

NOUVEAUX DISQUES DURS • SOLIDES COULANTS • RHINOCÉROS GÉANT • PETITES PLANÈTES



■ POUR LA

Pour la Science

SCIENCE

Juillet 2000

édition française de

www.pourlascience.com

SCIENTIFIC
AMERICAN

*Le noyau
de Jupiter
recréé en
laboratoire*

L'hydrogène
métallique



BLOC-NOTES

de Didier Noin

TRIBUNE DE LECTEURS

JEU-CONCOURS

Dynamique de grimpeurs

par Pierre Tonne

POINT DE VUE

Grilles de calcul

par Guy Wormser

PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

La vaccination anti-estreuse

par Fabienne Lemerand



SCIENCE ET GASTRONOMIE

De l'herbe au fromage

par Hervé This



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

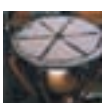
- L'obsidienne caennaise ■ Mères trompées
- Les problèmes du XXI^e siècle ■ Des villes englouties
- Le morse du manchot ■ La forêt en danger ■ Masse confirmée
- La santé du monde



VISIONS MATHÉMATIQUES

La logique des pirates féroces

par Ian Stewart



LOGIQUE ET CALCUL

La musique en images

par Christophe



IDÉES DE PHYSIQUE

Démarche en voiture

par Roland Lehoucq



ANALYSES DE LIVRES

Hydrodynamique physique. Problèmes résolus avec

l'appels de courtes, de Marc Fournier

■ **Marcelin Berthelot, un scientifique au service de la France**, de Daniel Huguette Berthelot

■ **Larousse des arbres et des arbustes**, de Jacques Brosse

■ **Pour la campagne**, de Bernard Farinelli

■ **Qu'est-ce que la vie?**, de C. Auffray et L.-M. Houdebine

Deux encarts d'abonnement entre les pages 18 et 19, un encart broché service lecteurs et une carte d'abonnement entre les pages 90 et 91. Les abonnés reçoivent un encart abonnement Génies de la Science et carte d'abonnement Téliorama de quatre pages en position centrale.



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

4

6

8

9

10

14

16

96

98

100

102

Le rhinocéros géant

26

par J.-L. Velcomme,
P.-O. Antoine et L. Marivaux

Des fossiles du plus grand mammifère terrestre de tous les temps. Paraceratherium, un rhinocéros de neuf mètres de long et de sept tonnes, ont été redécouverts au Pakistan, où l'animal vivait il y a 8 millions d'années.



Des solides coulants

34

par Ph. Coussot,
H. van Damme et Chr. Ancey

Dans l'écoulement des pâtes granulaires, comme le béton frais, la viscosité peut varier brusquement. La répartition du liquide et l'évolution des contacts entre les grains expliquent ce comportement.



Astéroïdes et comètes : des tas de cailloux

42

par Erik Asphaug

Les astéroïdes menacent la Terre, mais ils détiennent des informations précieuses sur l'origine des planètes.



Les muqueuses, sources d'immunité

52

par Françoise Mascart
et Camille Locht

Les muqueuses, les couches cellulaires qui tapissent notamment l'intestin et les poumons, sont dotées d'un système immunitaire spécifique.



La culture adoucit la surpopulation

60

par F. de Waal, F. Aureli et P. Judge

Les fortes densités de population engendrent-elles la violence? Cette croyance, fondée sur des recherches menées sur des rats, ne s'applique ni à l'homme ni aux autres primates.

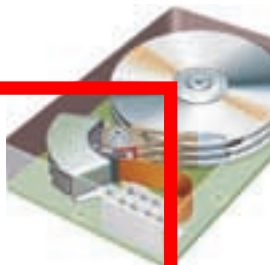


La mémoire des disques durs

66

par Jon Toigo

Les physiciens et les ingénieurs de l'industrie micro-électronique doivent mettre en œuvre des principes physiques nouveaux pour augmenter la capacité des disques durs.



Les myxines, charognards océaniques

76

par Frédéric Martin

Naguère confondues avec les lamproies, les myxines ressemblent probablement aux premiers animaux qui ont possédé un crâne, précédant ainsi les plus anciens animaux ayant une colonne vertébrale.



L'hydrogène métallique

84

par William Nellis

En recréant les conditions qui règnent dans le noyau de Jupiter, on obtient l'hydrogène sous la forme d'un métal.



Culture et nature

À mesure que les sociétés humaines se développent, c'est-à-dire s'éloignent de l'état de nature, réapparaît le mythe du bon sauvage vivant dans une famille tribale de dimension réduite. Et d'aucuns s'inquiètent des concentrations humaines. C'est le bon sens même, affirment-ils : plus nous sommes nombreux, plus les risques d'affrontement augmentent et entraînent la violence. Ainsi raisonnait Malthus et bien d'autres dans des réflexes conservateurs.

Vision superficielle : si nous nous regroupons dans les villes, c'est peut-être qu'ensemble nous vivons «moins mal». Les études menées sur le comportement des singes montrent que les fortes densités de population n'engendrent pas un accroissement de la violence (voir *La culture adoucit la surpopulation*, par Frans de Waal, Filippo Aureli, et Peter Judge, page 60).

Les meilleurs esprits ont mal apprécié les changements du comportement des individus en fonction de la taille des groupes : le mathématicien Stanislas Ulam prédisait la faillite des grandes entreprises, car, raisonnait-il, les conflits entre personnes augmentent comme le carré du nombre des salariés (chacun, donc n individus, peut entrer en conflit avec ses n collègues), alors que le travail fourni n'augmente que comme le nombre n d'employés. Là encore, «le bon sens même». Un mathématicien de cette stature aurait dû savoir que le bon sens est une mauvaise inspiratrice et que les découvertes en Science vont à l'encontre de l'entendement commun : les interactions entre individus, via la culture sociale, ne sont pas que sources de conflits, elles amènent aussi l'entraide et la synergie.

Poincaré a stigmatisé l'utilisation sociale mal dosée des mathématiques : «... Il faudrait s'abstenir absolument d'appliquer le calcul aux choses morales», affirmait-il. Ce point de vue est outré, car Poincaré utilisera les probabilités pour innocenter le capitaine Dreyfus, que le rapport «scientifique» de Bertillon semblait condamner. Et il utilisera aussi tout son poids mathématique pour prôner le suffrage proportionnel.

Il n'empêche, le quantitatif peut masquer le qualitatif : observons le comportement des singes de Frans de Waal pour mieux estimer nos possibilités de comportement.

Philippe BOULANGER



BLOG-NOTES

DIDIER NORDON

De l'estomac et pas les foies

Tous les sens peuvent servir à exprimer l'antipathie entre deux individus. Odorat : je ne peux pas le sentir. Toucher : entre lui et moi, c'est épidémique. Ouïe : nous ne nous entendons pas. Vue : je ne peux pas le voir en peinture. Goût : je le boufferais tout cru ; ou encore, je le vomis (ce qui revient au même).

Nombre d'organes servent au même propos. Je ne le porte pas dans mon cœur ; je le hais viscéralement ; c'est un casse-pieds ; il me bouffe les foies ; il me prend la tête ; il me hérissé le poil ; j'ai une dent contre lui ; je l'ai dans le nez... Combinant les sens et les organes, on imagine des phrases comme : « J'ai une dent contre lui, je vais le bouffer tout cru », voire des mésaventures : « J'ai une dent dans le nez, moi qui ne peux pas le blairer. »

Bref, les organes sont admirables. Mettez leur entre les dents d'un homme et d'un corps humain, et ne sachez s'en servir pour moduler les chants de haine les plus variés, les plus expressifs. Comme si, ô Lamarck, la fonction naissait de l'organe.

Souvenirs de jeunesse

Il fut une époque où les hommes redoutaient de vieillir. Certains étaient prêts à tout pour éviter le sort. Époque étrange!...

Ainsi, le chirurgien Serge Voronoff (1866-1951) se fit une spécialité de greffer des testicules de chimpanzés à des hommes désireux de retrouver leurs facultés défaillantes. Avec plein succès, bien entendu... du moins, si l'on croit le propre témoignage de Voronoff (Serge Voronoff, *Étude sur la vieillesse et le rajeunissement par la greffe*, rééd. SenS Éditions, 1999).

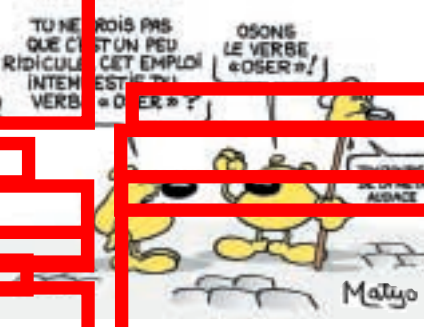
Peu avant, un autre médecin célèbre, Édouard Brown-Séquard (1817-1894), en tenait pour le chien. Si injectant à lui-même du suc testiculaire de chien, il retrouvait vigueur physique et activité intellectuelle... du moins, si on croit le propre témoignage de Brown-Séquard. Toutefois, à l'issue de sa cure de rajeunissement, pendant l'hiver 1889-

1890, à plus de soixante-dix ans, Édouard Brown-Séquard contracta... la coqueluche!

Or, comme bien on pense, s'il se rajeunissait à coup de suc de testicule, ce n'était pas dans l'espoir d'attraper

une maladie infantile. Travail, donc, qu'une expérience scientifique peut réussir parfaitement tout en échouant non moins parfaitement.

Quant à la jouvence de l'Abbé Souris, elle est présupposée si efficace que, malgré son ancienneté et les décès des gens qui se sont soignés avec, elle reste sur le marché. Comme le clergé ne saurait mentir, si l'on est atteint par les méfaits de l'âge, ce n'est pas que la jouvence est inefficace, c'est que l'on n'en a pas pris assez.



Il faut oser avoir de l'audace

Depuis longtemps, le verbe «oser» est un verbe fétiche des capitaines d'industrie («oser l'entreprise»). Il plaît également beaucoup à ceux qui prétendent nous débarrasser de nos complexes («osez parler en public»). De toujours, peut-être, il symbolise le pari métaphysique («oser croire»)...

Voilà que ce verbe se met à conquérir des champs nouveaux. Ainsi, un groupe de professeurs vient de publier *Oser enseigner* (PUF, 2000). Très intéressant. Comme s'il fallait autant d'audace pour être professeur que pour se lancer dans le rude monde de l'entreprise ! Quant à la Cité des sciences, elle organise un cycle de débats intitulé «Oser le savoir». Comme si cultiver le savoir, aujourd'hui, exposait au danger de s'en faire le sort de Giorgio Bruno!

Une mode actuellement répandue est de prétendre «faire acte de résistance». Cela consiste en général à se produire dans les médias pour y fustiger quelques abus nouveaux. Point n'est besoin d'un grand courage pour oser un tel «acte», qui ne fait pas courir les risques terribles affrontés par les véritables résistants ou dissidents.

N'empêche. Proclamer : «J'entre en résistance», cela pose son homme. En voilà un qui ose ! Oui, «oser» pourrait bien devenir le prochain verbe chéri par ceux qui se paient de mots. Une belle carrière l'attend.

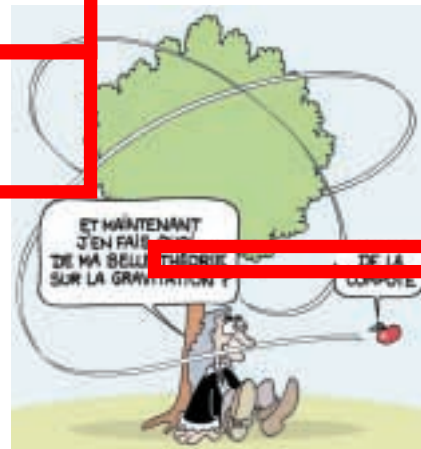
La banale efficacité des mathématiques.

L'utilisation par les physiciens de la théorie des groupes esquissée par Galois un siècle plus tôt est un rebondissement extraordinaire, que nul n'aurait prévu. Ce genre de rebondissement est-il propre aux mathématiques? Non : il s'en produit partout. Tel homme agit, d'autres hommes donnent un sens à son œuvre dans un contexte imprévisible.

Vivaldi pouvait-il deviner combien ses *Quatre Saisons* exaspéreraient de gens attendant au téléphone qu'une administration les mette enfin en relation avec leur correspondant? Quant aux jésuites partis évangéliser la Chine au XVI^e siècle, comment auraient-ils imaginé qu'ils allaient, au contraire, contribuer à déchristianiser l'Occident, Voltaire ayant vu dans leurs descriptions de la Chine la preuve qu'on pouvait être civilisé sans être chrétien? Les ruses de l'histoire sont aussi invraisemblables *a priori* que l'irruption des groupes dans la physique.

Quant à s'étonner que l'abstraction mathématique ait des applications concrètes, c'est oublier que l'abstrait et le concret, loin de s'opposer, sont en interaction. Concret comme l'homme, le cerveau n'en héberge pas moins l'imaginaire et ses abstractions. Toutes les entreprises humaines exigent la médiation des mots, donc toutes ont, pour amorcer, un pied dans la représentation abstraite. Les mots de la physique – «matière» ou «atome» – sont aussi abstraits que ceux des mathématiques – «structure» ou «groupe». Mathématiciens et physiciens interprètent le même monde. Tantôt les premiers sont en avance sur les seconds, tantôt c'est l'inverse : comme partout, les progrès naissent souvent d'un changement de perspective.

Le phénomène ahurissant serait que les mathématiques soient coupées de toutes les autres activités humaines. Uniques en leur genre, elles seraient les seules à ne pas participer au jeu de rebonds incessants des idées, d'une époque à une autre, d'un pays à un autre, d'une discipline à une autre. En ce cas, il faudrait s'émerveiller devant leur incroyable inefficacité, et s'interroger dessus.



TRIBUNE DES LECTEURS

Droit de réponse

L'article de Marilou Bruchon-Schweitzer intitulé «La graphologie, un mal français» (voir *Pour la Science*, février 2000) a retenu toute notre attention et suscité de notre part les observations suivantes.

En tant qu'organisme ayant pour mission de regrouper et de défendre les professionnels de la graphologie depuis 1953, nous constatons l'absence de considération portée sur l'activité des graphologues professionnels par les entreprises et les spécialistes du recrutement d'une part, et quelques journalistes et prétendus scientifiques d'autre part.

Aussi, nous déplorons qu'un certain nombre de magazines s'inscrivent délibérément dans une ligne de dénigrement qui nous semble incompatible avec les exigences d'une information complète et objective.

C'est pourquoi, il nous semblerait intéressant, pour l'information et la formation, de bénéficier d'une approche émanant des graphologues eux-mêmes concernant l'utilisation de la «Science de l'écriture» dans le cadre de la gestion des ressources humaines et, plus particulièrement, du recrutement.

Corine BANC, vice-présidente du Syndicat européen des graphologues professionnels

Droit de réponse (suite)

Nous réagissons à l'article de Marilou Bruchon-Schweitzer sur la graphologie (voir *Pour la Science*, février 2000). Nous ne pouvons accepter que, systématiquement, des personnes se donnent le droit d'attaquer et de ridiculiser notre travail et nos praticiens, et que cette entreprise de désinformation trouve toujours un écho favorable dans la presse, même spécialisée. Déclarer que l'utilisation de la graphologie dans le recrutement est illégale est une contrevérité. Les dispositions de la loi n° 90-568 ne comportent pas d'interdiction quant à l'utilisation de la graphologie dans le recrutement.

Il est faux de dire que les graphologues utilisent des schémas interprétatifs d'un autre âge. Les typologies anciennes qui ont servi de fondement à la graphologie ont été abandonnées au profit d'apports récents sur le fonctionnement psychologique (les neurosciences, par exemple).

M. Bruchon-Schweitzer omet de citer les recherches qui ont été faites par des spécialistes à orientation scientifique (Pophal, Heiss, Wieser, Müller-Enskat, Gobineau et Perron, Salce, Lewinson, pour ne parler que des plus connus) et qui, chacun dans leur spécialité, ont été d'éminents professionnels.

Sans varier son argumentation, sans tenir compte de l'évolution de la graphologie,

depuis ces années, M. Bruchon-Schweitzer fonde ses explications sur un malentendu savamment entretenu par l'utilisation du terme «prédiction» ; elle induit, de fait, une dimension irrationnelle qu'elle cherche à exploiter.

Les graphologues ne prétendent jamais «prédire» ; ils recherchent professionnellement à ne font que tracer un profil d'aptitudes en fonction du poste à pourvoir et de ses exigences. La réussite professionnelle dépend étroitement des conditions de travail, des rapports hiérarchiques, des modalités d'exercice des compétences dans le poste concerné, autant d'éléments dont ils tiennent compte dans leurs analyses, mais dont ils ne maîtrisent pas l'évolution.

D'autre part, dans tous les syndicats professionnels, l'exercice de la profession est strictement encadré par un Code de déontologie que les membres agréés sont tenus de respecter et qui, justement, permet d'éviter l'amalgame avec des «sciences occultes».

Cette entreprise de destruction risque de priver les consultants et les entreprises de ce que nous appelons une «richesse française» qui leur apporte un éclairage qui leur semble pertinent et utile.

Catherine BERGERON, présidente de la FNGP

Catherine CASTELLANI, présidente du SGDS et Bertram DURAND, président du SEGP

Réponse de Marilou Bruchon-Schweitzer

Lorsque, dans les deux lettres et les arguments de responsables de deux organisations de graphologues appellent de ma part quelques réponses et réflexions. Je nommerai lettre 1 celle de la vice-présidente du Syndicat européen des graphologues professionnels et lettre 2 celle signée par Catherine Bergeron, Catherine Castellani et Bertram Durand.

J'aurais aimé de citer des «recherches à orientation scientifique» (lettre 2). J'ai déjà publié une synthèse de toutes les recherches consacrées à l'écriture (dans le *Traité de psychologie du travail*, paru en 1987 aux Presses universitaires de France, pp. 535-567). Dans l'ensemble, ces travaux n'établissent pas la preuve de la validité de la graphologie. Ils citent dans cette synthèse les travaux de Gobineau et Perron, de Salce et Prenat, de Lewinson (travaux datant des années 1953-1961). J'inclusais donc ces travaux dans mon bilan global, assez réservé, de 1987. J'évoquerais plus loin les travaux postérieurs à 1987, tels ceux évoqués dans mon article et ceux de Schmidt et Hunter (1998).

Quant aux travaux allemands que vous citez (lettre 2), il est d'usage, chez les

«prétendus scientifiques» de mon espèce (lettre 1), de en donner précisément et exactement des références, ce que vous avez «oublié». Je suppose que vous voulez parler des ouvrages de Pophal (1949), de Heiss (1966) et de Weiser (1973). Ces ouvrages ne sont en fait que des manuels de graphologie, exposant les conceptions de leurs auteurs, en fait des ensembles d'hypothèses, non assorties des vérifications nécessaires à toute recherche scientifique. Quant à la référence à un certain Müller-Enskat (lettre 2), je suppose qu'il s'agit de l'ouvrage de W.H. Müller et de A. Enskat, *Graphologische Diagnostik*, publié en 1973 à Berne par l'éditeur V.H. Huber. Cet ouvrage est le seul à aborder clairement le problème de la validité. Mais le problème, pourtant crucial, n'occupe que 9 pages sur 268, ces pages consistant à résumer quelques validations (une dizaine), plutôt qu'à valider la conception des auteurs. Par ailleurs, ces auteurs reconnaissent que les résultats de ces études de validité «corrélations écriture-personnalité» sont «majoritairement négatifs» (p. 260). On ne peut être plus clair.

Vous affirmez dans la lettre 2 «ne pas utiliser des schémas interprétatifs d'un autre âge» ; avoir abandonné «les typologies anciennes qui ont servi de fondement à la graphologie au profit d'apports récents sur le fonctionnement psychologique (les neurosciences, par exemple)». Bravo ! Mais alors, pourquoi citez-vous comme référence (dans l'ouvrage de Pophal (1949), qui n'est pas vraiment à jour au niveau neurologique et qui est fondé sur une conception archaïque des localisations cérébrales ? Pour éviter de donner au lecteur la désagréable impression que vous utilisez la neuropsychologie seulement comme caution, on attend de vous que vous citiez des recherches précises ayant pour but de mettre à l'épreuve des hypothèses neuropsychologiques bien définies, recherches publiées dans des revues scientifiques. Dans vos manuels de graphologie (par exemple le *Manuel de graphologie*, de Henri Salceot et mes collègues, publié en 1987 chez Masson), vous vous référez toujours au symbolisme de l'espace de Max Pulver (1931) et aux conceptions du «père» de la graphologie française, J. Crépiaux-Jamin (*L'écriture et le caractère*, première édition, 1968). On attend toujours quelques manifestations concrètes de votre intérêt pour les données actuelles de la personnalité.

Dans la lettre 2, il y a comme un contre-sens en ce qui concerne le terme de prédiction. Il ne s'agit pas ici de prédire l'avenir comme le font les voyantes (à l'aide de la boule de cristal ou du marc de café...) ! La validité prédictive (concept que vous sem-

blez ignore, est l'une des qualités de toute méthode d'évaluation des personnes. Elle est appréciée généralement au moyen d'un coefficient de corrélation entre un comportement actuel (certains aspects de l'écriture, par exemple) et un comportement futur (réussite professionnelle ultérieure, par exemple). Le fait que l'écriture soit un «prédicateur» valide de la personnalité n'est qu'une hypothèse (et non une certitude). Chacune des recherches menées sur la validité de l'écriture consiste à soumettre ce type d'hypothèse (liens supposés entre l'écriture et la personnalité, par exemple) à l'épreuve des faits, ceci sur de très nombreux sujets, ceci de nombreuses fois. Une relation significative peut apparaître dans une recherche isolée entre certains aspects de l'écriture et certains traits de personnalité, cela ne démontre rien. Pour être absolument sûr que la relation observée n'est pas due au hasard, il faudra répéter l'expérience de nombreuses fois pour s'assurer de la généralité d'un tel résultat (ce sont des contre-validations), puis confronter de très nombreuses recherches différentes (comme on le fait pour les essais thérapeutiques, avant de commercialiser un médicament).

De telles synthèses (bien mieux que des résultats isolés) permettent de connaître les résultats d'ensemble des recherches menées sur la même question. Dans mon article, j'avais cité quelques-unes de ces vastes synthèses (Robertson et Smith, 1989 ; Neter et Ben-Shakkar, 1989), qui aboutissaient à des coefficients de validité prédictive en moyenne extrêmement faibles pour l'écriture (de 0,00 à +0,03). Il existe aujourd'hui des méthodes quantitatives pour faire la synthèse des résultats des recherches menées sur le même objet, que l'on appelle des méta-analyses. La plus récente d'entre elles est celle de Schmidt et Hunter (1990). Elle synthétise toutes les études menées depuis 85 ans sur la validité des méthodes utilisées dans le recrutement. Toutes les méthodes y sont classées selon leur coefficient de validité moyen (moyenne calculée à chaque fois sur plusieurs dizaines d'études différentes). On considère comme satisfaisantes les méthodes qui, utilisées seules, ont un coefficient de validité proche de +0,50 (ce coefficient pouvant varier de -1,00 à +1,00). Les résultats de cette méta-analyse sont éloquentes : les méthodes les plus valides sont les «échantillons de travail» (+0,54), les tests d'aptitude mentale générale (+0,51), l'exercice «structuré» (+0,51), puis 15 autres techniques classées par ordre de validité décroissant. La méthode qui apparaît en dernier rang est la graphologie, et son coefficient moyen de validité est quasi nul ($r = +0,02$). Pour pronostiquer la réussite professionnelle à partir d'un profil d'aptitudes (lettre 2), il semble plus sûr d'utiliser les tests d'aptitudes mentales que la graphologie ! Nous attendons toujours des preuves quant aux liens de l'écriture avec la réussite profes-

sionnelle. Se proclamer «science de l'écriture» (lettre 1), au vu de ces résultats constamment négatifs, est sans doute de l'autodérision.

Le fait de valider les méthodes utilisées dans l'évaluation du personnel est une nécessité scientifique et déontologique. Les psychologues consacrent leurs efforts depuis des décennies, et leur code de déontologie (signé le 23 mars 1996) définit ainsi leurs obligations (article 18) : «Les techniques utilisées par le psychologue pour l'évaluation, à des fins directes de diagnostic, d'orientation ou de sélection, doivent avoir été scientifiquement validées.» Comme chacun le sait, il en va de même sur le recrutement et les libérés individuels (loi du 1^{er} janvier 1993) précise que les techniques utilisées dans le recrutement doivent être «pertinentes au regard de la finalité poursuivie» et que le recruteur est «comptable de la rectitude scientifique des procédés qu'il utilise». Malgré la «considération» portée à la graphologie par les entreprises et par les spécialistes du recrutement (lettre 1), certaines entreprises, comme Saint-Gobain (*Le Monde*, du 12 juin 1990) ont «décidé de ne plus faire appel à la graphologie pour les recrutements dans l'ensemble des sociétés du groupe». Voici les trois raisons avancées par le président de cette société : la graphologie «n'a pas de caractère scientifique réellement fondé ; elle est perçue d'un regard négatif par les intéressés ; elle est jacobinement tolérée dans un nombre limité de pays...» Les signataires de la lettre d'opposition ont écrit que «l'exercice de leur profession est sévèrement encadré par un code de déontologie». Cette exigence éthique ne peut recommander aux graphologues de n'utiliser dans le recrutement que des techniques scientifiquement validées ?

