes d'organisation du système olfactif sont conservés dans différentes espèces. L'olfaction n'est pas l'apanage des vertébrés aériens. Chez les poissons, les « rosettes olfactives » contiennent deux types de neurones récepteurs, dont l'un semble spécialisé dans la détection des phéromones, messagers chimiques qui régissent des comportements spécifiques. On retrouve chez les vertébrés amphibiens et aériens cette dualité d'analyse senso-

rielle, avec l'émergence, à côté de l'organe olfactif pour détecter les molécules volatiles, de l'organe voméronasal pour accéder aux phéromones non volatiles contenues dans les sécrétions des congénères. Le système voméronasal (voir *Pour la Science*, n° 263, septembre 1999), que l'on dit « olfactif accessoire », joue un grand rôle chez les rongeurs dans l'adaptation du comportement de reproduction.

Les chapitres suivants abordent les mécanismes intimes de la perception des molécules odorantes. Longtemps restés mystérieux, ces mécanismes commencent à être mieux connus grâce aux progrès récents de la biologie moléculaire et de la physiologie. Le système olfactif se caractérise par sa très haute sensibilité et par son pouvoir prodigieux de discrimination. Une pléthore de cellules détectrices connectées à un plus petit nombre d'unités de traitement de l'information, les glomérules du bulbe olfactif, assurent une sensibilité maximale. Toutes les cellules détectrices connectées à un glomérule expriment la même protéine réceptrice. Environ un pour cent du génome est consacré à ces protéines réceptrices !

On ne sait pas encore, en termes moléculaires, ce que ces protéines réceptrices « voient » dans les molécules odorantes. Ce sera certainement l'un des grands chantiers du futur, avec, à la clé, le décryptage du code olfactif. En revanche, on comprend, à la lecture de ces chapitres, que chaque molécule odorante peut activer un ensemble particulier de glomérules, en présentant ses diverses « facettes » à des protéines réceptrices différentes. La finesse du pouvoir de discrimination d'un tel système d'analyse défie tout simplement l'imagination.

Les chapitres suivants proposent une autre perspective, celle de la psychologie et de l'étude cognitive de la perception des odeurs. Des aspects majeurs de l'odorat humain sont abordés, comme les relations difficiles entre perception olfactive et sémantique, les obstacles à toute classification des odeurs, les relations privilégiées entre perception olfactive et sentiments ou mémoire. L'importance de l'odorat dans le comportement de prise alimentaire et dans l'hédonisme est bien connue chez l'homme, et les bases neurophysiologiques de ces processus sont explicitées. Enfin, peut-on imaginer l'existence de phéromones olfactives chez l'homme ? L'auteur montre à quel point il faut être prudent en s'avançant dans ce domaine.

D'une façon plus globale, A. Holley nous invite à réfléchir sur nos relations avec l'odorat. Sens du flou et du non-dit, mal intégré à nos sociétés très techniques et complexes, l'odorat doit trouver sa future place. Face à une civilisation de l'image,

du langage et de l'écriture, l'odorat semble peu nous aider à comprendre le monde qui nous attend. Pourtant, très étroitement lié à nos émotions, nos sentiments et notre vie affective, il pourrait très bien agir comme un antidote indispensable.

Didier TROTIER

Histoire des sciences

Évolutionnisme et fixisme en France. Histoire d'un combat. 1800-1882.

Cédric Grimoult. CNRS Éditions.

Pourquoi la théorie de l'évolution ne s'est-elle pas imposée en France dès les premières décennies du XIX^e siècle, alors que des thèses évolutionnistes y étaient proposées par des savants renommés, au premier rang desquels Jean-Baptiste Lamarck et Étienne Geoffroy Saint-Hilaire ? C'est à cette question que s'efforce de répondre Cédric Grimoult.

Pour lui, plus que d'un débat, c'est d'un combat assez manichéen qu'il s'agit, avec deux protagonistes : un bon, Geoffroy Saint-Hilaire, et un méchant, Georges Cuvier. Ces deux rôles sont distribués d'après nos connaissances actuelles : Geoffroy Saint-Hilaire, parce qu'ils étaient transformiste, est nécessairement du côté du progrès et des lumières, alors que le fixiste Cuvier symbolise nécessairement les forces de la réaction et de l'obscurantisme.

Une telle vision des choses est conforme à une vieille tradition de l'histoire des sciences française, qui a volontiers donné le mauvais rôle à Cuvier. Il est accusé d'avoir abusé de ses hautes responsabilités universitaires et politiques pour défendre une position fixiste et créationniste inspirée par ses convictions religieuses ; par là même, il aurait étouffé dans l'œuf l'évolutionnisme naissant de Lamarck et de Geoffroy Saint-Hilaire, notamment lors d'un célèbre débat sur l'unité du plan d'organisation du corps dans le règne animal, qui eut lieu à l'Académie des sciences, en 1830.

Certes, Cuvier était un parfait représentant du système mandarin, qui nuit à la science française. Il est clair qu'il usa de son autorité pour combattre les idées opposées aux siennes, mais C. Grimoult ne va-t-il pas trop loin quand il accuse

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 Lederq (Rédactrice en chef adjointe), Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulenec (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Laperre. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Anne Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Leïla Bellon, Michel Billiard, Daniel Collobert, Bettina Debü, Christine Errard, Olivier Forni, François Gramain, Marie-Thérèse Landousy, S. Lubin, Valérie Martin-Rolland, Maurice Mattauer, Claude Olivier, Kevin O'Regan, Guy Paulus, Christophe Pichon, Félix Rey, François Rigaut.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, 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 Guillotin, jf.guillotin@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-oyes - 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).

Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 90A et 90B.

Cuvier de mauvaise foi et d'aveuglement, quand il lui reproche diverses erreurs d'identification, alors que les idées et interprétations de Geoffroy Saint-Hilaire, même fausses, sont présentées sous un jour favorable, simplement parce que leur auteur croyait à l'évolution des espèces ?

Qu'on le veuille ou non, même si Geoffroy Saint-Hilaire fut le premier à supposer que certains vertébrés fossiles étaient les ancêtres de formes actuelles, il fit totalement erreur en considérant que les crocodiles jurassiques de Normandie étaient à l'origine des crocodiles actuels et des mammifères. Et quand Cuvier qualifie de «gavials» les crocodiliens fossiles trouvés à Honfleur et à Caen, il sait qu'il ne s'agit pas du gavial actuel, et il ne commet donc pas la grossière erreur de détermination que lui reproche l'auteur.

Ce qui nuit à la crédibilité de la thèse ainsi proposée, c'est l'appréciation très discutable que l'auteur porte sur les travaux de Cuvier. Il est confondant de lire que «Cuvier ignore les découvertes géologiques de son siècle», alors qu'il est l'auteur, avec Alexandre Brongniart, d'une des plus importantes d'entre elles : l'utilisation stratigraphique des fossiles (découverte indépendamment en Angleterre par William Smith). Martin Rudwick a montré, dans ses remarquables travaux d'histoire des sciences, que la géologie de Cuvier n'était nullement rétrograde à son époque, bien au contraire. Une des autres contributions essentielles de Cuvier est largement ignorée dans l'ouvrage de C. Grimoult : la démonstration définitive du phénomène d'extinction des espèces. Si l'on veut bien comprendre le climat scientifique de l'époque, on doit savoir combien il était révolutionnaire d'affirmer que les espèces pouvaient disparaître autrement que par l'action de l'homme. Lamarck lui-même niait encore la réalité des extinctions. Si les découvertes paléontologiques du XIX^e siècle ont puissamment contribué à faire accepter la théorie de l'évolution, c'est bien parce qu'une paléontologie scientifique s'était développée, sur des bases posées en grande partie par Cuvier. On imagine difficilement comment l'idée d'évolution aurait triomphé si le concept d'extinction ne s'était pas d'abord imposé.

Reste le problème des prétendues motivations religieuses du fixisme et du catastrophisme de Cuvier. C. Grimoult adhère à la thèse souvent exposée selon laquelle ce protestant convaincu aurait eu pour préoccupation principale de faire concorder ses découvertes scientifiques avec la Bible. Une lecture attentive des œuvres de Cuvier, notamment du *Discours sur les révolutions du Globe*, peut conduire à une autre interprétation. Cuvier y mentionne que le Déluge biblique correspond à la dernière des révolutions ayant tou-

ché notre planète, mais il le cite parmi d'autres récits antiques et en relativise ainsi la signification. Ce faisant, il banalise le Déluge, en l'insérant dans la suite des événements naturels qui ont ponctué l'histoire de la Terre (nulle part Cuvier ne présente ses catastrophes comme des événements surnaturels). On est donc loin du géologue bibliste que se sont plus à dépeindre nombre d'historiens, y compris l'auteur de ce livre. Cuvier était-il, d'autre part, le dévot que l'on a très souvent décrit ? Dans une excellente biographie publiée en 1984 (Manchester University Press), Dorinda Outram a montré, documents à l'appui, que Cuvier ne faisait guère preuve de piété et que ses convictions religieuses se résument sans doute à un «déisme minimal». La vieille idée selon laquelle les idées scientifiques de Cuvier auraient été fortement influencées par la religion paraît difficile à défendre. On pourrait aussi remarquer que, dès le XIX^e siècle, il n'y avait pas nécessairement contradiction entre la foi chrétienne et l'acceptation de l'évolution. Albert Gaudry, ce paléontologue français qui fut un des plus ardents défenseurs de l'évolutionnisme dans la seconde moitié du siècle, n'était certainement pas darwiniste, contrairement à ce qu'écrit C. Grimoult, puisqu'il manifestait clairement sa répugnance à l'égard de la sélection naturelle, qu'il ne pouvait concilier avec sa croyance en un Dieu bienveillant.

Le livre de C. Grimoult contient néanmoins nombre de passages intéressants, notamment quand il examine la conversion de la majorité des scientifiques français à l'évolutionnisme, dans le dernier tiers du XIX^e siècle. Cette conversion eut pour cause principale les œuvres de Darwin, mais elle engendra une génération de lamarckistes, et non de darwinistes.

Revenons au point central : le débat entre fixistes et transformistes. Pour bien faire comprendre, il ne faut pas caricaturer. Ce n'est pas en faisant à Georges Cuvier un mauvais procès *a posteriori* que l'on éclaircira le débat complexe qui agita les géologues et les biologistes français du début du XIX^e siècle. D'ailleurs, si l'on veut juger les idées scientifiques de cette époque à l'aune de nos connaissances actuelles, on réhabilite facilement Cuvier : avec le retour en force du catastrophisme, depuis une vingtaine d'années, Cuvier apparaît même comme un précurseur plutôt que comme un rétrograde.

Éric BUFFETAUT

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>