Marilou BRUCHON-SCHWEITZER

Téléportation

À propos de l'article «Logique et calculs de la téléportation» (voir *Pour la Science*, juin 2000), je ne suis pas les informations qui permettent de construire directement quoi qu'il soit, car on ne sait pas transmettre les éléments – fax, images, sons, etc. – qui sont de nature informationnelle. À la limite, ce n'est que de l'information : la polarisation d'un photon, qui peut être téléportée par les phénomènes quantiques. Mais même l'étrange action instantanée à distance de la mécanique quantique est impossible à envoyer de l'information exploitable plus vite que la lumière.

Les informations donnent seulement la méthode de construction d'un objet matériel. De l'énergie doit être utilisée pour cette construction, quel qu'en soit le mode opératoire. On ignore dans cet article l'existence de cette énergie, aussi bien que celle du second principe de la thermodynamique qui a une importance décisive dans le métabolisme des

êtres vivants. De l'énergie ne peut surgir du néant (ou d'une donnée abstraite comme l'information), d'après le principe fondamental de la conservation de l'énergie. L'information elle-même a besoin d'énergie (souvent photonique pour pouvoir se transporter).

Quand l'auteur dit : «peut-être n'obtiendrons-nous qu'une masse amorphe dépourvue de vie et de pensée», ce n'est qu'un euphémisme. Un être vivant n'est pas une superposition de structures, mais un ensemble de processus dynamiques. Ce n'est pas la structure qui est première, c'est le dynamisme qui est à l'origine des structures vivantes. La mise en mouvement est résultat de la restructuration est impossible, car le mouvement n'est pas téléportable : le principe de la conservation de la quantité de mouvement l'interdit. La vie fait intervenir divers types d'énergie (biochimique, thermique, mécanique) qui ne sont pas téléportables. D'autre part, un être vivant évolue sans cesse. Même si, en utilisant les redondances, le temps nécessaire à l'analyse est très sensiblement inférieur à «trois milliards d'années», l'individu ne sera plus le même à la fin et au début de l'analyse : la seconde moitié de la tête sera quelques mois ou quelques années plus vieille que la première moitié ! C'est ubuesque.

Le nombre d'erreurs inévitables qui se glissent dans un programme est directement lié à sa longueur. La mise en forme d'un programme permettant la manipulation de la quantité gigantesque d'informations nécessaires à la reconstitution d'un être vivant est alors absolument rédhibitoire. Le degré de complexité du programme le rend théoriquement insolvable. Si l'on pense de plus qu'une erreur se fait certainement catastrophiquement lors de la reconstitution de l'individu, on a dépassé les limites du possible. L'analyse des objets à téléporter est impossible.

De grâce, laissons la téléportation à la fantaisie imaginative des hommes, à la science-fiction.

Jean TERRIER, Marseille

Précision

Dans l'adaptation en français de l'article de Patricia Rodier sur les origines de l'autisme (voir *Pour la Science*, mars 2000), une phrase (page 88) peut laisser croire que la plupart des psychologues souscrivent encore aujourd'hui aux thèses de Bruno Bettelheim : ce n'est plus le cas depuis des années.

La rédaction de *Pour la Science*

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° 73~~

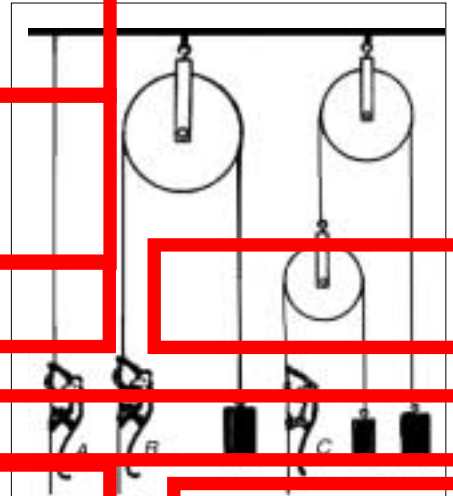
PIERRE TOUGNE

Dynamique de gr~~m~~peurs

Imaginons trois singes A , B et C sur les dispositifs représentés ci-contre. Pour le premier singe A , la corde est liée au plafond. La corde du second singe B passe par une poulie fixée au plafond à laquelle est attaché un poids égal au poids du singe, le maintenant ainsi en équilibre. Enfin pour le troisième singe C , la corde équilibrée par son poids passe par une poulie elle-même liée à une corde passant par une poulie fixée au plafond à laquelle est attaché un poids égal au double du poids du singe.

Au départ, les trois singes sont à la même hauteur ainsi que les contrepois et ils grimpent de façon identique. Lorsque le singe A a parcouru une certaine distance, quelles sont les distances parcourues par les singes B et C ?

On suppose que les boules de masse m et de rayon r glissent sans frottement sur les poutres, elles-mêmes sans masse.



Envoie vos réponses aux questions à Pour la Science, 8, rue Ferrou, 75278 Paris Cedex 01. Parmi les réponses exactes reçues en juillet 2000, dix gagnants recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 71

Afin de chercher les nombres répondant au problème, il suffisait de faire les quelques remarques suivantes. Toute permutation circulaire d'un nombre solution est encore un nombre solution, donc on peut choisir le premier chiffre, disons 9 (dans le but de trouver le nombre solution le plus grand). Le successeur du dernier chiffre doit être 9, donc ne peut être que 4, car $2 * x + a = 9 \bmod(10)$ $a = 0, 1, 2$ n'a que la solution $x=4$. Les successeurs de 9 ne peuvent être que 8 et 8 (le 9 ayant déjà été utilisé), choisissons 8 dont les successeurs possibles sont 6 et 7, choisissons 7 et ainsi de suite. On construit ainsi un arbre où les branches s'interrompent, soit parce qu'il n'y a pas de successeur possible (car déjà utilisé auparavant) ou que le chiffre 4 ait été atteint prématurément (avant la dixième position). L'arbre ci-dessous est un exemple où les branches mortes sont signalées par un astérisque.

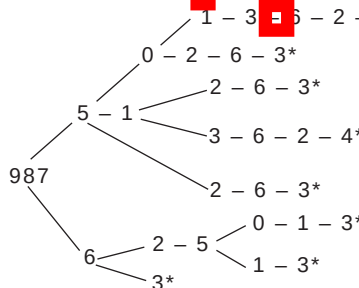
En procédant ainsi, on trouve les six nombres suivants :

886878827
8868788121
9862501374
9026387514
9025138764
9013875264

dont toutes les permutations circulaires
conduisent à 60 nombres solutions, le plus
grand étant 9875012624 et le plus petit
012498637.

Remarque: que leur somme fait 9999999999, mais si souvent le complémentaire à 10 d'un nombre solution est aussi un nombre solution, ce n'est pas toujours le cas (exemple 9025138764). Ces nombres existent dans n'importe quelle autre base et plusieurs lecteurs ont exploré par l'informatique le nombre de solutions selon la base. Ils ont trouvé que le nombre de solutions augmente avec la base beaucoup plus rapidement pour les bases impaires que pour les bases paires.

Jean Jacques ~~qui propose expérimentalement~~ des lois asymptotiques pour le nombre n de solutions selon la parité de la base : B paire $n = B \times 10^{0,13(B-4)}$ et B impair $n = B \times 10^{0,19(B-4)}$. Le problème pourrait d'ailleurs être repris en utilisant une loi de construction du type $kx + a_1$ ou a_2 ou a_3 , et discuté selon le quadruplet k, a_1, a_2, a_3 .





J.-M. Thiriet

Grilles de calcul

GUY WORMSER

La puissance de calcul distribuable comme l'eau ou l'électricité?

Les ordinateurs ont d'abord fonctionné indépendamment, à partir de données locales. Puis, les scientifiques qui avaient besoin d'échanger des volumes considérables de données ont créé le réseau Internet. Partagé ensuite avec l'ensemble des utilisateurs d'ordinateurs, ce nouvel outil bouleversera nos sociétés. Toutefois l'informatique reste limitée par les moyens de calcul, qui sont insuffisants : nous n'avons pas encore de superordinateurs sur nos bureaux. La prochaine (r)évolution en informatique sera-t-elle le passage au «calcul pour tous»?

Les communautés scientifiques rêvent ainsi de ce qu'ils nomment une «grille de calcul» qui s'apparenterait au réseau électrique. Ce dernier fournit à chaque utilisateur toutes les ressources dont il a besoin au moyen d'une interface simplifiée à l'extrême (la prise de courant) et standardisée. Toute la complexité du réseau (de la centrale électrique jusqu'à l'abonné) est complètement cachée à l'abonné, qui peut modifier brusquement sa consommation sans démarche préalable.

Un calcul qui est en projet, puissance de calcul et capacité de stockage seraient quasiment illimités, les ressources de la grille seraient mobilisables en cas de besoin. On pourrait aussi bien utiliser des applications créées localement que partager les ressources disponibles (dans les centres de calcul, dans les laboratoires ou dans les entreprises).

Le projet n'est pas utopique : pour réaliser une grille de calcul, on devra construire des réseaux à très haut débit sur de longues distances et apprendre à gérer le service offert. Ces deux objectifs sont accessibles. Les ressources en matériel — c'est-à-dire la grille (centres de calcul, ordinateurs des laboratoires...) et réseau — existent déjà en grande partie. Il reste à construire les programmes qui feront fonctionner la grille. Cette infrastructure comprend, entre autres, des programmes d'identification et de sécurité, des logiciels d'arbitrage de ressources, de suivi des applications, de garantie de qualité, d'interface utilisateur.

Comment les grilles de calcul modifieront-elles le fonctionnement des socié-

tés industrialisées? La recherche scientifique, tout d'abord, doit traiter des volumes croissants de données, mais n'a plus les moyens de construire les ressources de calcul dont elle a besoin.

Par exemple, au CERN, à Genève, les physiciens des particules commenceront en 2005 une série d'expériences sur le collisionneur à protons LHC (*Large Hadron Collider*), afin d'explorer plus avant les structures intimes de la matière. Ces expériences imposeront l'enregistrement et le stockage de plusieurs dizaines de millions de gigaoctets par an, soit autant d'informations qu'il en est aujourd'hui enregistré sur tous les CD-ROM du monde. Quelles seront les ressources informatiques disponibles dans l'ensemble des laboratoires de physique des particules? Dans le cas de l'observation de la Terre par les satellites scientifiques ou le séquençage du génome humain conduisent à des quantités considérables de données, qui doivent être traitées par de très gros programmes.

La recherche fondamentale est à nouveau le moteur de la prochaine révolution informatique, l'amélioration des performances de calcul profitera inmanquablement au monde industriel et économique : les grosses entreprises, organisées en réseau (banques, EDF...), multiplieront leurs ressources informatiques propres à moindres frais si elles s'équipent d'une grille de calcul interne. Celles qui traitent leurs calculs dans un gros centre d'une centaine de machines bénéficieront de possibilités supérieures si elles mettent ce centre en symbiose avec les nombreux ordinateurs présents dans les agences ou sur les bureaux de leurs employés.

Avec la proposition d'accès à du calcul ou à du stockage, moyennant un kit d'abonnement analogue à celui d'un abonnement à Internet, le marché potentiel serait beaucoup plus vaste. L'introduction massive des ressources informatiques dans les petites et moyennes entreprises conduirait souvent à des gains de productivité importants, en permettant par exemple des simulations détaillées de prototypes avant leur réalisation (souvent très gourmandes en moyen de calcul, de telles simulations

sont souvent inaccessibles, aujourd'hui). La grille absorbera également des pics ponctuels de calcul ou de stockage dépassant de beaucoup les ressources propres de l'entreprise, mais dont la nature occasionnelle ne justifie pas un investissement lourd.

Et comment chacun d'entre nous profitera-t-il des grilles de calcul? Les besoins individuels en calcul semblent couverts par les ordinateurs personnels. Toutefois l'inventivité humaine conduira inévitablement à des applications insoupçonnées : observons le développement d'Internet. En restant dans le domaine des sciences, le parrain

scientifique semble déjà en vogue : en inscrivant son ordinateur personnel sur une grille de calcul et en le mettant à disposition d'un gros calcul, on s'associe à de grandes aventures scientifiques dont on tire intérêt et fierté. Déjà de grands nombres ont été décomposés en facteurs premiers grâce à la coopération de très nombreux ordinateurs.

Les temps morts de leurs ordinateurs personnels, une grille de calcul serait un outil de travail idéal. L'informatique sera beaucoup plus ambitieuse et dynamique ; il pourrait même être un outil d'intégration sociale, en associant des classes d'école, de collèges ou lycées de milieu défavorisé à certains grands projets scientifiques.

Comment réaliser cet outil? Plusieurs consortiums de scientifiques, en Europe et aux États-Unis, se sont formés pour écrire les couches de logiciels manquantes (*middleware*) et tester leurs performances. Cette grande mobilisation et les nombreuses réunions existant entre les projets européens et américains devraient conduire à une grille mondiale d'ici deux ou trois ans. Signalons enfin qu'avec un tel projet on confie à la (haute) technologie le soin de régler les conflits d'intérêt résultant de cette mise en commun de moyens et non plus à la volonté politique, ce qui devrait faciliter bien des choses.

Guy WORMSER est directeur adjoint de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules 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.



La vaccination anti-pestéuse

FABIENNE LEMARCHAND-COPREAUX

A Madagascar, la mise au point d'un vaccin efficace n'a pas signé la victoire contre la peste : il restait encore à vaincre les réticences sociales et politiques des populations indigènes.

Le 25 novembre 1977, l'ancien hôpital colonial de Tananarive, l'Hôpital Girard et Robic, devient l'Hôpital militaire d'Antananarivo. Disparaît ainsi le dernier témoin historique de l'un des grands épisodes de la lutte contre la peste. Georges Girard (*ci-dessus, le deuxième en partant de la gauche*) et Jean-Marie Léopold Robic (*le premier à gauche*), tous deux médecins des troupes coloniales, dirigent l'Institut Pasteur de Tananarive, le premier de 1922 à 1940, le second de 1940 à 1953. C'est là qu'ils mirent au point le premier vaccin à germes vivants atténués contre la peste, qui fut inoculé massivement à près d'un tiers de la population malgache de 1935 à 1959. Ultérieurement, ils établirent un protocole de lutte contre la maladie, aujourd'hui appliqué dans le monde entier.

La peste frappe Madagascar au cours de la pandémie de 1898. À plusieurs reprises, les ports de Tamatave, Majunga, Diégo Suarez, enregistrent, en même temps que ses voisins de l'île Maurice, de La Réunion, et d'Afrique du Sud, de petites flambées de peste bubonique. De

février à avril 1921, la peste importée de Maurice revient à nouveau à Tamatave surtout dans le milieu des dockers et des travailleurs malgaches. Soudain, en juin, la maladie fait une irruption tapageuse dans la capitale : 48 personnes, appartenant à deux familles qui venaient de se marier à l'occasion d'un mariage, succombent en trois semaines à un épisode de peste pulmonaire, la plus contagieuse et la plus foudroyante.

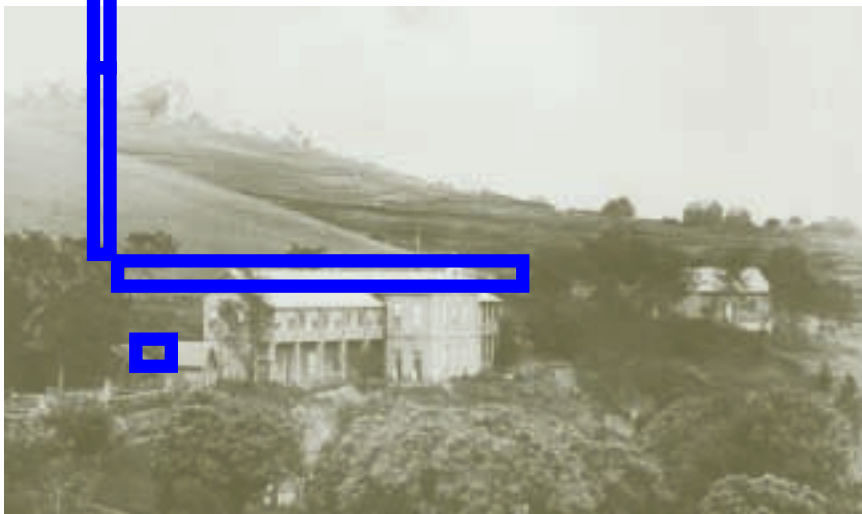
Désormais, l'épidémie galope. Elle gagne en quelques mois l'ensemble des hauts plateaux, où résident plus d'un million d'habitants, soit le tiers environ de la population de la colonie. En six mois, la peste fait 150 victimes. Plus que la grippe espagnole de 1918 qui avait pourtant tué en quelques mois près de 86 500 personnes, dont une trentaine de milliers dans les seules provinces du centre, ou que le paludisme qui endeuille régulièrement les familles, la peste sème l'épouvante chez les Malgaches. D'abord, en raison de son issue, presque toujours fatale, et de la rapidité avec laquelle survient la mort : les malades trépas-

sent en quelques jours ; si 60 à 85 pour cent des cas de peste bubonique sont mortels, la peste pulmonaire l'est dans tous les cas. Ensuite, à cause des dispositions contraignantes, et le plus souvent inefficaces, prises par les autorités sanitaires à l'encontre des seuls indigènes dès l'apparition des premiers cas dans la capitale : isolement des malades et des personnes avec qui ils ont été en contact dans les lazarets, destruction par le feu de leurs maisons, dératization, désinfection des marchandises, cordons sanitaires d'une évidente perméabilité.

Plus que toutes ces mesures, c'est l'interdiction de veiller le mort et de l'inhumer dans le tombeau familial qui traumatise la population. L'inhumation marque en effet le retour du défunt à la terre de ses ancêtres. Ce culte des ancêtres fait des funérailles une cérémonie privilégiée à laquelle participent la famille et les amis, venus parfois de très loin. Le cadavre lui-même est souvent transporté à grande distance. Or la nouvelle réglementation impose que les porteurs soient entraînés à la va-vite dans des *monocores spéciaux*. On interdit aussi, la *visitation* des morts, qui, après quinze ou vingt jours, est obligatoire. Au cours de laquelle le tombeau est ouvert, le cadavre exhumé et enveloppé d'un linceul neuf. Cette façon de renouer contact avec lui s'accorde en effet mal avec les exigences de la prophylaxie.

UNE MALADIE SOUS-DÉCLARÉE

De surcroît, les dispositions sanitaires ne touchent *pas les Européens*. Officiellement, et jusqu'en 1926, année où la première victime européenne est enregistrée, la peste frappe presque exclusivement les Malgaches des quartiers populaires de la capitale et de la brousse. Dans le contexte de la colonisation avec ce qu'elle suppose d'inégalités, d'op-



Photographie fournie par l'Institut Pasteur de Madagascar

L'Institut Pasteur de Tananarive, en 1921.

pression, l'idée d'une maladie «inventée» par l'administration française pour renforcer son ascendant sur les indigènes s'inscrit dans la logique du nombre de Malgaches. D'autant qu'ils assistent à un impressionnant déploiement de forces. Autour des cordons sanitaires, militaires et tirailleurs Sénégalais traquent les fuyards. Des agents de police européens parcourent sans relâche les villes, questionnant les habitants et visitant les maisons, afin de débusquer les malades.

Les Malgaches résistent. Tout est mis en œuvre pour cacher la maladie : absence de déclarations, transfert des malades au loin, inhumations clandestines, dissimulation des rats morts, pots-de-vin aux médecins pour l'obtention de certificats médicaux de complaisance... En réaction, un dépistage *post mortem* est institué dès 1921 : des fragments de foie sont prélevés sur tous les malades décédés en moins de six jours.

C'est dans ce contexte que Georges Girard arrive à Madagascar, en février 1922. Ce jeune médecin militaire, formé à l'École du corps de santé de Bordeaux, est alors âgé de 34 ans. Il vient de passer deux ans à apprendre les gestes et les dogmes de la microbiologie. Il connaît déjà Madagascar. De 1917 à 1920, il avait été responsable du laboratoire de bactériologie de l'Hôpital de Diégo Suarez. Dès son arrivée, il est confronté à la peste : l'Institut Pasteur de Tananarive, créé en 1898 afin de lutter contre la variole et la rage, est chargé de coordonner toutes les actions de lutte. Girard met sur pied le Service central de la peste. Encore imprégné des ravages causés en Mandchourie pendant l'hiver 1910 – 1911 par un épisode de peste pulmonaire qui a fait plus de 100 000 morts en quelques mois, il maintient les mesures de prophylaxie édictées précédemment, les seules susceptibles, à l'époque, de contenir l'épidémie. Néanmoins, il reconnaît qu'il aurait été plus facile d'obtenir la collaboration des Malgaches si les autorités avaient permis, dès 1921, d'exhumer les pestiférés trois ans après le décès. En effet, il considère qu'au bout de trois ans, délai prévu par les textes en vigueur en France, le bacille n'était plus actif. À sa demande, cette mesure sera effectivement édictée, mais seulement neuf ans plus tard, en 1930 ; la durée d'évitement du contact familial sera ensuite ramenée à six mois.

Quoi qu'il en soit, les malgaches comprennent vite qu'il leur faut se débarrasser de la maladie à eu une longue évolution pour échapper au contrôle de la nature du décès ; ou encore qu'il s'agit d'un accident. Devant les indications les plus fantaisistes avancées par les familles, le dépistage *post mortem* est

rapidement rendu obligatoire pour tous les cadavres, sans exception. Sans doute inspiré des méthodes de lutte contre la fièvre jaune, Girard simplifie la technique : aux prélèvements d'organes, assez mal acceptés par les familles, il substitue de simples ponctions, faites à la seringue, du foie, des poumons et des bubons apparents. Afin d'éviter au maximum les fraudes, les ponctions sont faites par des médecins européens et examinées dans des laboratoires régionaux. Le tout est ensuite contrôlé à l'Institut Pasteur de Tananarive. Aucun permis d'inhumer n'est délivré sans que des agents aient procédé aux prélèvements réglementaires.

Ce dépistage systématique révèle que 95 pour cent des cas ne sont connus qu'après décès : la peste est beaucoup plus fréquente que prévu ! C'est surtout vrai en zone rurale, où la plupart des individus meurent sans avoir consulté de médecin. En outre, l'endémie pesteuse sur les hauts plateaux est saisonnière : la poussée épidémique commence aux mois d'octobre et novembre pour s'éteindre en avril, au moment des grosses chaleurs et des pluies. Elle correspond à l'époque où les Malgaches inondent leurs rizières, chassant les rats qui se réfugient dans les maisons. Pendant la saison sèche, entre avril et octobre, les rats regagnent les rizières pour y creuser leurs terriers. L'infection semble alors en sommeil.

En ces années 1920, l'épidémiologie de la peste est encore balbutiante. On connaît le bacille responsable de la maladie, *Yersinia pestis*, identifié par Alexandre Yersin en juin 1894 lors de l'épidémie de Hong Kong. On sait également, grâce aux travaux de Paul Louis Simond, en 1897 qu'une simple piqûre de puce suffit à la

transmettre. La puce est le vecteur qui transporte le bacille de rat à rat, et du rat à l'homme à l'exception de la peste pulmonaire strictement transmise d'homme à homme. Toutefois, on ignore tout de la biologie des puces : le bacille se multiplie-t-il dans l'insecte ? À quel moment acquiert-il sa virulence ? Quelle est la durée pendant laquelle une puce reste infectieuse ? Peut-elle survivre sans se nourrir de sang, hors du pelage protecteur du rat ? Une expérience réalisée en 1934 apporte quelques réponses, notamment sur le rôle de la puce *Xenopsylla cheopis* dans la persistance de l'épidémie pesteuse. Cette année-là, Fernand Estrade, un médecin qui travaille avec Girard, met au point un piège à puces. Il remplit une carotte émincée d'un antiseptique, au centre duquel est insérée une bougie mèche. La carotte est placée dans l'obscurité, dans un environnement où la lumière, les puces sautent et tombent dans la bougie ; elles sont tuées par l'antiseptique qui respecte pour un temps le bacille pesteux, à l'abri dans l'insecte. De telles expériences précisent les liens entre les puces et le bacille.

DU BACILLE, À LA PUCE, AU RAT...

Ainsi *Yersinia pestis* survit dans la puce «libre» : elle ne pullule pas seulement dans le pelage des rats, mais aussi dans la poussière des cases et dans les débris de pilonnage du riz. Elle y conserve pendant plusieurs mois son caractère infectieux. Les médecins comprennent alors certains épisodes récurrents de peste. Sur la côte, la température est trop élevée et défavorable à cette puce qui est absente des cases. C'est pourquoi la peste humaine reste implantée sur les hauts plateaux où les températures (10 à 25 °C) et la forte humidité sont favorables aux puces, tandis qu'elle ne fait que de brèves apparitions dans les régions côtières.

Ce constat pose un problème d'hygiène. Selon Girard, «Le problème de la prophylaxie collective sera impossible à résoudre tant que les habitations des paysans resteront ce qu'elles sont actuellement : un véritable défi à l'hygiène élémentaire ; construites en terre, abritant autant d'animaux que d'humains, remplies de provisions [...] qui offrent un refuge d'élection aux *Xenopsylla cheopis*, ces cases ne sont pas pratiquement désinfectables. Les rats y creusent aisément des terriers et il n'est pas jusqu'à la toiture en chaume qui n'abrite des rats et des puces [...]». L'action des services d'hygiène est à peu près inopérante dans les zones rurales». Comment dératiser et désinfecter toute



Les maisons des personnes décédées de la peste étaient détruites par le feu.

La peste aujourd'hui

Aujourd'hui, on sait que la peste résulte de l'inoculation par une puce d'un bacille, *Yersinia pestis*, qui envahit les différents organes et le sang de son hôte. Les rongeurs assurent à la fois sa conservation et sa dispersion : à la mort d'un rongeur infecté, ses puces se répandent dans la nature, guettant un nouvel hôte, rongeur ou homme. À Madagascar, deux espèces de puces jouent ce rôle de vecteur pour le bacille : *Xenopsylla cheopis*, essentiellement urbaine, et *Synopsyllus fonquerniei*, rurale.

Les bacilles régurgités par la puce lors d'une piqure, se multiplient dans le tube digestif du rat et forment un caillot qui l'obstrue. Lorsque le rongeur meurt, la puce colonise un nouvel hôte humain, le pique et régurgite les bacilles au point de la piqure. L'homme a alors une peste bubonique qui se traduit par une forte fièvre, des maux de

tête, des troubles nerveux, et un signe très caractéristique, le bubon. Il s'agit d'une tuméfaction lymphatique le plus proche du point de piqure (en général à l'aîne, sous l'aisselle ou dans le cou). De ce ganglion, le bacille diffuse dans l'organisme par le sang, envahit le foie, la rate et les poumons ; c'est alors la peste pulmonaire secondaire. En l'absence de traitement antibiotique adapté, l'issue est fatale. En toussant, un malade atteint de peste pulmonaire secondaire émet des aérosols infectés qui peuvent être inhaled par d'autres personnes. La transmission se fait alors directement d'homme à homme. Cette forme dite peste pulmonaire primitive, est particulièrement redoutable : le temps d'incubation est court, la mort peut survenir en quelques heures.

vent le produit entre septembre 1933 et le début de l'année 1934.

Confiants, les deux Pastoriens veulent généraliser les vaccinations. Une dernière opération est montée entre le 8 octobre 1934 et le 10 mai 1935, dans les environs de Tananarive : 46 879 indigènes sont vaccinés. Cette campagne n'est pas une mince affaire : le district compte en effet 16 cantons, soit 1 555 villages éparpillés sur une surface grande comme deux départements français. Les habitants, recensés préalablement par village et par famille, sont envoyés sur l'un des 46 centres installés, le plus souvent, sous des tentes. Deux fois par semaine, une liaison automobile est établie avec l'Institut Pasteur ; elle délivre les vaccins et le matériel nécessaires aux inoculations et apporte la glace pour les glaciers où l'insuline est conservée jusqu'à l'emploi, comme test de la sensibilité à la chaleur. Les germes périssent vite : on ne peut conserver un vaccin plus de 10 jours. Les médecins européens effectuent jusqu'à 1 500 injections par jour !

UN VACCIN EFFICACE, MAIS TEMPORAIRE

Afin d'éviter toute confusion entre les personnes vaccinées et non vaccinées, l'identité de chacun est contrôlée. Une carte leur est remise qui offre certains avantages. Elle permet, en cas de maladie ou de contact avec un pesteux, d'éviter le contact, et elle laisse à la famille le soin d'inhumer les pesteux vaccinés dans le tombeau familial (à l'exception des cas de peste pulmonaire). Les vaccinations se terminent le 20 décembre. Réactions et doléances sont consignées. Puis, pendant les cinq mois qui suivent, médecins et infirmiers malgaches contrôlent tous les décès et ponctionnent foies et poumons. On constate que la mortalité par peste a été réduite d'un peu plus des deux tiers chez les vaccinés par rapport aux témoins. Seule ombre au tableau : le vaccin ne protège que durant neuf mois et il n'est l'aucune efficacité sur la peste pulmonaire.

La période des essais est définitivement close, celle de la vaccination de masse commence et, avec elle, les réticences de la population s'accroissent. En 1936, les autorités coloniales ne parviennent plus à persuader la population malgache des bienfaits du nouveau vaccin. Pour l'imposer, elles recourent à la contrainte et à la répression : au cours de la

la brousse, malgache et ses habitations éparpillées ?

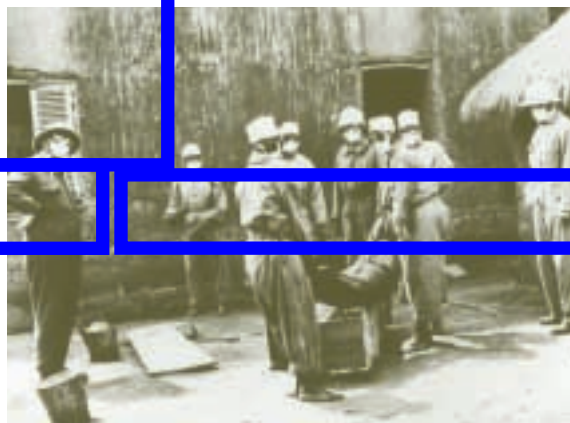
Face à l'impossibilité de lutter efficacement contre le vecteur du bacille, la vaccination apparaît la seule protection envisageable pour les populations rurales, les plus exposées. Dans la capitale, la lutte contre les rats, des travaux d'assainissement dans les quartiers insalubres, les mesures d'assainissement ont eu un effet bénéfique, mais, en brousse, ces mesures sont illusores. La vaccination est donc rendue obligatoire sur les hauts plateaux en 1926. De grandes campagnes sont organisées : plusieurs centaines de milliers de personnes sont vaccinées avec un produit sans efficacité.

Georges Girard est persuadé qu'un vaccin à base de germes vivants de virulence atténuée serait plus actif. Le principe a déjà fait ses preuves avec le tout nouveau BCG contre la tuberculose. Alexandre Yersin, en 1899, avait lui-même montré l'efficacité de cette méthode. Il poursuivait ses travaux en Chine où la peste sévissait à l'état épidémique. En repiquant des colonies isolées de vieilles cultures de bacille pesteux, il avait, après de longs tâtonnements, obtenu un bacille qui tuait plus que 20 pour cent des rats musqués et protégeait les autres. Il l'expérimenta sur des singes, mais l'expérience tourna court, et il n'eut pas l'occasion de tester son vaccin... que sur lui-même. Toutefois, on jugeait ce mode de vaccination trop risqué.

En 1926, Girard accueille son nouvel adjoint, Jean-Marie Léopold Robic lui aussi formé à l'École du

corps de santé des colonies de Bordeaux. Cette même année, ils isolent sur un jeune malade une souche dite EV. Chaque mois, pendant six ans, ils la repiquent sur gélose de façon à atténuer son pouvoir pathogène. Le succès est au rendez-vous : la souche est inoffensive pour les animaux sensibles et elle est immunisante.

En 1932, Girard et Robic passent à « l'expérimentation humaine ». Ils s'inoculent le vaccin contenant 500 millions à 1 milliard de germes. Quelques lépreux reçoivent la préparation. Au début de 1933, Girard se rend à Paris pour soumettre ses travaux à l'Institut Pasteur et à son directeur, Émile Roux. De janvier à mars 1933, 1600 vaccinations sont pratiquées. Une légère tuméfaction locale et un peu de fièvre sont les seules réactions. Le gouverneur général de la colonie autorise alors les deux médecins à intervenir en zone infectée : 13 000 personnes reçoivent



Des équipes de fossoyeurs masqués étaient chargées d'envelopper le corps des défunts dans un linceul imprégné de désinfectant et de les mettre en bière entre deux lits de chaux.

campagne de 1935-1936, 714 000 personnes (plus de 75 pour cent de la population des provinces centrales) sont vaccinées. L'année suivante, les autorités sanitaires parviennent à vacciner 639 000 personnes mais ils se plaignent de l'hostilité qu'ils rencontrent.

La peste est devenue, au fil des ans, un thème de propagande pour les nationalistes et, au cours de l'année 1936, année d'intense agitation politique et sociale, les leaders politiques se font plus virulents.

Le système colonial fondé sur la discrimination, l'illégalité et l'oppression, se met en cause la politique médicale, incapable de venir à bout du fléau. L'impérialisme français vacille : il est accusé d'entretenir à dessein une « peste politique et raciste ».

LA PESTE, UN ARGUMENT ANTICOLONIALISTE

Raciste, la peste l'est assurément puisqu'elle ne frappe que les indigènes... Ces attaques trouvent un écho favorable auprès d'une population échaudée par l'échec durant de plus de dix années de vaccination obligatoire. La peste est également politique : elle ferait partie d'un ensemble de dispositions destinées à exterminer les Malgaches, en particulier les plus pauvres. La presse se déchaîne. Non contents de lancer cette campagne de presse, les leaders nationalistes parcourent le pays pour inciter les populations à la résistance. Le personnel chargé des vaccinations est souvent précédé dans ses tournées par des trublions qui distribuent des tracts et tiennent des discours dissuasifs. En septembre 1936, le médecin chargé des vaccinations se plaint à l'administrateur supérieur de Tananarive : « Les personnes ne se sont présentées à la séance de vaccination d'Ambohidrapeto contre 200 l'année précédente. Il déclare : « quatre communistes notoires, la veille du jour où je devais opérer, ont alerté la population en déclarant à la foule qu'on allait sous prétexte de la vacciner, leur enfoncer une aiguille dans le ventre et les tuer. »

Pour la campagne 1936-1937, administrateurs et médecins mettent tout en œuvre pour contrecarrer la propagande des nationalistes et faire accepter le vaccin. Les plus hautes instances donnent l'exemple et se font vacciner. Des affiches sont placardées un peu partout. Des conférences sanitaires rappellent la vocation bienfaitrice et non criminelle des colonisateurs. Rien n'y fait. Dans la capitale et



Dans les centres de vaccination, on enseignait les modes de transmission de la peste ; face aux attaques répétées des nationalistes, les scientifiques ont dû apprendre à communiquer.

les localités atteintes par la propagande communiste, les centres de vaccination sont désemparés. Des agents recruteurs et des militaires sont alors déployés dans les villages pour conduire les habitants un à un sur le lieu de vaccination.

Progressivement, l'attitude des Malgaches évolue. D'abord en raison de l'efficacité avérée du vaccin, mais aussi des changements politiques : l'agitation nationaliste s'apaise. À la veille de la Seconde Guerre mondiale, la peste n'a certes pas disparu mais le thème de la « politique pesteuse » est plus de mise. Les règlements sanitaires ont été adoucis.

Entre 1936 et 1960, quelque 10 millions de doses vaccinales sont administrées. Le résultat est spectaculaire : de 1932 à 1934, plus de 3 500 cas par an sont enregistrés ; en 1937, après la première campagne de vaccination, ils ne sont plus que 1 500 et l'année suivante, 600. Dès 1939, le nombre de cas oscille entre 200 et 300. L'amélioration se poursuit régulièrement, grâce à deux découvertes : en 1939, quatre pasteuriens, Jacques et Thérèse Tréfoeuil, François Nitti et Daniel Bovet découvrent les sulfamides, très efficaces dans le traitement des formes buboniques et dans la prophylaxie des contacts. En 1946, la découverte de la streptomycine transforme radicalement le traitement de la peste. Quelques mois plus tard, l'antibiotique est utilisé par Fernand Estrade pour traiter et guérir un cas de peste pulmonaire. Les protocoles thérapeutiques expérimentés à Madagascar associant sulfamides et streptomycine seront adoptés deux ans plus tard dans tous les hôpitaux du monde, faisant tomber la mortalité par peste aux alentours de cinq pour cent. L'apparition, en 1949, des premiers insecticides (notamment du DDT) facilitera encore la lutte.

En 1960, alors que la Grande Île recouvre son indépendance, Edouard Brygoo, qui a remplacé Robic à la tête de

l'Institut Pasteur préconise l'arrêt des campagnes de vaccination, devenues très coûteuses et superflues : « Au cours des dernières années, l'application de la vaccination n'était plus que la caricature de celle qui avait fait la preuve de son efficacité. »

Alors que le taux minimum de présence exigé (et obtenu) était avant guerre de 90 pour cent, il était tombé à une moyenne très inférieure à 50 pour cent. » En fait, la maladie ne touche plus qu'une centaine de personnes par an grâce à l'existence d'un traitement antibiotique efficace et des insecticides. Il ne s'agit pas d'arrêter la propagation de maladies purement humaines, notamment de la grippe, du choléra, de la diphtérie, de la poliomyélite, en vaccinant 70 pour cent de la population, la peste reste au premier rang des maladies du rat : en ne s'attaquant pas au réservoir du bacille, la vaccination n'est qu'un moyen palliatif et temporaire de protection.

Le vaccin EV eut une carrière internationale : il a été appliqué en Argentine, au Congo belge, au Brésil, en Afrique occidentale française et en Tunisie. Il a été également fabriqué et utilisé au Viêt Nam jusqu'à la fin des années 1980, et continue de l'être au Kazakhstan, en Asie Centrale, dans de petits villages isolés où persistent quelques foyers naturels de peste humaine. Il est peu probable que ce vaccin soit réutilisé dans le futur : la protection est de courte durée et n'est pas totale. De plus, les effets secondaires ne sont pas négligeables (douleurs et tuméfaction locales, fièvre). Néanmoins il est toujours conservé à l'Institut Pasteur de Madagascar où il sert lors des expériences d'infection animale.

La lutte contre la peste n'est toujours pas gagnée. Depuis une vingtaine d'années, la maladie se réinstalle lentement, mais inéluctablement, dans de nombreux pays en développement, y compris à Madagascar. La dégradation de l'hygiène urbaine, l'augmentation croissante de la résistance des puces aux insecticides, la diminution des services de lutte, l'apparition d'une souche de *Yersinia pestis* multirésistante aux antibiotiques préparent une situation potentiellement explosive.

Fabienne LEMARCHAND-COPREAUX, journaliste scientifique, a écrit cet article en collaboration avec Noelson RASOLOFONIRINA, Briand RANDRIARIMANGA et Suzanne CHANTEAU, de l'Institut Pasteur de Madagascar.



De l'herbe au fromage

HERVÉ THIS

L'alimentation des animaux détermine la qualité des fromages.

Le terroir... Depuis quelques années, les producteurs de produits alimentaires n'ont que ce mot à la bouche, souvent pour protéger ou développer leurs marchés : il existerait une relation privilégiée entre des régions et des mets, et aucune copie produite ailleurs ne vaudrait l'original, qui, de ce fait, devrait être seul à mériter une appellation d'origine.

En matière de vins, l'agronomie a effectivement mis en évidence l'effet des climats, des sols, des expositions... mais le cas des fromages semblait plus délicat. En relation avec l'ensemble des filières fromagères des Alpes du Nord et du Massif central, Jean-Baptiste Coulon et ses collègues de la Station INRA de Clermont-Ferrand ont soigneusement analysé les raisons de ces différences.

Plusieurs fromages ; ils ont éclairé les relations entre le terroir et la qualité des fromages... et ils proposent des critères objectifs de définition des appellations d'origine contrôlée.

Pourquoi un fromage est-il bon ? La typicité peut provenir de la région, des types d'animaux qui donnent le lait et des individus qui confectionnent le fromage. Pour une raison inconnue, les producteurs qui évoquent le terroir soulignent surtout l'importance de l'environnement des vaches et, notamment, de leur alimentation : herbe verte, foin, ensilage (herbe stockée humide, qui fermente en silo)... Cette alimentation détermine-t-elle vraiment la qualité des fromages ?

Les premières explorations de cette question, effectuées en 1990 sur le gruyère du Comté, avaient porté sur 20 fromageries et montré une correspondance significative entre le goût du fromage et la localisation géographique des aires de production. Autrement dit, on peut donner une définition objective de la notion de cru en Comté. Puis, en Suisse, des analyses des composés volatils de gruyères ont montré que les fromages d'alpages se distinguent de ceux de plaine : des molécules odorantes de la classe des terpènes (limonène, pinène, nérol), par exemple, sont présentes en

quantités bien supérieures dans les fromages d'alpage. Pourquoi ces variations ? Les agronomes supposèrent qu'elles provenaient de différences de végétation.

Toutefois, dans les premières études, les méthodes de production et les caractéristiques des animaux n'avaient pas été prises en compte : les différences animales étaient gommées. L'environnement, le type des vaches ou de fabrication ? Autrement dit, aurait-on obtenu du lait du même type d'alpage en reprenant, en plaine, les vaches ou les méthodes de fabrication d'alpage ?

J.-B. Coulon et ses collègues ont étudié ces questions dans le cas du Reblochon. Sur des

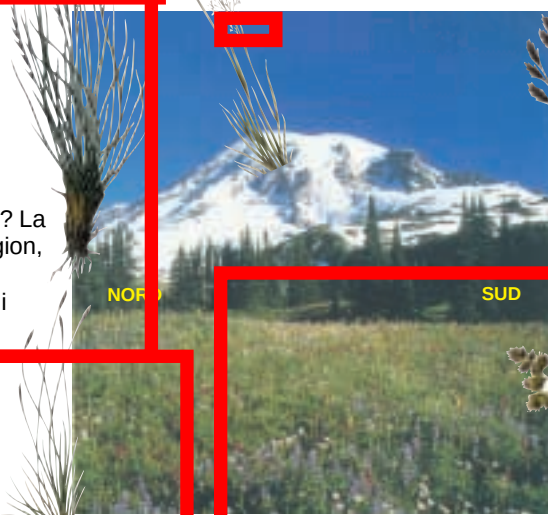
plus brièvement, et leur goût est plus intense, plus fruité, plus piquant.

Les différences sensorielles entre fromages peuvent provenir directement de molécules présentes dans les fourrages des vaches. C'est le cas du carotène, qui est présent dans les végétaux et qui donne aux fromages leur couleur. Ensuite, la consommation de certaines plantes considérées comme sub-toxiques (telles que *Ranunculus* ou *Caltha palustris*, qui semblent d'ailleurs présentes dans les pâturages) modifierait la perméabilité cellulaire du tissu mammaire et favoriserait le passage dans le lait de certaines molécules.

Enfin, les micro-organismes typiques des pâturages ont une influence notable sur les caractéristiques des fromages, mais cela reste à démontrer.

Enfin, des études plus récentes ont examiné le cas de l'ensilage qui, dans certaines régions, est utilisé (il ferait des fromages médiocres). Cette fois, l'étude a porté sur plus de 20 fermes qui produisaient des Saint-Nectaire fermiers au lait cru de qualité reconnue. Plus de 60 fromages ont été analysés, par des études sensorielles (un jury évaluait le goût, l'odeur et la texture).

On a ainsi découvert que les principales différences résultent des méthodes de fabrication et de l'alimentation des vaches : le mode de conservation des fourrages n'est pas déterminant dans les caractéristiques des fromages. Notamment, les rations à base de foin ne conduisent pas toujours à un fromage différent de ceux qui sont fabriqués à partir de lait de vache recevant une ration à base d'ensilage : lorsqu'elle est mal faite, la conservation des fourrages n'a qu'un effet limité sur les caractéristiques du fromage, en dehors de sa couleur.



échantillons prélevés chez plusieurs producteurs, ils ont montré qu'à techniques de fabrication comparables, les caractéristiques de l'alimentation des vaches déterminent les caractéristiques sensorielles du Reblochon. Puis ils ont poursuivi leurs travaux en montrant que des vaches placées dans deux quartiers d'un même alpage, mais l'un sur un versant Nord, où domine *Dactylis glomerata* et *Festuca rubra*, et l'autre sur un versant Sud, avec des pelouses maigres à *Agrostis vulgaris* et *Nardus stricta*, ou peu productives (mousses et *Carex davalliana*), donnent des fromages qui diffèrent notablement par le goût et par la couleur : les fromages des quartiers Sud sont moins jaunes et

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 26 juillet 2000, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

L'obsidienne cachée

...ou comment Murillo a peint deux œuvres sur une pierre rare.

Le visiteur du Musée du Louvre ne peut manquer de s'interroger devant deux tableaux de Bartolomé Esteban Murillo (1618-1682) : quel est ce noir lisse et irisé qui compose le support laissé au du *Christ au jardin des oliviers* et du *Christ à la colonne* ?

Les historiens d'art ont d'abord pensé que les deux tableaux, conservés au Louvre depuis 1785, quand Louis XVI a acheté la collection du comte de Vaudreuil, étaient peints sur une pierre noire. Puis certains y ont vu du jaspé noir (une roche sédimentaire siliceuse) ou du marbre noir (une roche calcaire). Olivier Meslay, le conservateur des œuvres espagnoles du Musée du Louvre, et Éric Gonthier, du Muséum national d'histoire naturelle, ont découvert qu'il s'agit d'obsidienne, une roche vitreuse et rare qui résulte d'épanchements magmatiques de minéraux siliceux en fusion.

Quels indices ont permis l'identification d'une telle roche ? Le marbre noir est une roche composée de micro-cristaux,

ses cassures sont rugueuses et le grain gros. Or le support des deux tableaux n'est pas ainsi. En revanche, le revers du *Christ au jardin des oliviers* montre des cassures en forme de coquille, typiques de l'obsidienne : cette roche, amorphe, est dépourvue d'une structure cristalline qui orienterait les cassures. Dues au débitage de la pierre, celles qui apparaissent au dos du tableau sont visibles au travers d'une gangue d'un minéral proche de la pyrite, qui confirme l'origine volcanique de la pierre.

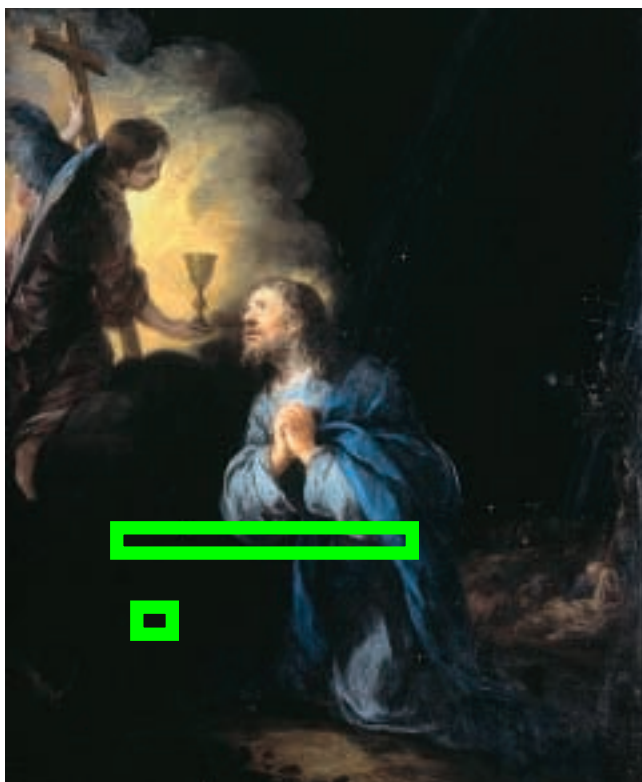
De plus, l'obsidienne renferme parfois, à sa surface, des bulles d'air minuscules et des fragments de minéraux variés : ces inclusions sont à l'origine des reflets irisés de l'obsidienne. On aperçoit dans un pli du tableau au bleu du *Christ au jardin des oliviers* une traînée de bulles que l'artiste a laissée apparente.

Enfin, en 1978, Murillo a peint sur deux blocs exceptionnels d'obsidienne d'environ deux à trois kilogrammes chacun et d'environ 30 centimètres de côté. D'où proviennent-ils ? Selon François Gendron, du Musée de l'Homme, il s'agit de deux miroirs divinatoires aztèques fabriqués au XV^e ou au XVI^e siècle, ou encore à l'époque de l'invasion espagnole menée par Hernan Cortés (1485-1547). Auparavant,

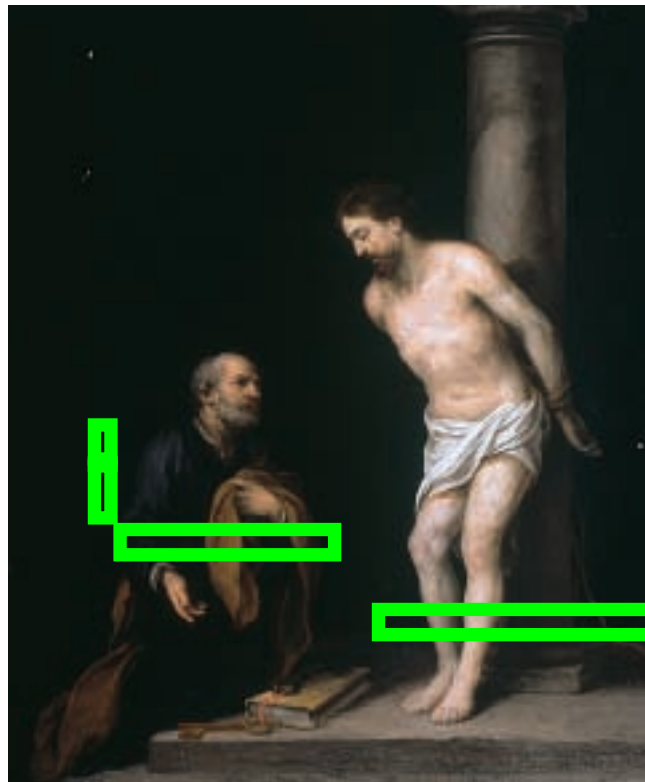
les miroirs étaient constitués de plaquettes de pyrite cimentées sur une ardoise.

La tradition des miroirs en Mésopotamie remonte à la première civilisation de la région, les Sumeriens. Ainsi plusieurs miroirs mégalithiques (en ilménite, en hématite et en hématite), datés de 750 à 400 ans avant notre ère, ont été découverts sur les sites de La Vache, au Mexique. Cette tradition s'est perpétuée au fil des civilisations, et les miroirs sont devenus des objets divinatoires chez les Aztèques. Selon une légende, quelques années avant la conquête hispanique en 1519, l'empereur aztèque Moctezuma II a vu la chute de sa civilisation dans un miroir situé... sur le front d'une grue cendrée capturée par un chasseur.

Séjour au lieu de résidence de Murillo, était le premier port d'échange avec les Amériques : le peintre, déjà habitué à des supports originaux tels le cuir ou le bois, s'est donc sans doute vu confier ces deux blocs précieux. Comme ils étaient très lisses, Murillo a utilisé de la bile de bœuf pour mordre en surface l'obsidienne et faire ainsi accrocher la peinture. Cependant, il a laissé intacte la pierre autour des personnages, pour le plus grand plaisir des amateurs d'art, mais aussi, aujourd'hui, des minéralogistes.



Le Christ au jardin des oliviers.



Le Christ à la colonne.

Mâles trompes

Des chimistes créent des molécules qui perturbent le comportement des papillons et protègent les cultures.

Au printemps, dans les cultures maraîchères et horticoles, les noctuelles potagères (*Mamestra brassicae*), des papillons nocturnes, rejouent l'éternel épisode de la reproduction : les femelles libèrent une substance olfactive, nommée phéromone, qui attire les mâles, parfois distants de plusieurs centaines de mètres, et qui les guide vers leur promise. Hélas, par leur appétit, les chenilles qui naissent de cette union nuisent aux cultures, et les exploitants, peu sensibles au romantisme, s'ingénient à se débarrasser de ces insectes.

Pour leur venir en aide, les équipes d'Angel Guerrero, du Conseil supérieur d'investigations scientifiques (CSIC) de Barcelone et de Michel Renou, de la Station INRA de Versailles, ont mis au point des paraphéromones, c'est-à-dire des substances proches des phéromones de ces papillons, qui désorientent les mâles.

Comment fonctionnent les phéromones naturelles ? La femelle qui décide d'attirer un mâle libère ces molécules volatiles que le vent transporte. Au gré des courants d'air se forme ainsi un panache de phéromones dont la concentration diminue avec la distance à la femelle. Lorsque ces molécules entrent en contact avec l'antenne d'un mâle, elles pénètrent par des pores à l'inté-

rieur de poils sensitifs nommés sensilles. Là, dans une liqueur sensillaire, elles se fixent à des protéines qui les véhiculent au cœur de la sensille. Les complexes phéromone-protéine se lient alors aux sites récepteurs des neurones olfactifs. L'influx nerveux déclenché renseigne l'insecte sur ses désirs d'une femelle éloignée. Enfin, le complexe se dissocie et une enzyme dégrade la phéromone : la protéine est de nouveau disponible pour véhiculer une nouvelle molécule. Ces réactions ont duré quelques millièmes de seconde.

Par l'odeur alléché, le mâle entreprend de remonter le panache de phéromones jusqu'à sa belle. En détectant les variations de concentration de phéromones dans l'air, il ajuste en permanence sa direction.

La plupart des phéromones sont de longues chaînes de carbone (entre 10 et 20) dont l'extrémité porte un groupe chimique nommé acétate ($-COCH_3$). Les chimistes du CSIC ont remplacé le groupe acétate du principal constituant de la phéromone des noctuelles potagères par un groupe trifluorométhylcétone. Ces molécules artificielles sont substituées aux atomes d'hydrogène de l'acétate. Les paraphéromones de synthèse sont reconnues par les protéines de la liqueur sensillaire, mais ne déclenchent pas la stimulation du neurone sensoriel. La détection de la phéromone est ainsi bloquée et le mâle ne peut plus s'orienter : il manque son rendez-vous (voir la figure).

Placées dans des diffuseurs, ces paraphéromones complèteraient et renforceraient l'emploi de phéromones naturelles dans les stratégies de lutte par confusion sexuelle.

BRÈVES

L'âge des clones

Quant la brebis clonée Dolly est née, les biologistes ont craint qu'elle soit fausement jeune, parce que les extrémités de ses chromosomes, les télomères, semblaient anormalement courtes, comme chez les animaux âgés.

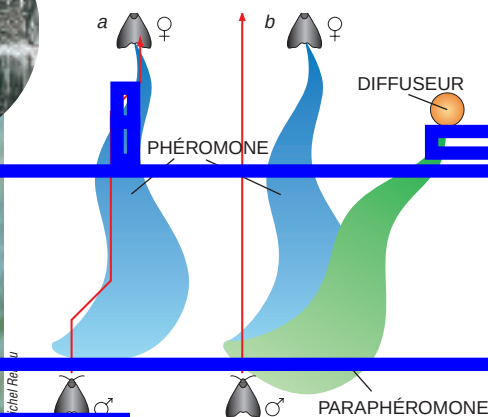
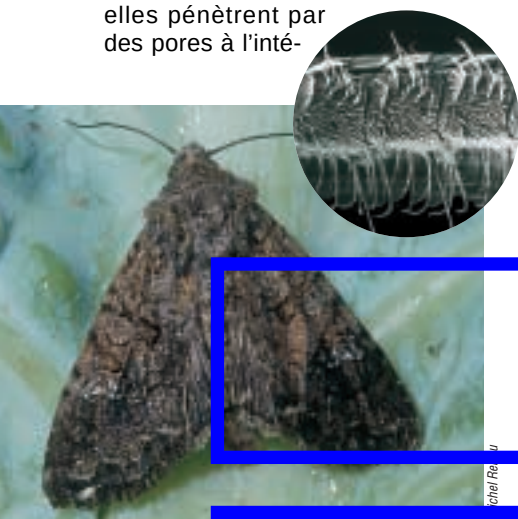
Lanzetta et son collègue de la Société Advanced Cell Technology ont montré que des bovins clonés avaient, au contraire, des télomères plus longs que la normale, et que leurs cellules se divisaient plus que des cellules normales, dans des cultures.

Des fils très solides

Souvent, dans les scénarios de conquête spatiale, les ingénieurs imaginent l'utilisation de câbles très fins et très résistants, constitués de nanotubes de carbone. Ces câbles pourraient, telles des frondes géantes, envoyer des charges en orbite ou servirait dans de gigantesques ascenseurs. Comment caractériser leur résistance ? Des physiciens ont récemment mesuré expérimentalement, ou théoriquement. Toutefois une équipe de physiciens vient de mesurer la résistance d'une corde tressée avec des centaines de nanotubes, et en a déduit la résistance par nanotube : elle est dix fois supérieure à la résistance de l'acier ou des fibres de carbone.

Par Bering et Panama...

On a découvert des mollusques qui vivaient dans l'océan Pacifique Nord il y a 36 millions d'années. Or leurs ancêtres ont aussi habité l'Atlantique Nord. Selon une équipe américaine, ils auraient migré de l'Atlantique Nord vers le Pacifique par le détroit de Bering, alors ouvert. Par ailleurs, on trouve, dans l'Atlantique Nord, des fossiles (3,6 millions d'années) de mollusques du Pacifique Nord. À cette époque, l'isthme de Panama était déjà formé : on en déduit que les mollusques du Pacifique sont remontés vers le Nord, entraînés par un courant contraire à celui qui avait apporté les mollusques de l'Atlantique. Diverses espèces marines ont migré entre les deux océans au gré des mouvements tectoniques.



La noctuelle potagère (*Mamestra brassicae*) est un papillon nocturne (à gauche) dont les chenilles ravagent les cultures maraîchères. La femelle attire le mâle par des substances volatiles nommées phéromones qu'il détecte par les poils, ou sensilles, de ses antennes (au centre, en haut). Les phéromones forment un panache (en bleu) où la concentration diminue à mesure que l'on s'éloigne de la femelle. Sensible aux variations de concentration, le mâle rejoint la femelle (a). Exposé à des paraphéromones, c'est-à-dire à des molécules proches des phéromones naturelles (en vert), libérées par un diffuseur (en orange), un mâle ne perçoit plus les variations de concentrations : il manque son rendez-vous avec la femelle (b).

Moustiques et femmes enceintes

Une étude réalisée en Gambie sur 72 femmes, dont 36 enceintes, montre que ces dernières attirent deux fois plus les moustiques que les autres, à cause des modifications physiologiques et comportementales qui accompagnent leur nouveau statut. Les moustiques ne sont pas les seuls à être attirés par la chaleur. La température de son abdomen augmente de 0,7°C, de sorte que sa peau dégage plus de substances volatiles. Les moustiques les repèrent plus facilement. Les femmes enceintes doivent redoubler de vigilance vis-à-vis des moustiques, vecteurs du paludisme dans cette région.

Le champ de la vie

Alors que les molécules chimiques peuvent exister en deux variétés, images l'une de l'autre dans un miroir, les molécules de la vie existent uniquement en une variété. Quel mécanisme a-t-il favorisé ou engendré cette sélection? Au Laboratoire des champs magnétiques intenses de Grenoble, des physiciens ont réalisé une réaction chimique où l'une de ces deux variétés était produite en plus grande quantité que l'autre. On a vu d'un champ magnétique terrestre à la lumière. Ainsi, à une époque de l'histoire de la vie, le champ magnétique aurait pu influencer sur la production des molécules de la vie. Cette découverte relance le débat sur l'origine de la vie. Le champ magnétique terrestre a-t-il été suffisamment important pour favoriser l'émergence de ces molécules?

Défi à la pesanteur

Le gecko est un lézard tropical qui fait mieux que Spiderman : il marche sur les murs et les plafonds, la tête en bas, aussi facilement que nous marchons sur le sol. Son secret? Ses coussinets plantaires comportent des rangées de poils minuscules, ramifiés, composés de kératine, la même protéine que celle des cheveux humains ou des plumes des oiseaux. Une équipe de l'Université de Californie, par microscopie à force atomique, les forces que ces poils exercent sur les surfaces contre lesquelles ils se collent. Cette adhérence est due à des forces dites de Van der Waals, et la bonne adhérence résulte de la ramification des poils, les divers segments qui les constituent s'alignant parallèlement au support.

Les problèmes du XXI^e siècle

L'auditoire du Collège de France, un concentré de talents mathématiques, plus le Ministre de la Recherche, célébraient le 24 mai, la centenaire des problèmes posés par le mathématicien David Hilbert au Congrès des mathématiciens de Paris. La commémoration était solennelle et les participants étaient émus d'entendre la profession de foi de Hilbert «...Il n'y a pas d'ignorabimus en mathématiques, nous devons savoir tout ce que nous pouvons, depuis devenu célèbre. Hilbert (*en médaillon*) se trompait, car il a été démontré qu'il existe des propositions indécidables en mathématiques. Il aurait répondu que savoir que l'on ne pourra pas tout savoir est quand même savoir.

Les 23 problèmes posés par Hilbert ont inspiré et guidé les mathématiciens durant tout le XX^e siècle. Douze ont été résolus, huit étaient assez généraux pour qu'ils soient encore des sujets d'intérêt, et une des questions non résolues, l'hypothèse de Riemann, reste le plus important problème ouvert des mathématiques. Hilbert avait dit que s'il se réveillait après plusieurs millénaires de sommeil, la première chose qu'il demanderait est : la conjecture de Riemann a-t-elle été démontrée?

Cette hypothèse est l'un des sept problèmes que les conseillers mathématiciens de l'Institut de mathématiques fondé par Landon Clay ont choisi de poser pour célébrer le nouveau millénaire. Tout mathématicien qui résoudra l'un de ces problèmes sera récompensé par un prix d'un million de dollars.

La traction des prix à sujet imposé avait presque disparu, et c'était dommage car certains d'entre eux ont, par le passé, notablement contribué à l'avancement des mathématiques. Ainsi, le prix du roi Oscar de Suède, à la fin du XIX^e siècle, a vu le succès des idées de Poincaré sur le problème des trois corps en interaction gravitationnelle, problème qui a inspiré de nombreux continuateurs de Poincaré. Les idées mathématiques avancées par Poincaré restent d'actualité : une de ses conjectures est encore ouverte et constitue l'un des prix Clay. Notons que, signe

des temps, un généreux industriel a remplacé un royal mécène.

On a quelquefois opposé les mathématiciens qui résolvent des problèmes à ceux qui construisent des théories, les découvreurs aux inventeurs de mathématiques. Ainsi Alexandre Grothendieck est renommé pour être un *theory builder* et son élève Pierre Deligne un *problem-solver*. Michael Atiyah, médaille Fields, comme ces deux mathématiciens illustre la différence en expliquant qu'il faut franchir une «vallée mathématique» qu'il faut franchir. Grothendieck construit des strates de théories jusqu'à ce que la vallée soit comblée par les connaissances, tandis que Deligne passe au pont à travers la vallée. La métaphore est saisissante ; toutefois, pour résoudre les problèmes, il faut des théories sur lesquelles s'appuyer.

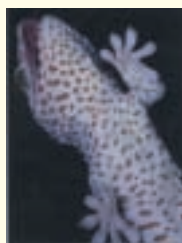


payent et ces théories progressent par l'effort commun de la communauté mathématique. Alain Connes pense que les théories nécessaires à la résolution des problèmes posés embelliront le paysage mathématique.

Les mathématiciens ne se préoccupent, comme d'ailleurs nombre de scientifiques, que de ce qui les intéresse.

Parmi les théorèmes démontrés, la société reconnaîtra les siens, c'est-à-dire ceux qui sont utiles, mais les mathématiciens se targuent de leur incapacité à identifier, positivement ou négativement, les parties inutiles des mathématiques. Leur «égoïsme» produit un non-sens à un grand intérêt social par un miracle que nul n'explique, les préoccupations d'intellectuels qui n'ont rien à voir avec la réalité féconde des sciences. Et les grandes civilisations ont toutes encouragé les mathématiques qui contribuent à leur pérennité glorieuse : les Grecs sont renommés pour leur culture et non pour leur réussite économique.

Le congrès de 1900 réunissait 226 mathématiciens seulement, alors que, dans un congrès de mathématiques annuel aux États Unis, plus de 6000 mathématiciens sont représentés. En 1900, l'intégralité du savoir mathématique tenait dans 30 volumes, il en faudrait 10 fois plus aujourd'hui... Alors pourquoi sept problèmes seulement? Parce qu'il était plus noble de limiter le nombre des problèmes et de leur attribuer une grosse récompense? Un million de dollars est une somme et, 23 millions de dollars, cela faisait beaucoup...



PROBLÈMES DU MILLENAIRE

Le problème P versus NP

C'est samedi soir et vous arrivez dans une soirée au milieu de nombreux invités. Timide, vous vous demandez combien de personnes vous connaissez déjà dans la pièce. Votre hôte vous informe que vous devez certainement connaître Julie, la femme qui se trouve à côté de la table du fond. En une fraction de seconde, vous pouvez jeter un coup d'œil et vérifier si votre hôte a raison. En revanche, si votre hôte ne vous dit rien, vous serez dans l'obligation de faire le tour de la pièce et d'aller voir chaque personne une par une. Voici l'exemple type du phénomène montrant que vérifier l'exactitude d'une solution.

De même, trouver un diviseur de $13\,717\,421$ prend beaucoup plus de temps que de vérifier que ce nombre est égal à $3\,607$ fois $3\,803$. Les mathématiciens ont isolé une classe de problèmes qui peuvent être résolus en un temps efficace : les problèmes à temps polynomial. Le problème P versus NP , formulé par Stephen Cook en 1971, demande si une solution qui peut être vérifiée en un temps polynomial peut également être trouvée en un temps polynomial.

L'hypothèse de Riemann

Certains nombres entiers ont la particularité de ne pas pouvoir être exprimés comme le produit de deux nombres entiers plus petits qu'eux-mêmes (par exemple : 2, 3, 5, 7, ... 53, ..., 1 999, ... etc.). Ils sont appelés nombres premiers et jouent un rôle très important dans de nombreuses applications (comme la cryptographie). Bien qu'elle ne semble pas obéir à une règle, la répartition des nombres premiers parmi les entiers est étroitement liée au comportement d'une fonction « $\zeta(s)$ » (lire «dzéta de s») découverte par Euler. L'hypothèse de Riemann affirme que les solutions intéressantes de l'équation $\zeta(s) = 0$ se situent sur une droite. L'hypothèse de Riemann a été vérifiée numériquement pour les 1 500 000 000 premières solutions. Elle contient la clef des mystères entourant la distribution des nombres premiers.

La conjecture de Poincaré

Traçons une courbe fermée (mais qui ne se recoupe pas) à la surface d'un ballon (sphère). Si l'on découpe le ballon le long de cette courbe, on obtient deux morceaux différents. Cependant, cela n'est pas toujours le cas pour des surfaces un peu plus compliquées, comme une chambre à air de vélo (surface appelée «torus»). Une telle surface est simplement connexe (alors que le tore ne l'est pas). Il est facile de démontrer que toute surface simplement connexe qui est finie (que l'on peut enfermer dans une boîte) et sans bord, est nécessairement la surface d'un objet sphérique. Poincaré a conjecturé qu'une telle caractérisation des objets sphériques continue à être vraie si l'on passe des surfaces à deux dimensions aux espaces à trois dimensions. Cette question s'est révélée extrêmement difficile et résiste depuis un siècle aux efforts des mathématiciens.

La conjecture de Hodge

Au XX^e siècle, les mathématiciens ont découvert des façons efficaces de décrire la géométrie des objets complexes. L'idée de base est de se demander comment reconstituer la forme d'un objet complexe en assemblant des formes géométriques simples de dimension croissante. Cette technique s'est révélée si puissante qu'elle a permis de créer une multitude d'outils

appelés «théorie des formes algébriques». Les mathématiciens ont effectué d'énormes progrès dans la classification des objets mathématiques. Malheureusement, les origines géométriques de la théorie ont disparu, au fur et à mesure qu'il est devenu nécessaire d'ajouter des éléments qui n'ont plus rien à voir avec la géométrie. La conjecture de Hodge suggère que, pour certains types d'espaces «élégants» (définis par des équations algébriques), les éléments appelés cycles de Hodge peuvent être interprétés comme une combinaison de formes géométriques d'origine algébrique.

La conjecture de Birch Swinnerton-Dyer

Les mathématiciens ont toujours été fascinés par le problème consistant à trouver des solutions aux équations algébriques comme $x^2 + y^2 = z^2$.

La question de base est de chercher des solutions où x , y , et z sont des nombres entiers. Pour l'équation ci-dessus, on sait depuis longtemps décrire toutes les solutions, mais, pour des polynômes plus compliqués, ce n'est pas le cas. En fait, Yu Matijasevich a montré en 1970 que le dixième problème de Hilbert a une réponse négative, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de méthode générale pour savoir si une telle équation a une solution composée d'entiers! Cependant, pour une classe très importante d'équations appelées courbes elliptiques de genre un, la conjecture de Birch Swinnerton-Dyer dit que la taille du groupe des solutions rationnelles dépend du comportement près d'une généralisation de la fonction $\zeta(s)$ associée à la courbe.

Équations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes décrivent le mouvement des fluides, qui jouent un rôle crucial dans un très grand nombre de phénomènes allant du contrôle des turbulences aérodynamiques aux prévisions de la météorologie.

Bien que ces équations datent du XIX^e siècle, notre compréhension de leurs solutions reste minime. Le problème est de décider si ces équations admettent des solutions et d'obtenir une théorie mathématique rigoureuse qui permette d'expliquer et de prédire le comportement des solutions des équations de Navier-Stokes.

Équations de Yang-Mills

Les lois de la physique quantique jouent aux échelles microscopiques un rôle analogue à celui des lois de Newton, qui régissent la mécanique classique du monde macroscopique.

Il y a un demi-siècle, deux physiciens Yang et Mills ont découvert une relation étonnante entre la physique des particules élémentaires et la géométrie des espaces fibrés. Ils ont obtenu une équation fondamentale qui porte le nom d'équation de Yang-Mills et dont on vérifie quotidiennement les prédictions expérimentales dans les accélérateurs de particules du monde entier.

Cependant, il n'y a aucune preuve mathématique de l'existence des champs quantiques gouvernés par les équations de Yang-Mills et la question, essentielle pour la physique, du confinement des quarks est un problème d'une difficulté mathématique considérable. La solution de ce problème nécessitera sans doute l'introduction d'idées nouvelles aussi bien du point de vue des mathématiques que de celui de la physique et devrait permettre de lever le voile sur un des grands mystères du monde microscopique.

Le sixième sens des blattes

Les cafards réussissent (trop) souvent à échapper au coup rageur qui devrait les écraser. Des physiiciens de l'Université de Princeton ont montré que les blattes portent, sur deux appendices



permettent de détecter la direction et la vitesse du vent. Ces capteurs sensoriels transmettent l'information à des neurones qui commandent les réactions de l'animal. Ce mécanisme de détection ultra sensible les protège des prédateurs.

Anti-VIH et nécrose de la hanche

Les antiprotéases, qui empêchent le virus responsable du SIDA de se multiplier, ont notablement augmenté l'espérance de vie des personnes séropositives. Pourtant, l'administration régulière de ces molécules aurait quelques conséquences néfastes pour la santé : on a constaté que les personnes traitées souffrent parfois d'une nécrose douloureuse de la tête du fémur. Les antiprotéases perturbent en effet la régulation de la quantité de calcium qui passe dans le sang, de sorte que, pour un même flux sanguin, les os sont moins bien irrigués et se dégradent. Quand cette nécrose est diagnostiquée assez tôt, on sait la traiter ; sinon, on doit implanter une prothèse de hanche, mais l'opération n'est pas dénuée de risques chez les personnes immunodéprimées.

Rotation de la graine

La partie solide du noyau terrestre, la graine, tourne plus vite que le reste de la Terre : elle effectue une révolution supplémentaire autour de son axe tous les 2 400 ans. En 1996, après l'analyse des enregistrements, en Alaska, d'ondes sismiques provenant de tremblements de terre survenus dans les îles Sandwich, en 1968 et en 1996, on avait déjà supposé l'existence de ces mouvements surprenants du cœur de la Terre : les ondes étaient parvenues plus vite en Alaska en 1996 qu'en 1968. Les chercheurs et ses collègues de l'Université de Californie ont analysé les ondes produites lors de deux essais nucléaires soviétiques qui ont eu lieu en 1971 et 1974. L'analyse de la réflexion de ces ondes sur des hétérogénéités dans la graine confirme que la rotation différentielle de la graine par rapport au manteau et à l'écorce terrestre est de 0,15 degré par an.

Des villes englouties

Découverte de deux cités antiques égyptiennes au large d'Alexandrie

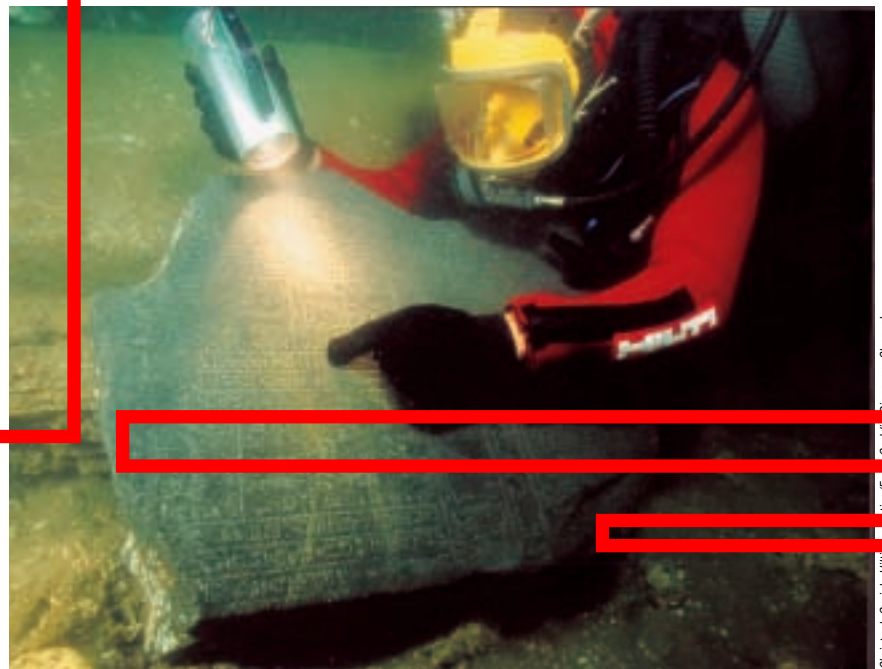
Deux villes égyptiennes, datant probablement du VI^e siècle avant notre ère, ont été découvertes sur les fonds sous-marins de la baie d'Aboukir, à quelques kilomètres d'Alexandrie. Après deux ans de repérages, les équipes de l'explorateur Frank Goddio et du Conseil supérieur des antiquités égyptiennes ont sorti les premières statues de la Méditerranée, où elles gisaient à moins de dix mètres de profondeur. Notamment, une tête de pharaon, un buste du dieu Sérapis et une statue décapitée d'Isis en granite noir ont été mis au jour.

Les nombreux vestiges découverts sont répartis sur deux sites. Le premier se trouve à deux kilomètres au large d'Aboukir et comporte des fondations de monuments, des statues, principalement liées au culte d'Isis, et de nombreux objets (céramiques, pièces de monnaie, bijoux...). Les plongeurs ont aussi retrouvé les parties manquantes du « Naos des décades », une chapelle de basalte dont un fragment, trouvé à Aboukir en 1777, est exposé au Musée du Louvre. Cette chapelle, du IV^e siècle avant notre ère, était gravée de tableaux et d'inscriptions représentant et commentant les 36 décades, des périodes de dix jours déterminées par l'apparition et la dispa-

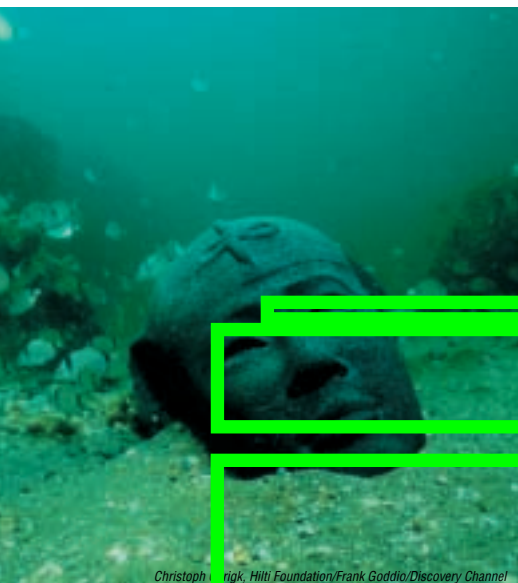
rition dans le ciel d'étoiles nommées décades. Elle témoigne des origines de l'astrologie classique, où les décades sont devenues des subdivisions des douze signes du zodiaque. Le second site, à six kilomètres des côtes, correspond aux vestiges d'une cité entière, en parfait état de conservation, répartis sur un kilomètre carré : on y a notamment identifié des ruines d'habitations, de temples, d'infrastructures portuaires. La statuaire y est également largement représentée.

Dès 1929, on avait établi, d'après l'étude des textes anciens, que les villes d'Héracléion et de Ménouthis devaient se trouver sous les eaux, à quelques kilomètres des côtes. La présence de Ménouthis fut confirmée quelques années plus tard par des observations aériennes et par celles du sous-marin *Scuter* d'après même découvert la base du Naos des décades, exposée au Musée gréco-romain d'Alexandrie. Cependant, la plupart des vestiges, recouverts d'une épaisse couche de sédiments, avaient échappé au repérage que les instruments modernes de détection ont enfin permis. En revanche, la cité d'Héracléion n'avait jamais été repérée.

La lecture des papyrus et des épigraphes anciens enseigne que le Nil avait autrefois une branche dans la région d'Aboukir, au bord de laquelle se trouvait la ville de Canope, reliée à Alexandrie par un canal. Puis venait Ménouthis, faubourg de Canope et enfin Héracléion, à l'embouchure. Port maritime de l'Égypte sur la Méditerranée au Nouvel Empire, c'était une ville douanière au commerce florissant, mais qui fut ensuite sup-



Les plongeurs ont retrouvé des fragments du Naos des décades, une chapelle de basalte couverte de hiéroglyphes, qui sont les plus anciens témoins connus de l'astrologie classique.



Christophe Brink, Hilti Foundation/Frank Goddio/Discovery Channel

Dans la baie d'Aboukir, Frank Goddio et son équipe ont découvert les restes de deux villes réputées pour leur richesses et leurs œuvres d'art, telle cette tête de pharaon.

plantée par Alexandrie, à partir de 331 avant notre ère. Ces villes, réputées pour leur richesse, leurs œuvres d'art et leurs nombreux temples érigés aux dieux Séraphis, Isis et Osiris, où les péloponnésiens venaient consulter les oracles, sont cités par les auteurs anciens : l'historien grec Hérodote, qui a visité le temple d'Hérakleion en 450 avant notre ère, le géographe grec Strabon, qui a décrit leur situation géographique et leur mode de vie luxueux, et le philosophe romain Sénèque, qui a condamné leurs mœurs corrompues.

Pourquoi ces villes sont-elles aujourd'hui englouties ? La montée des eaux de la Méditerranée, de lents mouvements d'affaissement de l'écorce terrestre et, finalement, de brusques effondrements de terrain, provoqués par des séismes, expliqueraient leur engloutissement. La position des colonnes et des murs, tous effondrés dans la même direction, semblent confirmer cette dernière hypothèse. Au IV^e siècle, à l'époque chrétienne, une basilique et deux sanctuaires furent construits près du temple d'Hérakleion. Ménéouthis, alors enseveli dans le sable. Puis, au VI^e siècle, le sanctuaire de Ménéouthis fut mis à sac par les chrétiens : à cette époque, Hérakleion et Ménéouthis étaient encore sur la terre ferme. La découverte dans les ruines sous-marines de monnaies byzantines et islamiques du VIII^e siècle prouve qu'elles n'ont pas été englouties avant cette date.

L'équipe de F. Goddio, à laquelle se sont joints des archéologues et des géologues, compte établir les plans de Ménéouthis et d'Hérakleion et apporter, grâce aux fouilles, des précisions quant au mode de vie de ces cités : les plongeurs remonteront divers objets qui gisent au fond de l'eau et les égyptologues déchiffreront les hiéroglyphes.

Le monde du manchot

Pour se reconnaître dans une colonie, les manchots émettent des « syllabes » caractéristiques.

Les manchots, dont les 17 espèces vivent toutes dans l'hémisphère Sud, sillonnent les océans en quête de pêches miraculeuses. Ils recherchent les zones poissonneuses où se mêlent eaux froides et eaux chaudes. Pour nicher, ils se regroupent à terre, par espèce, sur un territoire, où règne un cacarme assourdissant. Les partenaires font alors un va-et-vient incessant entre terre et mer : tandis que l'un couve, l'autre va chercher la nourriture et *vice versa*. Comment le manchot pourricier retrouve-t-il « sa famille » le parent qui reste couvrir ayant pu se disperser avec l'eau de plusieurs dizaines de kilomètres ? Thierry Aubin, du laboratoire de neurobiologie de l'apprentissage et de la mémoire du CNRS, à la Faculté des sciences d'Orsay, et Pierre Jouventin, au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive du CNRS, à Montpellier, ont montré que les manchots émettent des sons, une signature spécifique qui assure la reconnaissance.

Pendant la période de reproduction, l'archipel des Crozet devient le fief du manchot royal dont la plus vaste colonie – un million et demi d'individus – recouvre entièrement l'une des îles. Pour se nourrir, le manchot royal parcourt parfois jusqu'à 300 kilomètres, ce qui lui prend trois semaines. Quand il revient, le ventre plein de poissons, il retrouve les siens et les nourrit en régurgitant. Dès qu'il prend pied sur la terre ferme, le manchot se met à crier, tout en parcourant la colonie, car le son, vite arrêté par les congénères qui font écran, ne porte pas à plus de huit mètres. Le par-

tenaire (ou le poussin) à l'écoute, répond, dès qu'il entend l'appel du voyageur, et, grâce à un gavage acoustique, l'attire jusqu'à lui.

Pour élucider les modalités d'une telle reconnaissance sans faille, P. Jouventin a bouché les oreilles ou clos le bec de plusieurs manchots, et a vérifié que chaque espèce a un cri – un chant de cour – particulier, où chaque individu introduit sa caractéristique acoustique.

Trois paramètres caractérisent ce son : l'intensité, la fréquence et la durée. Les chants de cour ont été enregistrés en fonction de ces paramètres : on constate qu'ils sont organisés en syllabes (voir la figure), des motifs, constitués d'une fréquence fondamentale et d'harmoniques qui se répètent. En enregistrant les chants de nombreux manchots, T. Aubin et ses collègues ont constaté que la variation chez un même individu est bien inférieure à la variation entre individus. Les petits ne s'y trompent pas : on enregistre le chant du parent, on en modifie un des paramètres, puis on le rediffuse ; on constate que le poussin s'approche du haut-parleur jusqu'au moment où un des paramètres fondamentaux a été modifié.

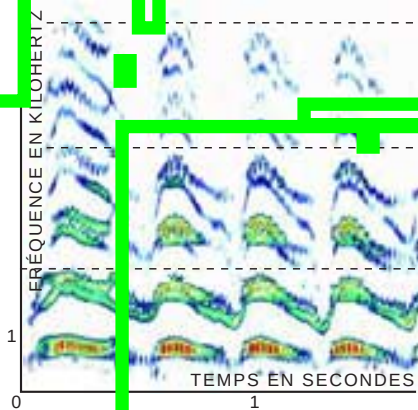
L'équipe a réalisé différents mixages du cri du parent et de ceux d'autres parents. Dans cet exercice, le manchot royal se montre particulièrement performant : le poussin est capable d'extraire la voix de son parent même lorsque son intensité est inférieure de six décibels au bruit ambiant ! L'effet « cocktail » joue à plein ! L'animal sait extraire du bruit de fond les sons qui ont un sens pour lui. Pour ce faire, il applique la « théorie mathématique de la communication » de Shannon et Weaver : pour faire passer une information dans le bruit, il faut être redondant, c'est-à-dire la répéter plusieurs fois. Ce que font les manchots.

T. Aubin et ses collègues ont constaté que la tactique acoustique des



T. Aubin

Lorsqu'ils couvent leur poussin entre leurs pattes, sous un repli de la peau, les manchots se déplacent. Pour que les partenaires se retrouvent, chacun répète inlassablement une syllabe qui lui est propre.



Sur cet enregistrement de la signature acoustique d'un manchot, on constate la répétition de quatre «syllabes» constituées d'une fréquence fondamentale (en bas) et de plusieurs harmoniques. L'animal émet ce son dont l'amplitude, la fréquence et la durée sont spécifiques. De surcroît, la montée en intensité et la variation de fréquence entre le début et la fin de l'émission sont également spécifiques. La combinaison de tous ces paramètres garantit l'unicité de la signature acoustique.

manchots diffère selon qu'ils ont ou non un nid. Les manchots avec nid, qui bénéficient de repères visuels, tels les manchots Papou ou Adélie, sont sensibles à la fréquence : lorsqu'elle varie de plus de 10 pour cent vers le grave ou vers l'aigu, l'oiseau ne reconnaît plus «son» manchot. Pour les manchots sans nid, dépourvus de repères visuels, tels les manchot empereurs et royaux, la fréquence n'est pas primordiale et peut même varier de 50 pour cent sans conséquence sur le repérage. En revanche, les manchots royaux sont sensibles aux modulations de fréquence du chant tandis que les manchots empereurs le sont aux modulations d'amplitude.

En outre, la signature vocale est très courte chez les manchots sans nid. Elle se réduit à la montée en fréquence du cri : une demi-syllabe suffit. Dès lors, pourquoi les chants sont-ils si longs, comprenant trois à sept syllabes ? Pour être redondant ! Pour vaincre le vent et le charivari ambiant, les manchots doivent «bégayer» : ils ont plus de chances de bénéficier d'une accalmie qui laissera passer leur message.

Des colonies loyales d'autres oiseaux marins, tels les mouettes roses ou les flamands roses, vont également être étudiées. La communication acoustique chez des mammifères sociaux, tels les éléphants de mer et les otaries est également à l'étude. Chez ces dernières, la reconnaissance acoustique semble fondée sur la fréquence, comme chez les manchots sans nid.

Marie-Thérèse LANDOUSY

La forêt en danger

À Madagascar, la déforestation pour la culture du maïs sur brûlis est irréversible.

La forêt recouvre plus de 20 pour cent du territoire malgache, soit 13 millions d'hectares environ. Toutefois, 200 000 à 300 000 hectares disparaissent chaque année, surtout dans l'Est et le Sud-Ouest de l'île, à cause du défrichage de parcelles dédiées à la culture du maïs. Vivrière à l'origine, elle est devenue commerciale : depuis quelques dizaines d'années, elle a pris de l'ampleur et gagne sur la forêt. Michel Grouzis, Pierre Milleville et leurs collègues de l'Institut de recherche pour le développement et du Centre national de recherche sur l'environnement ont étudié comment les Malgaches exploitent la forêt et comment celle-ci réagit. Leurs conclusions sont sans appel : elle ne se régénère pas après l'abandon des parcelles cultivées.

Pour cultiver le maïs, sur «abattis-brûlis», l'agriculteur défriche sommairement une parcelle de forêt, brûle les restes et sème le maïs dès les premières pluies. Les agronomes ont calculé le rendement de parcelles d'âges variés : pendant les trois premières années, il atteint 1 500 kilogrammes de grains par hectare, mais après cinq à six ans de culture, il est inférieur à 500 kilogrammes par hectare. Les analyses d'échantillons de sols montrent que plus la parcelle est cultivée longtemps, plus les quantités de carbone, d'azote, de phosphore et de sels minéraux sont faibles. D'année en année, les mauvaises herbes envahissent les parcelles, appauvrissant encore le sol. Les agriculteurs se contentent de brûler les mauvaises herbes séchées au lieu de s'en débarrasser par sarclage. Après avoir cultivé la même parcelle pendant cinq à dix ans, ils l'abandonnent et en défrichent une autre.

Les écologues ont suivi l'évolution de la végétation sur plusieurs parcelles abandonnées depuis 2 à 30 ans. Aux cultures se substitue une savane boisée. La comparaison de photographies aériennes ou prises par satellite entre 1960 et 1999

montre que la forêt ne gagne pas de terrain. Cette situation est contraire à ce qui se passe dans la plupart des milieux tropicaux humides, où les lisières avancent à mesure que les graines tombent au pied des arbres ou sont dispersées par la faune

Les agriculteurs malgaches défrichent sommairement des parcelles de terrain dans la forêt. Ils y mettent le feu afin de détruire les plantes restantes et d'y cultiver le maïs.

et le vent. À Madagascar, plusieurs phénomènes détruisent les jeunes pousses d'espèces forestières : au Sud de l'île, l'humidité du sol est plus faible que dans le reste de l'île et limite le développement des plantes de forêt. Les parcelles abandonnées sont ravagées par les feux de défrichage qui s'y propagent accidentellement ou par les feux volontairement allumés pour détruire les herbes sèches et favoriser la repousse des pâturages. De plus, dans ces parcelles et dans la forêt environnante, les Malgaches prélèvent des jeunes plantes qui fournissent des substances médicinales, du bois de construction (notamment pour les pirogues), des fruits et des racines comestibles, des résines pour fabriquer de la colle... (sur 210 espèces identifiées dans la forêt, seules 40 n'ont aucun usage). Ainsi, la déforestation est irréversible et menace 75 pour cent des espèces endémiques.

Pour protéger la forêt, les agronomes envisagent d'autres types de cultures, tels le labou, avec lesquels la pratique des brûlis disparaîtrait et, avec elle, la prolifération des mauvaises herbes : les parcelles seraient exploitées plus longtemps, mais le temps de travail des agriculteurs augmenterait considérablement. L'arrêt de la déforestation semble dépendre de mesures politiques contraignantes.



Bernard Mozo, IRD

Masse confirmée

Les neutrinos oscillent toujours.

Combinaison de milliards de neutrinos nous traversent, heureusement sans que nous ne nous en rendions compte : les neutrinos interagissent très peu avec la matière. Les physiciens se sont longtemps interrogés sur la masse de cette particule insaisissable dont il existe trois sortes : les neutrinos électroniques, muoniques, tauiques.

Un neutrino sans masse se propage inchangé, mais un neutrino massif oscille lors de sa propagation : un neutrino électronique peut se changer en neutrino muonique, et réciproquement. Annoncée en juin 1998, la découverte de cette oscillation demandait confirmation,

car la source de neutrinos utilisée était mal caractérisée. C'est maintenant chose faite : l'équipe qui avait fait la première annonce vient de confirmer le résultat à l'aide d'une source de neutrinos créée par un accélérateur de particules.

Dans le détecteur *SuperKamiokande*, situé à 250 kilomètres de Tokyo, on avait comparé le flux des neutrinos muoniques qui émanaient de l'atmosphère au-dessus du détecteur à celui des neutrinos muoniques qui avaient préalablement traversé la Terre. Ce dernier flux était plus faible, preuve que certains neutrinos muoniques se seraient transformés en un autre type de neutrino pendant la traversée de la terre. Ces résultats étaient probants, mais ils présupposent une bonne connaissance des neutrinos atmosphériques. Or, les incertitudes sur le flux de ces neutrinos sont voisines de 15 pour cent.

Pour confirmer les oscillations, les physiciens ont dirigé un faisceau de neutrinos muoniques produits par l'accélérateur KEK, près de Tokyo, vers le détecteur *SuperKamiokande*. Le flux de neutrinos muoniques était mesuré précisément à la sortie de l'accélérateur, puis remesuré dans *SuperKamiokande*, à 250 kilomètres plus loin. Si les neutrinos muoniques n'avaient pas oscillé, on aurait dû observer le même flux de neutrinos muoniques lors de leur production et dans *SuperKamiokande*.

À la fois de 25 neurones au départ, les physiciens n'en ont observé que 17 à l'arrivée : les neutrinos oscillent bien.

Reste à caractériser cette oscillation. Ce sera le travail d'une expérience menée entre le CERN et le détecteur de neutrinos de Gran Sasso, à 730 kilomètres de là. Cette expérience permettra de savoir en quels neutrinos se transforment les neutrinos muoniques.

La santé du monde

On peut vivre longtemps, très longtemps, mais peut-on comparer une vie de 60 ans sans problème majeur de santé et une autre de 85 ans dont 20 passés à lutter contre une maladie grave ? À l'échelle d'un pays, peut-on comparer l'espérance de vie d'un pays industrialisé où les maladies cardio-vasculaires et celle d'un pays en développement ravagé par une épidémie de paludisme ? Pour rendre plus pertinentes les statistiques et pondérer l'espérance de vie totale calculée à partir des taux de mortalité par l'espérance de vie en bonne santé, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a publié un nouveau classement des pays selon l'espérance de vie des enfants nés en 1999. Pour ce faire, les statisticiens ont mis au point un indicateur nommé DALE (l'«*espérance de vie ajustée aux invalidités*») pour lequel

les années de maladies, pondérées selon leur gravité, sont soustraites à l'espérance de vie totale. Par exemple, en France, l'espérance de vie totale d'une femme est de 83,6 ans, mais elle passerait en moyenne l'équivalent de 6,7 ans malade : son espérance de vie en bonne santé est donc de 76,9 ans.

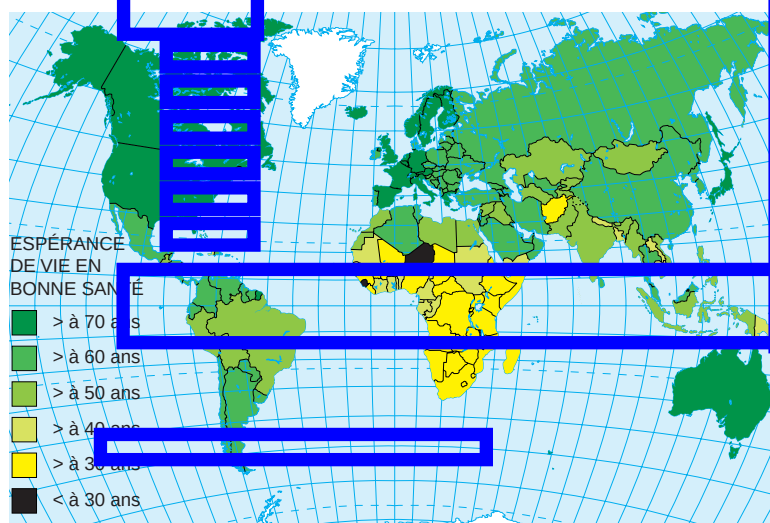
Quels sont les palmarès ? Le Japon arrive en tête avec une espérance de vie saine de 74,5 ans, suivi par l'Australie avec 73,2 ans. La France, avec 73,1 ans, est en troisième position. Selon les chiffres publiés, un Français passera en moyenne 5,6 ans malade et une Française 6,7. Parvenu à l'âge de 60 ans, un Français peut espérer vivre encore 16,8 ans en bonne santé, et une Française 21,7.

Parmi les 144 pays dont l'espérance de vie en bonne santé dépasse 70 ans, on trouve la plupart des pays industrialisés d'Amérique du Nord et d'Europe occidentale et, au 24^e rang...

les États-Unis. Selon les experts de l'OMS, le «*mauvais classement*» de la première puissance économique mondiale s'explique par les conditions de vie des minorités ethniques, l'épidémie du SIDA et une violence notable.

L'espérance de vie en bonne santé dépasse 60 ans dans 79 autres pays, tels ceux d'Europe de l'Est, de l'ex-URSS, la Chine et les deux tiers de l'Amérique latine. Elle est supérieure à 50 ans dans la majorité de l'Asie du Sud-Est et de l'Asie

Centrale. Au bas du tableau, les habitants de l'Afrique Sub-



Pour chaque pays, l'espérance de vie en bonne santé a été calculée à partir de l'espérance de vie totale dont on a retranché le nombre d'années de maladie pondérées selon la gravité. En bas du tableau, le Malawi, le Niger et la Sierra Leone (en noir).

santé inférieure à 50 ans, le Malawi (29,4 ans), le Niger (29,1 ans) et la Sierra Leone (25,9 ans) détenant le triste record. Le SIDA, qui a tué plus de deux millions d'Africains en 1999 est devenu la première cause de mortalité dans ces pays. Dans les zones où le VIH est très répandu, 60 pour cent des jeunes qui parviennent à l'âge de 15 ans mourront du SIDA, et ce risque est de 40 pour cent pour le reste de l'Afrique.

Le rhinocéros géant

JEAN-LOUP WEL COMME • PIERRE OLIVIER ANTOINE • LAURENT MARIVAUX

Des fossiles du plus grand mammifère terrestre de tous les temps, Paraceratherium, un rhinocéros de neuf mètres de long et de vingt tonnes, ont été redécouverts au Pakistan, où l'animal vivait il y a 28 millions d'années.

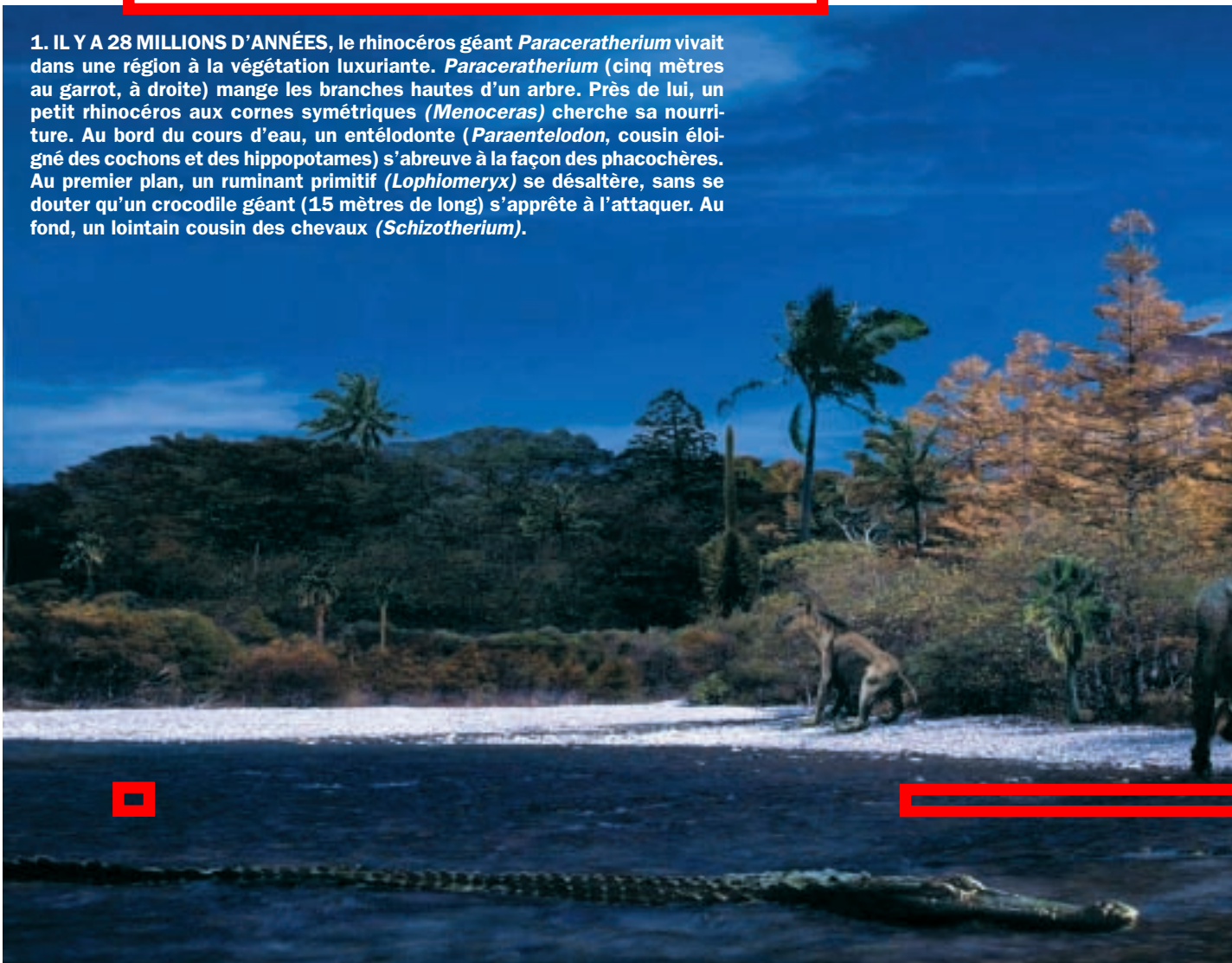
Pour une fois, un mammifère fossile a volé la vedette aux dinosaures. Début mai 1999, l'annonce de la sensationnelle redécouverte du plus grand mammifère terrestre de tous les temps, *Paraceratherium*, plus connu sous le nom de *Baluchitherium*, a fait le tour du monde. L'information provenait de Dera Bugti,

une petite ville des collines Bugti au Balouchistan (Ouest du Pakistan). Cette région aujourd'hui semi-désertique compte parmi les plus riches au monde en vertébrés fossiles de l'ère tertiaire, et la découverte actuelle est le dernier prolongement d'une longue histoire.

Vickary, un officier de l'armée britannique, signala, dans un rapport

publié par la Société géologique de Londres en 1846, que la région des Bugti était riche en ossements fossiles. Il mentionnait la présence de restes osseux et de troncs d'arbres silicifiés aux environs d'une dépression appelée Kumb, au Sud-Ouest de Dera Bugti. Les géologues et les paléontologues (toujours britanniques) pri-

1. IL Y A 28 MILLIONS D'ANNÉES, le rhinocéros géant *Paraceratherium* vivait dans une région à la végétation luxuriante. *Paraceratherium* (cinq mètres au garrot, à droite) mange les branches hautes d'un arbre. Près de lui, un petit rhinocéros aux cornes symétriques (*Menoceras*) cherche sa nourriture. Au bord du cours d'eau, un entélodonte (*Paraentelodon*, cousin éloigné des cochons et des hippopotames) s'abreuve à la façon des phacochères. Au premier plan, un ruminant primitif (*Lophiomeryx*) se désaltère, sans se douter qu'un crocodile géant (15 mètres de long) s'apprête à l'attaquer. Au fond, un lointain cousin des chevaux (*Schizotherium*).



naïes et les autorités provinciales du Balouchistan afin de prospecter dans la région. En 1995, après plusieurs séjours et de longues semaines de tractations administratives, la première Mission paléontologique française dans le Bugti est effectivement autorisée à se rendre à Dera Bugti. Reste alors à convaincre Nawab Bugti, le Seigneur redouté et respecté des « Tigres du Balouchistan », que de nouvelles recherches paléontologiques sur les territoires qu'il « administre » pourraient avoir de grandes répercussions scientifiques. Nawab Akbar Khan Bugti, ancien gouverneur du Balouchistan, donne immédiatement son accord ; mieux, ce fin lettré ordonne à plusieurs guerriers de sa garde personnelle d'accompagner les paléontologues au cours de leurs prospections. Leur mission n'est pas de surveiller ces derniers, mais plutôt de les protéger : la zone à prospecter

L'obstination d'un paléontologue

Pourtant, les fossiles des collines Bugti et leurs gisements fabuleux (au sens propre) décrits par les explorateurs britanniques n'ont cessé de fasciner les paléontologues. Du point de vue scientifique, ces fossiles ont une

Dès 1993, l'un de nous (Jean-Loup Welcomme) entreprend des tractations avec le gouvernement pakista-



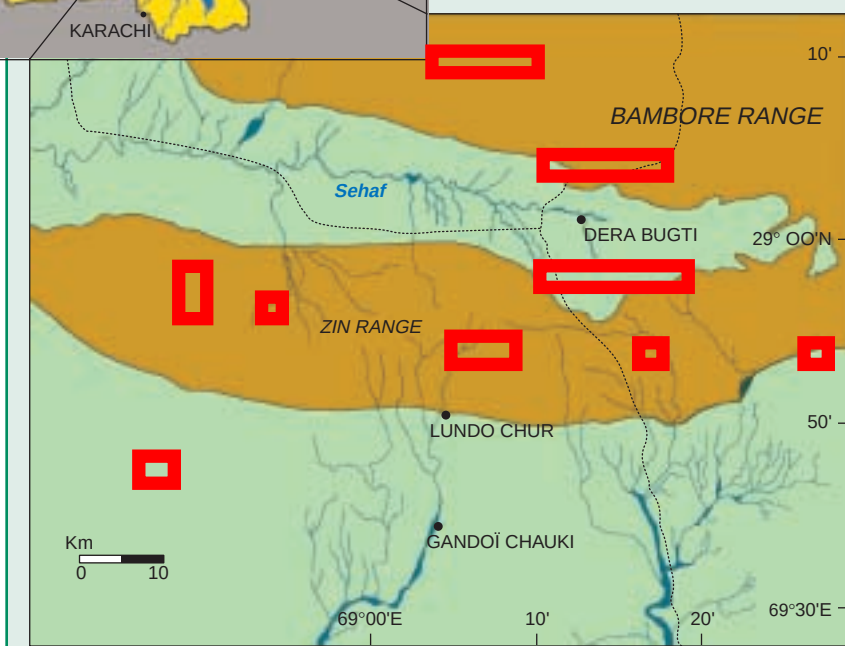
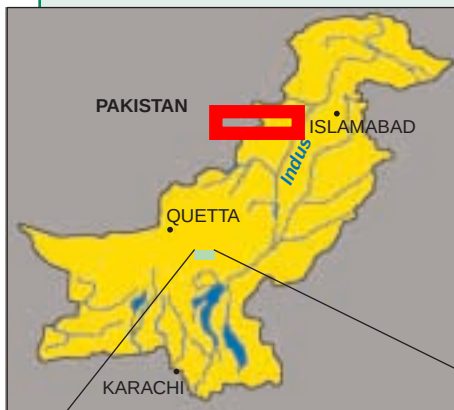
2. Les Bugti, paradis des rhinocéros

Les rhinocéros, comme les chevaux et les tapirs, sont des périssodactyles, ongulés caractérisés par un nombre impair de doigts. Apparue à l'Éocène inférieur (il y a 50 millions d'années) en Eurasie et en Amérique du Nord, la superfamille des rhinocérotoïdes comprend les rhinocerotidés (dont les rhinocéros actuels) et deux groupes éteints, les amynodontidés et les hyracodontidés. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la grande majorité des rhinocérotoïdes était dépourvue de corne. La corne des rhinocéros est en effet une acquisition récente, présente chez certaines espèces de rhinocerotidés seulement.

Dans les terrains tertiaires des collines Bugti, les rhinocérotoïdes sont exceptionnellement abondants et diversifiés. Si l'on tient compte des anciennes collections et des nouvelles récoltes, près de 20 espèces y ont été reconnues, appartenant aux trois familles : le baluchithère *Paraceratherium* (hyracodontidé), *Cadurcotherium* (amynodontidé) et plusieurs rhinocerotidés ont coexisté dans la région pendant une partie de l'Oligocène. Après la limite Oligocène-Miocène (il y a 24 millions d'années) et l'extinction des amynodontidés et des hyracodontidés, les rhinocerotidés se diversifient de façon spectaculaire : pas moins de huit espèces cohabitaient autour du même cours d'eau miocène près de Dera Bugti, il y a 20 millions d'années. À titre de comparaison, on compte aujourd'hui cinq espèces de rhinocéros dans le monde (deux en Afrique et trois en Asie), toutes menacées d'extinction.

Les espèces présentes au Miocène inférieur (à partir de 21 millions d'années) dans les Bugti sont incroyables. Tout d'abord, une telle diversité spécifique est unique au monde. Du fait de la concurrence, les espèces occupaient plusieurs niches écologiques : forêts, milieux ouverts et points d'eau. Certaines, mimant les hippopotames, étaient même adaptées à une vie semi-aquatique. De plus, cette région était à l'époque un véritable vivier évolutif, où tous les groupes de rhinocerotidés (ou presque) sont représentés. Certains groupes, comme les élasmotheriiniés et les brachypothères, font leur apparition dans ces gisements.

Ces gisements sont à peine postérieurs à la collision Afrique-Eurasie, il y a 20 millions d'années, qui a rendu possible de nombreux échanges fauniques. Les rhinocéros ont gagné le continent africain par migration depuis l'Asie. Les rhinocéros africains, connus en Ouganda et au Kenya, sont d'ailleurs très proches de ceux des Bugti.



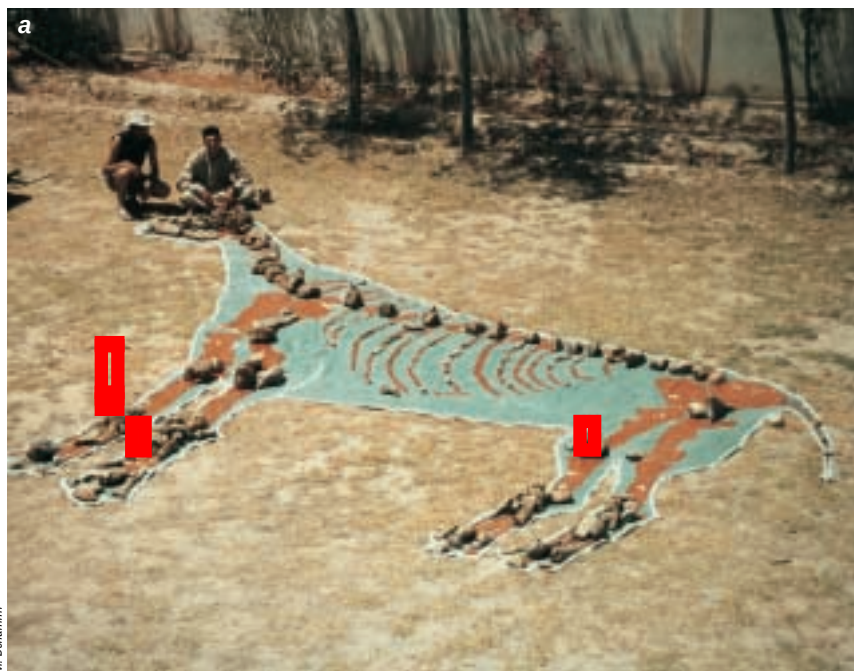
jouxtent le territoire d'une tribu ennemie. Trois semaines de prospection dans les environs de Dera Bugti et de Kumb (le «Kumb» de Vickary) permettent, dès ce premier contact avec le terrain, de récolter des centaines de fossiles de vertébrés dans plusieurs gisements et sur plusieurs niveaux.

Malgré le premier succès sans accrocs, n'a pas facilité l'accès à la région pour les missions suivantes : en 1997 notamment, 17 jours passés à naviguer de bureau en administration seront nécessaires à l'équipe pour obtenir les autorisations de se rendre à Dera Bugti. Ce n'est finalement que sur intervention expresse de Nawab Bugti via le Parlement du Balouchistan que la mission, néanmoins écourtée, a pu se dérouler.

Bin après un an, les expéditions, annuelles depuis 1995, associent des chercheurs et des étudiants du Muséum national d'histoire naturelle à Paris, du Muséum d'histoire naturelle de Toulouse, de l'Université des sciences et techniques de Montpellier et de l'Université du Balouchistan à Quetta. Les missions fonctionnent toujours en équipes restreintes (trois à quatre paléontologues seulement), car les conditions de vie sont très difficiles. L'insécurité alimentaire et sanitaire est toujours de rigueur dans cet environnement plus qu'hostile : chacun doit être indispensable et apporter une compétence particulière. L'hostilité des bergers et des guerriers se manifestant par une balle dans la tête de l'importun, mieux vaut respecter certaines règles de sécurité. Aussi, Nawab Bugti convoque-t-il systématiquement, à notre arrivée à Dera Bugti, son Conseil de guerre : à tous les chefs de famille, de clans et de tribus de la région, nous sommes alors présentés comme des hôtes, à protéger et à aider si besoin est. Il est également préférable, tant pour la discrétion que pour le confort, d'adopter la tenue vestimentaire locale : chemise ample et pantalon bouffant («kamiz-shalwar») turban sur la tête («patka») et sandales balouchs («chabuv»).

Des résultats à la mesure des espoirs

Des milliers de fossiles de mammifères (mastodontes, rhinocéros, schizothères, antilopes, anthracothères, carnivores, rongeurs), de reptiles et



3. LE SQUELETTE DU BALUCHITHÈRE est reconstitué avec des restes fossiles appartenant à plusieurs individus. Pour cette reconstitution difficile, il a d'abord fallu récolter les spécimens dans le gisement de Lundo Chur, puis les acheminer à dos de dromadaire (et de paléontologue) jusqu'au camp de base de Lundo. Là, un par un, ils ont été consolidés avec de la colle à bois diluée, avant d'être méticuleusement rassemblés dans une douzaine de cantines militaires. Plusieurs heures de dromadaire et de camion plus tard, ils rejoignent – sans aucune casse – la ville de Dera Bugti. Il ne restait plus qu'à opérer la reconstitution. Pour ce faire, une bâche plastique rectangulaire a été étendue sur le sol afin de matérialiser la silhouette de l'animal (a).

Les spécimens les plus complets (crâne, dents et os du squelette appendiculaire) ont ensuite été disposés en position anatomique sur la bâche. La longueur de certains os longs (humérus, radius, fémur, tibia) a été estimée par comparaison avec les rhinocéros actuels, car nous n'en avions que des fragments sans contact anatomique. La silhouette a alors été découpée dans la bâche et le contour souligné à l'aide de peinture blanche. Enfin, les parties manquantes ont été peintes avec de l'antirouille marron (système D oblige !) pour homogénéiser l'ensemble. Le tour était joué : le baluchithère *Paraceratherium* (de la famille des hyracodontidés,

aujourd'hui disparue), rhinocéros sans corne, fait plus de cinq mètres au garrot et neuf à dix mètres de long de la tête à la queue.

Reconstruire les spécimens osseux fossiles appartenant au baluchithère sur le terrain est d'une simplicité enfantine : aucun autre mammifère terrestre n'atteint de pareilles dimensions... Le spécimen fossile photographié (c) correspond à l'extrémité du doigt central de la main d'un individu de taille respectable. Complet, ce doigt dépasserait soixante centimètres de long, et pèserait une vingtaine de kilogrammes.

La corpulence du baluchithère ne le garantissait pas contre tous les prédateurs : la plupart des restes découverts au cours de la mission 1999 portent des empreintes coniques, laissées par des dents de crocodile. La photographie (d) représente un fragment de mandibule – mâchoire inférieure – de baluchithère juvénile, portant encore deux molaires de lait (en haut de la photographie, de couleur gris-bleu). On distingue nettement deux profondes impressions, distantes de plusieurs centimètres. La cassure du spécimen (à droite) est elle-même due à la morsure du crocodile géant. Au contraire des mammifères et comme tous les reptiles, les crocodiles ont des dents indifférenciées, ce qui permet de reconnaître le prédateur, même plusieurs dizaines de millions d'années après la curée.

4. Les baluchithères

Les baluchithères sont des hyracodontidés, groupe d'ongulés périssodactyles connu dès l'Éocène inférieur (50 millions d'années) en Asie et Amérique du Nord, et disparu à la fin de l'Oligocène (24 millions d'années). Au sein des rhinocérotoïdes, il constitue le groupe frère des rhinocérotoïdes (tous deux sont issus d'un ancêtre commun exclusif). Parmi les hyracodontes, on distingue les hyracodontidés, petits animaux tapiroïdes aux proportions de chevaux, et les baluchithères (ou indricothères), de bien plus grandes dimensions.

Les premiers baluchithères sont connus à l'Éocène moyen en Amérique du Nord et en Asie (il existait à l'époque une voie de passage dans l'Atlantique Nord). Le groupe s'éteint à la fin de l'Oligocène. Au cours de leur histoire, le trait évolutif le plus marquant est l'accroissement de taille, puisque, de deux mètres au garrot à l'Éocène, les baluchithères ont atteint le triple au cours de l'Oligocène.

Le vrai nom du baluchithère des collines Bugti est *Paraceratherium bugtiense*, le «presque-rhinocéros-sans-corne-des-Bugti». Plusieurs noms de genre lui ont été donnés au fil des articles et au gré des auteurs : d'abord, l'espèce *Aceratherium bugtiense* est créée par Pilgrim en 1908. Le genre est inapproprié (l'espèce type du genre *Aceratherium* est un rhinocerotidé, le nom ne peut donc convenir à un hyracodontidé). Forster-Cooper lui substitue en 1911 le genre *Paraceratherium*, encore valide aujourd'hui. Deux ans plus tard, ce même auteur invente encore le genre *Thaumastotherium* («la bête prodigieuse») pour les spécimens les plus grands provenant du même gisement de Chur Lando. Malheureusement, ce nom étant déjà utilisé pour un autre animal, Forster-Cooper renomme l'animal *Baluchitherium* («la bête du Balouchistan»). On pense aujourd'hui que les noms *Baluchitherium* et *Paraceratherium*, correspondant respectivement aux mâles (de grande taille) et aux femelles (plus petites), sont synonymes. Étant plus récent, *Baluchitherium* devrait être abandonné au pro-

fit de *Paraceratherium*, en vertu de la règle de priorité. Néanmoins, le terme de baluchithère, fixé par l'usage, est passé à la postérité tout comme le nom de brontosaurus chez les dinosaures : le nom scientifique valide n'est pas *Brontosaurus* Marsh, 1879, mais *Apatosaurus* Marsh, 1877, pour les mêmes raisons de priorité. La plupart des auteurs récents considèrent en outre que les genres *Aralotherrium* et *Dzungariotherium*, créés pour d'autres fossiles asiatiques, sont également synonymes de *Paraceratherium*. Le doute subsiste quant au genre *Indricotherium* (qui a donné le terme vernaculaire d'indricothère pour les hyracodontes géants, au même titre que baluchithère), connu en Mongolie et au Kazakhstan.

Les baluchithères ont une répartition presque exclusivement asiatique. La grande majorité des restes ont été découverts en Chine, en Mongolie et au Kazakhstan (étoiles rouges sur la carte). Le gisement le plus riche est néanmoins celui de Lundo Chur («Chur Lando» des anciens auteurs) dans les collines Bugti du Pakistan. Quelques dents isolées ont en outre été décrites en Europe centrale (Roumanie, Bulgarie), dans les Balkans (Yougoslavie) et au Caucase (Géorgie). ~~Tous ces gisements sont datés de l'Oligocène (24-34 millions d'années).~~ Jusqu'à présent, les baluchithères des collines Bugti étaient considérés comme les derniers survivants du groupe, au Miocène inférieur (environ 20 millions d'années). Grâce à la mission 1999, nous avons pu prouver que les niveaux à baluchithères des Bugti étaient eux aussi oligocènes, d'âge comparable à celui des autres gisements asiatiques. Le groupe s'est donc partout éteint simultanément ou presque, à la fin de l'Oligocène (24 millions d'années environ).

Carte de répartition des restes de rhinocéros géants en Eurasie. Les baluchithères sont essentiellement connus en Chine, en Mongolie, au Kazakhstan et au Pakistan. Quelques spécimens ont toutefois été découverts dans les Balkans.



de poissons ont été récoltés année après année dans les environs de Dera Bugti. La ville de Dera Bugti est essentiellement entourée de dépôts datant du Miocène inférieur, légèrement postérieurs à la collision entre les plaques Afrique et Eurasie, il y a environ 20 millions d'années. Quelques surprises géologiques nous attendaient : tout d'abord, le Miocène supérieur (dix millions d'années), inconnu jusqu'alors dans la région, a été mis en évidence grâce à Kehar, guerrier bugti depuis devenu le *braz* (frère en langue balouch) de Jean-Loup Welcomme : Kehar a eu l'idée de présenter aux paléontologues des fossiles caractéristiques qu'il avait récoltés des années auparavant.

En outre, certains fossiles typiques de la région, découverts au siècle dernier, manquaient toujours dans nos récoltes, notamment *Baluchitherium* («la bête du Balouchistan»). Ce rhinocéroïde sans corne, le plus grand mammifère qui ait jamais existé, a été pour la première fois signalé par Pilgrim en 1908, et baptisé *Aceratherium bugtense* («le rhinocéros sans corne des Bugti»). Forster-Cooper, en 1911, crée pour la même espèce le genre *Paraceratherium* («presque *Aceratherium*»), puis le genre *Baluchitherium*, deux ans plus tard. Depuis, d'autres baluchithères ont été découverts en Mongolie et en Chine, au Kazakhstan et jusqu'en Europe centrale et dans les Balkans. Ces restes sont partout datés de l'Oligocène (34 à 24 millions d'années) grâce aux rares faunes associées ou à des datations absolues (paléomagnétisme, chronostratigraphie). Dans la région de Dera Bugti, les terrains ayant livré des grands mammifères sont en revanche habituellement datés du Miocène inférieur (20 à 18 millions d'années), en raison de la présence, dans toutes les anciennes collections, de restes de proboscidiens (mastodontes et dinotheres), apparus en Eurasie, par dispersion depuis l'Afrique, au Miocène inférieur seulement.

Cette région, aujourd'hui fort inhospitalière, a-t-elle constitué pendant tout le début du Miocène un sanctuaire, un refuge pour ces faunes à cachet oligocène ou, au contraire, les terrains dans lesquels elles ont été découvertes avaient-ils été rajeunis à la suite de mélanges de faunes dans les collections ? Bref, à quelle époque notre baluchithère vivait-il ?



5. AU FIL DES ANNÉES ET DES EXPÉDITIONS, de solides liens se sont noués entre les paléontologues et les guerriers bugti. Au cours des siècles et des siècles, les guerriers bugti, surnommés «les tigres du Balouchistan», mènent une vie semi-nomade dans ces collines inhospitalières. Seule concession à la «modernité», les armes à feu (AK 47, fusils de guerre et lance-roquettes) ont remplacé les sabres bugti, encore très récemment en usage. Certains gardes s'intéressent aux fossiles et n'hésitent pas à récolter des spécimens, ici, un fragment de mandibule de baluchithère (à droite), découvert près de Lundo Chur.

À la poursuite des baluchithères perdus

Cette question nous a amenés à poursuivre nos recherches, comme Forster-Cooper il y a 90 ans, dans la région très sensibile de Lundo Chur (probablement le Chur Lando des anciens auteurs), afin de retrouver des restes de baluchithère en situation stratigraphique contrôlée. Cette région était inaccessible jusqu'en 1998, en raison des guerres tribales, mais, depuis, la situation est un peu plus calme, ce qui rendait possible la mission de 1999. Le seul support cartographique disponible pour sillonner la région était la carte publiée par Pilgrim en 1910, où Chur Lando était mentionné. Inutile de préciser qu'entre-temps, l'érosion ayant eu tout le temps de remodeler les reliefs sableux des environs, il a parfois été malaisé de se repérer. L'équipe comprenait l'ancien responsable de la mission, spécialiste des proboscidiens (Jean-Loup Welcomme), un spécialiste des rhinocéros (Pierre-Olivier Antoine), un spécialiste des rongeurs (Laurent Marivaux) et un magnétostratigraphe (Mouloud Benammi). Nous étions accompagnés par un prince balouch, Mir Haider Shahwani, et un géologue de l'Uni-

versité du Balouchistan à Quetta, Ibrahim Baloch Shahwani.

Les conditions climatiques, déjà éprouvantes au début du séjour (fin mars), s'aggravèrent encore au fil des jours : la température a plusieurs fois frisé les 50 degrés (la proche ville de Sibi est une des villes les plus chaudes du Globe, avec des températures estivales de 55 à 60 degrés fréquemment relevées sous abri). Dans ces conditions très difficiles, il était nécessaire de s'organiser de manière rigoureuse. Après un réveil plus que matinal, nous partions sur le terrain à l'aube, pour profiter des courts moments de «fraicheur». La chaleur, vite accablante, nous obligeait à retourner au camp dès 11 heures. Les provisions d'eau étaient alors épuisées depuis longtemps, nous aussi ! C'est parfois 30 à 40 kilogrammes que nous avons dû transporter sur le dos, tels des animaux de bât, caillés par le soleil.

Au fil des jours, nous avons sillonné les environs, dans un rayon de six à sept kilomètres, en récoltant systématiquement les fossiles déterminables et en levant les coupes géologiques (parfois sur plus de 300 mètres d'épaisseur). La mission 1999 nous a permis de découvrir 20 gisements, sur une douzaine de



P.-O. Antoine

6. LE CAMP DE BASE DE L'EXPÉDITION 1999, où l'équipe de paléontologues est restée en autosuffisance pendant près de trois semaines, était établi près du point d'eau de Lundo (flèches blanches à droite). Les terrains fossilifères – de la base de la falaise, au niveau du camp, jusqu'à l'horizon – s'échelonnent de l'Oligocène inférieur (environ 33 millions d'années) au Miocène supérieur (10 millions d'années). Ils reposent sur des calcaires marins blancs de l'Éocène.

niveaux stratigraphiques successifs. Certains caractérisent un milieu marin ou deltaïque. Le littoral de l'époque fourmillait de vie, avec de très nombreux sélaïens (requins et raies), dont on a retrouvé des dents par milliers. Ils nous ont notamment livré quelques restes de mammifères marins : des siréniens (groupe des lamantins et des dugongs) et des archéocètes. Les archéocètes sont des cétacés primitifs connus de l'Éocène au début du Miocène (50-20 millions d'années). Ils fréquentaient les eaux littorales chaudes du Pakistan, d'Égypte et d'Amérique du Nord. Ces animaux étaient déjà adaptés à la vie marine, comme l'indique leur corps allongé dépourvu de membres postérieurs visibles. Cependant, leur membre antérieur et leur denture n'étaient pas encore très spécialisés. L'heure actuelle, le problème de l'origine des cétacés n'est toujours pas résolu : les anthracothères (groupe éteint, peut-être apparenté aux hippopotames) ou, plus probablement, les mésonychidés (groupe fossile) sont toutefois les candidats les plus sérieux.

Un véritable ossuaire

Au cours d'une prospection matinale, après une semaine de terrain, nous avons vu apparaître dans des ravines sableuses un amoncellement de fossiles. Le sol était jonché de restes

osseux gigantesques. Nous avons alors essayé de délimiter la zone fossilifère : celle-ci s'étendait sur des hectares et des hectares. Un bref examen des restes a suffi pour déterminer leur appartenance : un rhinocérotoïde géant, le baluchithère ! Des centaines d'éléments crâniens, dentaires et post-crâniens s'offraient à nous. Après tant de temps nous avons vraisemblablement retrouvé le gisement original de *Paraceratherium* signalé par Pilgrin et Forster-Cooper au début du siècle.

Dans les collections du *Natural History Museum*, à Londres, les seuls spécimens signalés comme provenant de Chur Lundo appartiennent au baluchithère, à l'exception de deux symphyse et mandibulaires d'un autre rhinocérotoïde, *Chilotherium smithwoodwardi*. La faune associée à *Paraceratherium* dans les Bugti était donc inconnue et le deuxième but de notre mission était de la découvrir.

Ces dépôts-là sont plutôt d'origine fluviale. Les animaux ont été emportés par une ou plusieurs crues, tandis que d'autres ont été la proie des prédateurs. Reconstituons l'environnement tropical et enchanteur où vivait le baluchithère : d'innombrables troncs de palmiers fossiles jonchent aujourd'hui le sol sableux, le plus souvent couchés (certains troncs dépassent les 10 mètres de long), mais parfois en place, avec les racines. Des

fruits fossilisés, proches de ceux des *Nipa* (palmiers actuels des mangroves de Malaisie), ont également été découverts. Là, les baluchithères côtoyaient d'autres rhinocéros de taille plus modeste, des ruminants, des suoidés (le groupe des sangliers et des pécaris) et des représentants de groupes aujourd'hui disparus, comme les schizothères (lointains cousins éteints de chevaux et des rhinocéros, munis de griffes) et les anthracothères. Les reptiles étaient présents, et bien présents puisque les sédiments regorgent de plaques dermiques de tortues (aquatiques et terrestres) et de crocodiles. La prédation semble d'ailleurs essentiellement avoir été le fait des derniers. Les restes en sont très abondants. Deux groupes sont présents dans les gisements de la région avec des crocodiles géants, qui atteignent environ 15 mètres de long (deux fois comme ceux du Nil), et des gavials de la taille de ceux du Gange (crocodiles piscivores actuels). Les restes attribuables à des mammifères prédateurs (carnivores et créodontes) sont encore plus rares : quelques dents et os isolés seulement.

La faune de ce gisement indique dans son ensemble un âge oligocène (environ 8 millions d'années), bien antérieur à l'âge miocène classiquement admis pour les dépôts de la région (20 millions d'années). En outre, aucune espèce de cachet miocène n'a été découverte dans ces niveaux à baluchithères. Il faut monter de près de 50 mètres dans la série sédimentaire pour retrouver les premiers restes de mastodontes et autres dinotheres, typiquement miocènes. De ce fait, *Paraceratherium* n'a pas pu disparaître à cause de la compétition écologique avec les mastodontes, classiquement considérés comme leurs concurrents dans la même niche écologique : les baluchithères avaient disparu des collines bugti bien avant l'arrivée par dispersion des premiers mastodontes miocènes.

Un squelette reconstitué sur place

Depuis la mise au jour de quelques squelettes partiels de baluchithères, dans la première moitié du XX^e siècle, respectivement en Mongolie et au Kazakhstan, aucune découverte n'avait

permis de nouvelle reconstitution. Le premier squelette partiel, découvert à Hsanda Gol en Mongolie, a d'abord été attribué à *Baluchitherium grangeri* par les paléontologues américains Walter Granger et William Gregory en 1936, avant d'être rebaptisé *Indricotherium transouralicum*. Ces auteurs ont opéré une reconstitution graphique, d'après les quelques éléments associés d'un même individu et en extrapolant les dimensions des restes manquants. Cette reconstitution, souvent reproduite dans les manuels, est malheureusement erronée : le cou est trop court, les membres trop raides et les proportions du membre antérieur fortement mésestimées.

En revanche, un squelette d'*Indricotherium transouralicum* provenant de Chelkar Tenis, au Kazakhstan, complet à 40 pour cent, a été mieux traité : ce que nous avons pu observer au Pakistan est en effet bien plus proche de la reconstitution qu'en a proposée Vera Gromova en 1959. Le squelette completé est d'ailleurs exposé dans la galerie de paléontologie du Musée de l'Académie des sciences de Moscou. Enfin, le magnifique tableau de Zdenek Burian, exposé au Muséum de Prague depuis 1957, montre un groupe de baluchithères en train de manger le fût d'un arbre. L'allure générale est respectée mais le membre antérieur est toutefois trop gracile.

Comme les restes crâniens, dentaires et du squelette appendiculaire étaient complètement désarticulés dans le gisement de Lundo Chur, nous avons décidé de récolter des spécimens afin de reconstituer un squelette composite de *Paraceratherium*. Puis nous sommes retournés à Dera Bugti, chargés d'une tonne d'ossements environ. Là, le squelette a été reconstitué, à même le sol, sur une bâche. Nous savons désormais que ces rhinocéros géants avaient en moyenne cinq mètres au garrot (5,5 mètres au musée), pour environ huit mètres de long. L'allure générale était plutôt celle d'un okapi très massif, avec une tête de cheval et une lèvre supérieure probablement préhensile (pour attraper les feuilles d'arbres composant leur régime alimentaire). Le dos est en pente. Le membre antérieur beaucoup plus long et puissant que le membre postérieur. Quelques spécimens récoltés l'an dernier appartenaient manifestement à des individus plus grands encore, atteignant probablement jusqu'à six mètres au garrot

et neuf mètres de long. Un adulte moyen devait peser environ 15 à 20 tonnes.

La denture suit à la fois le schéma des tapirs et des rhinocéros : la denture antérieure (incisives et canines) est complètement développée, comme chez les tapirs, tandis que les molaires et les prémolaires ont des couronnes peu spécialisées, de type rhinocéros. On peut penser que leur régime alimentaire se composait de feuilles, de jeunes pousses et de branchages au fût des arbres.

Les restes mis au jour au cours de notre expédition correspondent à plus d'une vingtaine d'individus, allant du nouveau-né au vieillard. L'énorme variation de taille perceptible sur les restes de ce gisement avait le plus souvent été interprétée comme la preuve de la présence de plusieurs espèces de baluchithères associées (notamment Forster-Cooper, avec quatre espèces décrites successivement dans le seul gisement de Chur Lando : *Paraceratherium bugtiense*, *Thaumastotherium osborni*, *Baluchitherium osborni*, *Paraceratherium churlandensis*). Il nous semble beaucoup plus probable que ces différences soient en réalité l'expression de la variabilité individuelle. D'autre part, le dimorphisme sexuel, fondé notamment sur la taille, comme chez la plupart des grands mammifères herbivores fossiles et actuels, contribue certainement à cette variabilité.

Des prédateurs à la mesure de leurs victimes

De nombreux os d'herbivores portent des empreintes coniques à leur sur-

face. Celles-ci correspondent aux traces laissées par des dents de crocodile... Même les baluchithères, qu'on imagine invulnérables en raison de leur corpulence, n'ont pas été épargnés. Il faut dire que ces mammifères géants avaient des prédateurs géants : des crocodiles d'une quinzaine de mètres de long, deux fois comme ceux du Nil ! D'autres os ont manifestement séjourné dans des estomacs. Leur aspect poli, corrodé, est caractéristique de l'attaque acide des sucs gastriques.

Si l'on sait ce que mangeaient les crocodiles, qu'en est-il des herbivores ? Un moyen simple existe, qui consiste à récolter les excréments fossiles, les coprolithes. Un traitement chimique permet de dissoudre le phosphate de calcium des coprolithes et de ne conserver que les spores et les pollens. Ceux-ci indiquent les mets préférés des herbivores, ainsi que les essences de la région. Même les coprolithes des carnivores contiennent, en plus faible concentration, des spores et des pollens issus de leur environnement, et aussi de l'estomac de leurs victimes... Les coprolithes ne sont pas toujours attribuables à un groupe animal précis, mais dans le cas des baluchithères, c'est différent : le critère de taille est de poids ! Les plus grands mammifères terrestres ayant jamais vécu ont également produit les plus gros coprolithes.

L'extinction de ces géants paraît intimement liée aux changements environnementaux intervenus à la fin de l'Oligocène et auxquels ils n'ont pu s'adapter assez vite. Nul besoin d'une pluie d'astéroïdes quand la nourriture vient à manquer !

Jean-Loup WELCOMME est correspondant du Muséum national d'histoire naturelle à Paris. Pierre-Olivier ANTOINE est étudiant au Muséum national d'histoire naturelle à Paris. Laurent MARIVAUX est étudiant à l'Institut des sciences de l'évolution de l'Université de Montpellier.

C. FORSTER-COOPER, *Paraceratherium bugtiense*, a new genus of Rhinocerotidae from the Bugti Hills of Baluchistan. Preliminary notice, in *Annual Magazine of Natural History*, vol. 8, pp. 711-716, 1911.

W. GRANGER et W. GREGORY, *Further Notes on the Gigantic Extinct Rhinoceros, Baluchitherium...*, in *Bulletin of the American Museum of Natural History*, vol. 72, pp. 1-71, 1936.

V. GROMOVA, *Rhinocéros gigantesques*, Travaux de l'Institut paléontologique de l'Académie des sciences de l'URSS, vol. 71, pp. 1-104, 1959 (en russe).

S. MATTHEWSON, *The Tigers of Baluchistan*, 2^e édition, Oxford University Press (Karachi), 211 pages, 1997.

J.-L. WELCOMME et al., *Nouvelles découvertes de Vertébrés miocènes dans le synclinal de Dera Bugti (Balouchistan, Pakistan)*, in *CRAS, Sciences de la Terre et des planètes*, vol. 325, pp. 531-536, 1997.

J.-L. WELCOMME et L. GINSBURG, *Mise en évidence de l'Oligocène sur le territoire des Bugti (Balouchistan, Pakistan)*, *CRAS, Sciences de la Terre et des Planètes*, vol. 325, pp. 999-1004, 1997.

Des solides coulants

PHILIPPE COUSSOT • HENRI VAN DAMME • CHRISTOPHE ANCEY

Dans l'écoulement des pâtes granulaires, comme le béton frais, la viscosité peut varier brusquement. La répartition du liquide et l'évolution des contacts entre les grains expliquent ce comportement étrange.

Les sables mouvants de la Loire ne rendent pas leur proie...

Balzac

Les sables mouvants, ceux de la Loire ou de la baie du Mont-Saint-Michel, sont un mélange de sable et d'eau qui engloutissent lentement les objets déposés à leur surface. De tels mélanges ne se comportent ni comme du sable, ni comme de l'eau, mais comme des pâtes qui s'écoulent différemment des liquides. Longtemps, l'étude des pâtes a été négligée ; pourtant, les pâtes sont omniprésentes dans la nature et dans l'industrie : mousse à raser, béton frais, pâte à modeler, mayonnaise ou coulées de cendres sur les flancs des volcans.

Si les caractéristiques des écoulements de pâtes diffèrent selon le matériau, leurs propriétés mécaniques résultent de leur constitution commune : le mélange d'un liquide et de très nombreux grains mous ou durs. Ces grains peuvent être des particules solides (suspension), des bulles (mousse) ou des gouttelettes (émulsion). Lorsque le nombre des grains est faible, le comportement est analogue à celui d'un liquide. En revanche, nous verrons qu'à mesure que le nombre de grains augmente, le comportement se modifie et devient inhabituel : les grains se gênent mutuellement au cours des déformations imposées au mélange.

Les écoulements de pâtes granulaires peuvent être dévastateurs, telles les coulées boueuses, charriant blocs de rochers, graviers et particules argileuses. Les laves volcaniques, où se forment un grand nombre de cristaux lors des changements de température ou de pression, ont des comportements similaires. Les coulées de

cendres volcaniques (lahars) sur le flanc des volcans s'écoulent parfois sur de grandes distances (voir la figure 1).

Tous les écoulements de pâtes granulaires ne sont pas catastrophiques. Ces matériaux sont très utiles dans l'industrie quand il s'agit de mélanger, de mettre en forme un produit ou d'obtenir des écoulements particuliers. La maîtrise des effets mécaniques de l'entassement des grains est alors un enjeu crucial. Comment faire pour que la mousse à raser reste fixée sur le visage de l'utilisateur ? Comment obtenir un béton qui reste liquide lors de l'injection, mais suffisamment résistant après sa prise ? Comment faire pour qu'un bonhomme en pâte à modeler ne s'effondre pas sur lui-même et qu'il ne se casse pas non plus lorsque l'on cherche à le remodeler ? Quelle doit être la viscosité de la mayonnaise pour qu'elle sorte facilement du tube, mais reste figée dans l'assiette ?

La connaissance du comportement de ces matériaux est ainsi doublement importante : pour la prévention des risques naturels et pour l'optimisation des processus industriels. Longtemps négligée, l'étude des pâtes granulaires gagne du terrain depuis que les physiciens ont compris que leur compréhension était au confluent de plusieurs disciplines : mécanique des sols, mécanique des fluides complexes et physique des milieux hétérogènes.

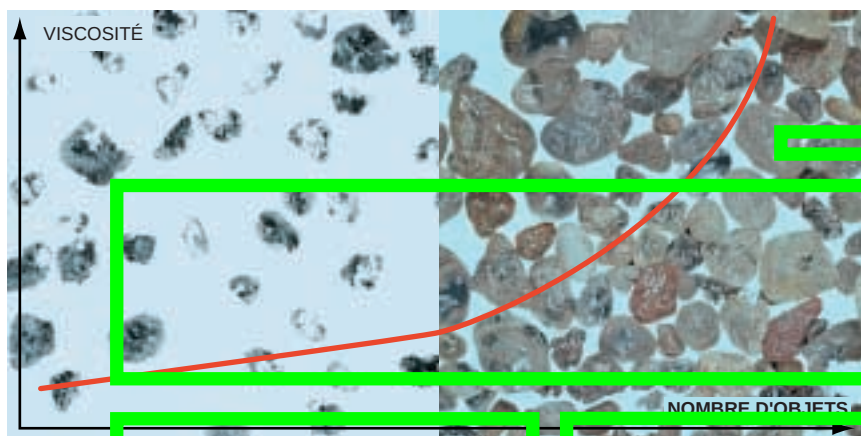
Après avoir examiné comment varie la viscosité d'une pâte en fonction du nombre de grains qu'elle contient, nous verrons que, pour décrire des pâtes très concentrées, il faut tenir compte des contacts entre les grains et du mouvement du fluide interstitiel ; plus précisément, de la configuration des particules, de la

manière dont se transmettent les forces au sein du milieu granulaire, des effets de la migration du liquide entre les grains et de l'éventuelle fracturation de la pâte. Grâce à ces progrès, les physiciens ont compris l'écoulement de ces matériaux dont les brusques variations de viscosité étaient inconnues.

Dans tout ce qui suit, on considérera que les grains dans le liquide sont relativement gros (plus de quelques micromètres), de sorte que ces grains ne sont pas tributaires de l'agitation thermique des molécules du liquide. Cela signifie aussi que deux particules qui s'approchent ne tendent ni à s'agréger en raison des forces attractives à courte distance, dites de Van der Waals, qui agissent sur des petites particules, ni à se repousser sous l'effet des forces électrostatiques qui résultent de la diffusion d'ions inégalement adsorbés à la surface des particules. Nous traiterons uniquement des pâtes granulaires où le phénomène essentiel est un encombrement lié à la taille réelle des particules.

Viscosité jusqu'au blocage

Plus un liquide est visqueux, plus il s'écoule lentement. Ainsi, le miel est plus visqueux que l'huile, elle-même plus visqueuse que l'eau. Peut-on définir une viscosité pour nos pâtes ? Si le volume des grains placés dans le liquide est bien inférieur à celui du liquide, sa viscosité moyenne n'est guère différente de celle du liquide seul. En 1905, Albert Einstein a montré que la différence relative de viscosité du mélange par rapport à celle du liquide vaut 2,5 fois la concentration volumique des grains, c'est-à-dire le rapport du volume occupé par les grains et du volume total du mélange.



2. LORSQU'ON PLACE DES GRAINS, comme des grains de sable, dans un liquide, chacun de ces grains rencontre rarement ses voisins (à gauche). La viscosité du mélange est alors proche de celle du liquide et elle augmente lentement avec le nombre de grains. À partir d'une certaine concentration en grains, le liquide ne peut plus lubrifier les mouvements relatifs. Les grains se gênent lors des déformations (à droite). De surcroît, il se forme un réseau de particules en contact à travers tout le mélange. Dans ces conditions, le mélange ne se comporte plus comme un liquide simple, il possède les propriétés d'une pâte granulaire : notamment sa viscosité augmente très vite avec la concentration en grains.

Ajoutons des grains dans le mélange. Lorsque la concentration volumique dépasse quelques pourcent, la loi d'Einstein n'est plus valable, et la viscosité augmente de plus en plus rapidement. Cela peut être compris intuitivement : pour un volume donné, plus le matériau contient de grains, moins il contient de liquide, de sorte que la facilité des mouvements relatifs des grains diminue. Les forces nécessaires au déclenchement d'un mouvement donné sont alors supérieures : le mélange est d'autant plus visqueux que sa concentration en grains est grande.

À l'extrême, lorsque l'entassement des grains est maximal, les grains ne peuvent plus glisser les uns sur les autres, et la viscosité du mélange devrait tendre vers l'infini ; autrement dit, la pâte ne devrait pas couler. Cette hypothèse est mal vérifiée et ne donne pas la bonne viscosité pour les concentrations proches de la concentration maximale d'entassement (voir la figure 2).

Lorsque l'entassement est maximal, des phénomènes contraires à l'intuition apparaissent. Sur une plage humide, la pression des pas fait disparaître l'eau : le sable se dessèche sous le pied. C'est la manifestation d'une propriété des pâtes concentrées : la «dilatance», mise en évidence en 1885 par le physicien anglais Osborne Reynolds. Remplissant un ballon de baudruche d'un mélange de grains et d'eau, il déforme le ballon. Alors que l'on s'attendrait à ce

que la pression exercée sur cette pâte granulaire fasse sortir le liquide, le niveau d'eau dans le tuyau relié au ballon diminue. En fait, la déformation fait bouger des particules nichées dans les interstices formés par d'autres particules. En sortant de ces niches, ces particules s'écartent, au moins momentanément. La multiplication de ce phénomène au sein du mélange entraîne sa dilatation : l'enveloppe du volume occupé par les particules augmente. Le volume laissé libre pour le liquide augmente donc aussi, d'où la baisse du niveau de liquide dans le tuyau. L'eau sur du sable mouillé se comporte ainsi : elle s'enfonce dans le sol, dans les interstices laissés libres par la dilatation du sable qui résulte de la pression exercée par le pied du promeneur.

En mécanique des fluides, l'effet de dilatance n'était pas pris en compte : à tort, car, à partir d'une certaine vitesse d'écoulement, la viscosité augmente parfois brusquement (d'un facteur pouvant aller jusqu'à dix). Dans les années 1990, des expériences de diffusion de lumière sur des suspensions modèles, constituées de billes identiques, ont montré que, lors de ces sauts de viscosité, il se produisait des transitions ordre-désordre apparentées à une dilatance frustrée. Dans ces expériences, les suspensions concentrées sont entraînées entre deux plateaux mobiles. Lorsque l'on met ces plateaux en rotation, les contraintes dans la suspension engendrent, comme dans le sable mouillé, une dila-

tation. Cependant, le maintien constant du volume empêche la dilatation. Cette dilatance frustrée engendrerait les transitions ordre-désordre des configurations de particules.

Depuis le début des années 1990, les physiciens, notamment Luc Petit et Philippe Gondret, à l'École normale supérieure de Lyon, ont confirmé l'existence de ces modifications d'organisation des particules. Ainsi, la viscosité d'une suspension de billes identiques est inférieure si les particules sont alignées dans des plans qui glissent les uns sur les autres : les plans de glissement «lubrifient» l'écoulement. Ces expériences sur des écoulements modèles, où les particules sont toutes identiques, montrent que ce sont les évolutions de la configuration spatiale des particules qui engendrent les variations du comportement des pâtes. Il doit en être de même pour les pâtes naturelles, aux grains de tailles différentes.

En s'appuyant sur ces observations, les hydrodynamiciens pouvaient encore considérer les pâtes ou les suspensions comme des liquides classiques. À faible vitesse, la viscosité était proportionnelle à la concentration, de même qu'à grande vitesse, mais avec un coefficient différent. Dans ces deux régimes, correspondant à deux configurations spatiales, la proportionnalité subsiste. Les hydrodynamiciens extrapolèrent ce comportement newtonien à toutes les pâtes granulaires, même les pâtes concentrées. Or, dans ces dernières, la prise en compte des interactions entre grains modifie cette vision.

Contacs des grains et distribution des forces

Depuis longtemps, les mécaniciens des sols avaient observé que la force nécessaire pour déformer un sol granulaire humide est à peu près proportionnelle à la pression appliquée. Ce résultat exprime la loi de Coulomb : lorsqu'un bloc solide glisse sur un plan incliné, le frottement – la résistance au mouvement – est proportionnel au poids du bloc. Extrapolons ce résultat à une pâte granulaire que l'on déforme. La force normale entre deux grains en contact est en moyenne égale au poids de matériau situé au-dessus d'eux. En essayant de déduire une loi de comportement macroscopique à partir de cette hypothèse et

en supposant que tous les grains sont en contact, les physiciens n'arrivaient pas à décrire la proportionnalité observée expérimentalement. La distribution des forces au sein du mélange devait être plus complexe.

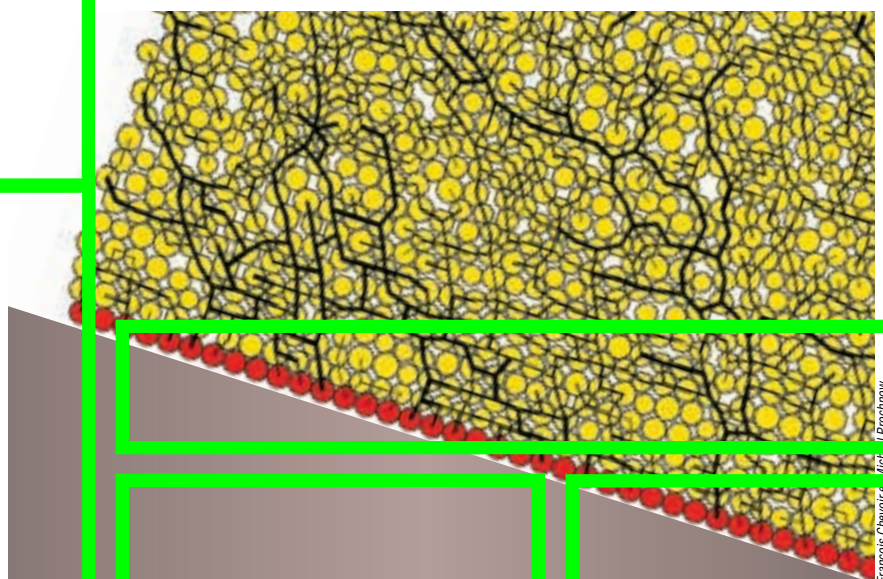
Dans les années 1950, le physicien français Pierre Dantu a étudié la distribution des forces au sein d'un ensemble de disques. Lors de déformations de ce milieu test, les disques étaient plus déformés dans des directions particulières : la transmission des forces se faisait selon des chemins préférentiels.

Plus récemment, des simulations numériques ont permis de quantifier le phénomène. Ainsi, à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles, Farhang Radjai a montré que des chaînons de force transmettent la plus grande partie des efforts à travers le mélange et, à côté de ces chaînons principaux, des branches secondaires de contact, mieux réparties dans le mélange, transmettent des forces nettement inférieures. Autrement dit, les branches secondaires sont constituées de particules assez mobiles (qui dissipent donc de l'énergie) et qui sont soumises à peu de contraintes. À l'inverse, les branches de contraintes principales sont composées de particules en contact prolongé et encaissent de ce fait des forces importantes.

En poussant l'analogie, la pâte granulaire qui se déforme pourrait être comparée à un liquide dense placé dans un réseau solide : la pression hydrostatique est alors transmise par la « friction liquide », tandis que les contraintes de cisaillement résultent de forces transmises par le « réseau solide » de particules en contact.

Par une technique analogue, François Chevoir et Michael Prochnow, du Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil de Champs-sur-Marne, ont montré que ce « réseau » de forces apparaît aussi au sein d'écoulements granulaires secs sur un plan incliné. Toutefois, dans ces écoulements, les forces sont mieux réparties (voir la figure 3).

D'autres expériences sur des mousses, matériaux dont les objets ne sont pas les grains mais des bulles, ont donné des résultats analogues. À l'Université de Californie, Anthony Gopal et Douglas Durian ont éclairé des mousses. En analysant la lumière transmise, ils ont montré que, lorsque la déformation des mousses est faible,



3. SIMULATION D'UN ÉCOULEMENT DE DISQUES sur un plan incliné. L'intensité des forces entre les disques est représentée par des traits d'épaisseur proportionnelle au logarithme de l'intensité. La répartition des forces forme un chemin très hétérogène. Les forces se répartissent sur une large gamme d'intensité, mais certains chemins « encaissent » l'essentiel des efforts.

quelques bulles seulement sont déformées de manière irréversible, les autres ne sont soumises qu'à des déformations élastiques réversibles. En extrapolant ce résultat à des écoulements, où les déformations sont importantes, on estime que seules quelques bulles encaissent l'essentiel des efforts transmis au sein du réseau de bulles en contact.

Ainsi, au sein des suspensions granulaires concentrées, d'autres effets que l'écoulement purement hydrodynamique sont importants, notamment l'apparition de réseaux de grains. Ces réseaux agissent sur le comportement des pâtes, en particulier lorsqu'ils s'étendent d'un bout à l'autre de l'écoulement. Dans ce cas, le réseau de contact peut imposer son comportement à la pâte granulaire, d'où des blocages de l'écoulement.

Toutefois, les contacts ne sont pas toujours directs. Notamment, le liquide peut être en mouvement relatif par rapport aux grains, ce qui modifie leurs interactions.

Du liquide qui allège

Dans une suspension, les particules subissent la poussée d'Archimède, de sorte que la force qu'elles exercent lorsqu'elles glissent les unes sur les autres, liée à leur poids, est diminuée. Le liquide interstitiel abaisse donc la résistance à la déformation d'un milieu granulaire saturé en liquide

(qui ne comporte pas de bulles d'air). Par exemple, un terrain en pente qui s'humidifie progressivement peut se mettre en mouvement sans modification préalable de l'arrangement des particules. En s'humidifiant, les grains qui constituent ce sol deviennent « moins lourds », alors que la force d'enracinement, qui correspond à la composante du poids du mélange le long de la pente, ne varie pas. Les glissements sous-marins, l'équivalent sous les mers ou les océans des glissements de terrain, s'écoulent ainsi sur des pentes bien plus faibles que sur terre.

L'effet que nous venons de décrire est un effet statique, mais lorsque le liquide interstitiel est animé d'un mouvement différent de celui du réseau de particules, le résultat peut être plus dramatique encore. Imaginons un réseau de grains en contact bloquant la pâte. Le liquide va alors s'écouler dans l'espace laissé libre par les grains, assimilable à un réseau de conduites enchevêtrées. Comme l'écoulement d'un liquide à travers un tuyau est freiné par les frottements visqueux, l'écoulement nécessite l'application d'une différence de pression entre les extrémités. Ainsi, dans le réseau où circule le liquide, la pression augmente vers l'amont. C'est la loi de Darcy, établie au XIX^e siècle par cet ingénieur chargé de l'alimentation en eau de la ville de Dijon. Cette variation de pression au sein du

liquide engendre une contrainte supplémentaire sur les particules.

Si, pour des raisons géométriques, le flux d'eau est au moins en partie orienté du bas vers le haut, cette variation de pression peut même engendrer une force qui s'oppose à la force d'ap-

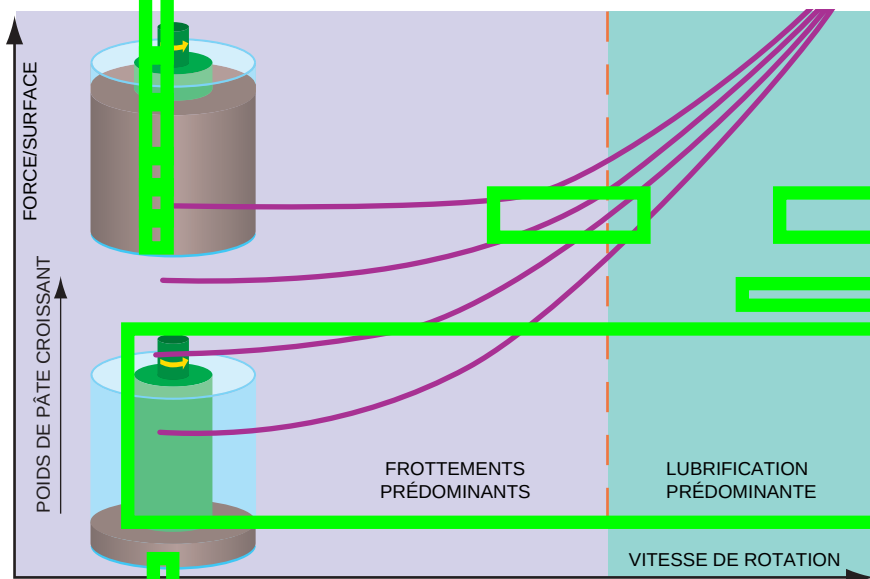
pui mutuelle liée au poids des particules. Dans ce cas, le glissement entre deux particules se fait sans effort : le mélange perd toute résistance à la déformation. Ce phénomène est l'une des causes des sables mouvants. La destruction des barrages en remblai

résulte des mêmes mécanismes. En circulant à travers le pied du barrage, l'eau «liquéfie» la masse granulaire qui s'érode à l'aval du remblai, ce qui peut détruire l'ouvrage.

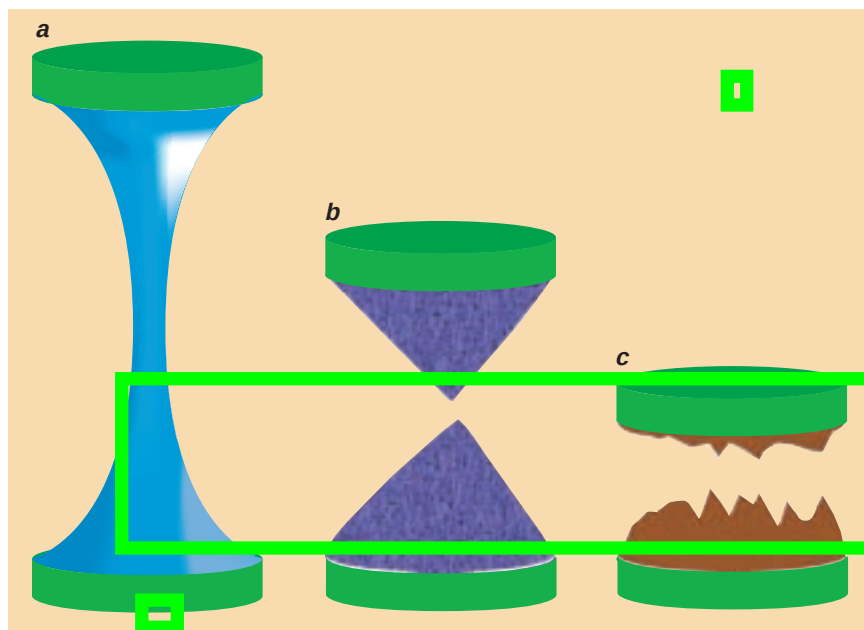
Ce mouvement du liquide par rapport aux grains amène des comportements contraires à l'intuition. La pose de carrelage à l'aide de mortier en est un exemple. On pose une certaine quantité de mortier au centre de la surface où l'on va placer le carreau, puis, en appuyant sur le carreau, on étale la couche de mortier. Contre toute attente, il est nettement plus facile d'écraser le mortier rapidement que lentement. L'explication est simple : l'écoulement de l'eau à travers la matrice granulaire et l'écoulement d'ensemble de la pâte sont en concurrence. Lorsque la pression est faible, le passage de l'eau à travers le squelette granulaire, plus aisé et plus rapide que l'étalement de la pâte, se fait d'abord. Le mortier exsude son eau et, très rapidement, c'est une couche de grains presque secs que l'on doit écraser, avec toutes les difficultés que l'on sait ! En revanche, en appliquant un effort initial violent, l'écoulement de la pâte dans son ensemble (eau et grains) est plus facile et plus rapide : on écrase la couche de mortier jusqu'à ce qu'elle recouvre complètement la surface voulue. Ces phénomènes se manifestent également, avec des conséquences plus graves, dans la mise en forme de pâtes de céramique ou de ciment par extrusion. On force la pâte à traverser une filière (cylindre creux) dont la section lui donne la forme souhaitée. Si la vitesse d'extrusion est mal adaptée et que l'exsudation commence, l'écoulement se bloque et la filière explose.

La lubrification disperse

Ainsi, selon sa vitesse, le liquide interstitiel peut déclencher l'écoulement ou, au contraire, le ralentir, voire le bloquer, mais des effets plus subtils apparaissent lorsque la pâte granulaire s'écoule. Lors de l'écoulement, les grains ont parfois tendance à s'écarter. Ce phénomène résulte de la lubrification par une fine couche de liquide. La distribution de pression au sein du liquide cisailé entre deux corps qui glissent l'un contre l'autre est alors telle que le liquide tend à les écarter. La force à appliquer pour rapprocher l'un de l'autre deux grains plats au sein d'un liquide augmente



4. MESURE DE LA LOI DE COMPORTEMENT d'une pâte granulaire. Une pâte granulaire est placée entre deux cylindres mobiles. À faible vitesse, la pâte granulaire se comporte à peu près comme un tas de sable : la force par unité de surface à appliquer pour déclencher la rotation est proportionnelle au poids de matériau (à la hauteur de pâte). En revanche, à grande vitesse, le comportement de la pâte est analogue à celui d'un liquide simple : la force nécessaire pour la mise en rotation est seulement proportionnelle à la vitesse d'écoulement. À grande vitesse, les particules n'ont pas le temps de recréer le réseau de contacts directs à l'origine de la résistance de la pâte aux faibles vitesses.

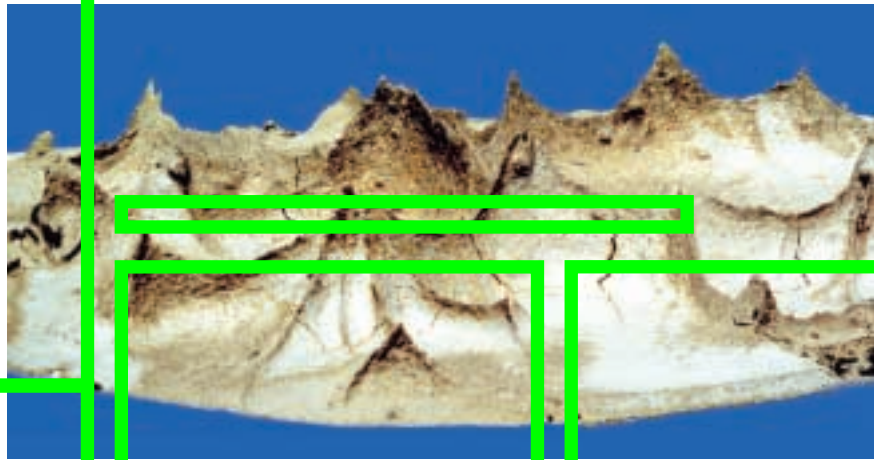


5. LORSQUE L'ON ÉTIRE UNE PÂTE FINE CONCENTRÉE, celle-ci a tendance à se fracturer (c), alors qu'un liquide simple s'allonge indéfiniment si son poids ne joue aucun rôle (a). Une pâte constituée de gros grains ou peu concentrée a un comportement intermédiaire : elle se déforme d'abord continûment, puis elle se sépare rapidement en deux mottes (b). Ce phénomène se produit lors de la préparation d'une pâte à tarte : si l'on ajoute un peu de farine, on obtient un mélange trop liquide qui s'étale ou s'étire facilement sans se fracturer ; avec trop de farine, la pâte se fracture rapidement dès qu'on la manipule.

quand leur distance diminue (expérience facile à réaliser dans son bain). Pour deux grains parfaitement lisses, cette force est proportionnelle à la vitesse de rapprochement et à l'inverse de la distance qui les sépare.

Cette dispersion des particules due à la lubrification intervient, par exemple, lors de la remise en suspension de particules, lorsqu'un liquide en écoulement entraîne des particules entassées au fond d'un récipient ou lorsqu'un torrent entraîne des particules de son lit. Dans ce cas, la concentration des particules au sein du liquide est très hétérogène. Dans un mélange concentré, la concentration ne peut pas varier sensiblement, et cette hétérogénéité frustrée engendre des conséquences semblables à celles d'un changement de configuration.

L'un de nous (C. Ancey) a récemment mis en évidence une transition de comportement d'une pâte granulaire qui résulte de cet effet. Entre deux cylindres coaxiaux, il a placé un mélange concentré de liquide et de billes de verre, puis il a mis les cylindres en rotation. Le mélange était

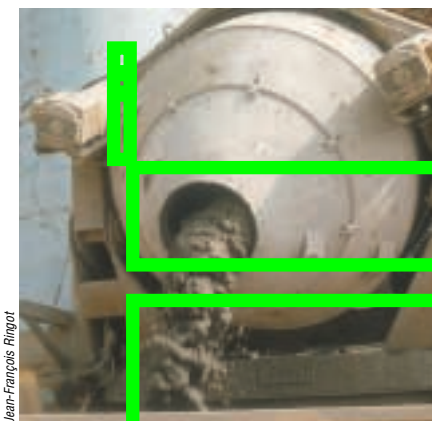


6. FRACTURE D'UNE PÂTE GRANULAIRE par arrachement

ainsi cisailé entre les cylindres. Aux faibles vitesses de rotation, le couple qu'il faut appliquer au cylindre intérieur par unité de surface de mélange pour mettre l'ensemble en rotation est proportionnel à la hauteur de la pâte (voir la figure 4). Cela indique que l'énergie fournie par l'expérimentateur pour faire tourner le cylindre en contact avec la pâte sert essentiellement à compenser les frottements des particules les unes sur les autres.

La résistance au frottement de deux particules augmente en effet avec la force qui tend à les maintenir en contact, elle-même proportionnelle à la hauteur de mélange situé au-dessus de ces particules. Aux faibles vitesses, la force à exercer est proportionnelle à la hauteur de la pâte, et cette pâte se comporte un peu comme un sol granulaire pour lequel la résistance au cisaillement est proportionnelle à la pression exercée.





Jean-François Rigot

7. DANS CERTAINS BÉTONS, un réseau de contacts directs entre grains de sable et de cailloux leur confère les propriétés d'une pâte granulaire.

À des vitesses supérieures, la pâte réagit autrement : le couple des forces par unité de surface de mélange nécessaire à la mise en rotation de l'ensemble ne dépend pas de la hauteur de pâte. De surcroît, ce couple est proportionnel à la vitesse. Cela correspond au comportement d'un fluide classique (newtonien) pour lequel les efforts à fournir sont proportionnels à la vitesse d'écoulement. Dans ce cas, les particules sont maintenues à distance (aussi faible soit-elle) les unes des autres par de fines couches de liquide. Le liquide interstitiel impose son comportement à l'ensemble de la pâte, puisque c'est lui qui est sollicité lors des mouvements relatifs des particules. Cette transition de comportement peut paraître ardue, voire simpliste ; pourtant elle établit un pont crucial entre la mécanique des sols, où les grains imposent leur comportement, et la mécanique des fluides, où le liquide dicte sa loi.

Suspensions concentrées

Au sein des pâtes à grains fins, le liquide ne peut plus migrer facilement, car le réseau de conduites formées par les vides laissés par les grains est trop étroit : quelques micromètres de diamètre tout au plus. Or, la différence de pression à appliquer pour déclencher un écoulement dans une conduite est inversement proportionnelle au rayon de la conduite à la puissance quatrième. Dans les conditions ordinaires de déformation du mélange, où les pressions sont peu élevées, la circulation du liquide à travers ce réseau est lente.

Ces matériaux à grains fins ont alors un comportement particulier. Dans un

premier temps, ils se comportent comme des fluides : à seuil, c'est-à-dire que, lorsqu'on les étale sur un plan inclinable, l'écoulement ne se déclenche qu'au-dessus d'un seuil d'inclinaison. Le réseau de particules solides ou enchevêtrées rigidifie l'ensemble. En revanche, après un temps de repos, ces pâtes sédimentent de sorte que l'on voit apparaître une couche de liquide à leur surface : la matière solide s'est tassée. Ainsi, la structure, que l'on croyait rigide, peut s'effondrer sur elle-même.

Ces pâtes à grains fins peuvent aussi se fracturer facilement. Imaginons l'expérience simple suivante : on écrase d'abord une couche de pâte (sans exsudation entre deux plateaux, puis on écarte les plateaux progressivement (voir la figure 5). C'est par exemple ce que nous faisons lorsque nous ne sommes pas satisfaits de l'emplacement d'un carreau de faïence qui vient d'être posé et que nous le retirons. Avec un liquide ordinaire, ce geste engendre l'écoulement de la couche liquide vers le centre des plaques et il se forme un filet fluide qui s'étire de manière continue et finit par se rompre (comme une goutte d'huile étirée entre le pouce et l'index). Dans le cas d'une pâte granulaire suffisamment concentrée et fine, l'évolution est brusque : après le début de l'écoulement, la couche se fracture sur toute sa surface ; les deux surfaces de fracturation ressemblent alors à des massifs montagneux (voir la figure 6). Pourtant tout enfant sait qu'il est possible d'étirer continuellement un cylindre de pâte à modeler sans le fracturer. Il suffit d'écraser en même temps latéralement le cylindre, de même qu'un cuisinier étale une pâte à tarte progressivement avec un rouleau. Cette technique a cependant l'inconvénient de consommer beaucoup d'énergie.

Comment expliquer cette différence de comportement ? Lors d'un étirement, les particules solides se gênent mutuellement, car la place est restreinte et les modifications de configuration sont difficiles compte tenu de la migration trop lente du liquide. L'écartement des plaques engendre une dépression dans la couche, d'autant plus importante que l'épaisseur de la couche est faible et que la vitesse d'écartement des plaques est élevée. Cette dépression peut devenir si grande qu'elle déclenche un phénomène de cavitation au sein du liquide (lorsque l'on tire sur un liquide, on écarte les

molécules au point de le transformer en gaz : c'est la cavitation). Il se forme alors des bulles de vapeur ou d'air. Cette cavitation démarre en de nombreux endroits. La coalescence de ces cavités à l'intérieur du matériau brise la pâte en deux fragments.

En revanche, si l'on fournit suffisamment l'énergie afin que les particules puissent se réarranger continuellement à mesure de l'étirement, la fracturation ne se produit pas. À l'inverse, quand on cherche à former une seule boue avec deux morceaux de pâtes à modeler, on ne perçoit plus aucune trace de la séparation initiale en deux morceaux, à condition de bien malaxer la pâte. Pourtant, si l'on colle l'un contre l'autre les deux morceaux sans malaxage, cette trace subsiste longtemps. Le malaxage de la pâte aide la migration du liquide, ce qui réorganise le réseau de particules, en faisant notamment s'interpénétrer les deux réseaux.

L'étude de l'écoulement de pâtes granulaires aux comportements en apparence différents fait apparaître une unité des mécanismes physiques. C'est la collaboration de chercheurs de spécialités variées qui a permis l'identification de cette unité. Les pâtes fascinent par ces comportements étranges dont les sables mouvants ou les écoulements de cendres sont les manifestations les plus dramatiques. Même un simple mélange d'eau et de farine de maïs permet d'obtenir un comportement étrange : en apparence liquide, ce mélange semble solide lorsqu'on le heurte. Toutefois, outre les mécanismes décrits dans cet article, ce comportement fait intervenir des effets colloïdaux. C'est la meilleure compréhension de tous ces mécanismes qui permettra, par exemple, de mieux couler du béton (voir la figure 7) ou de canaliser les écoulements de cendres.

Philippe COUSSOT est chercheur au Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil de Champs-sur-Marn (EDPC-CNRS). Henri VAN DAMME est physicien au Laboratoire de physico-chimie macromoléculaire de l'ESPCI. Christophe ANCEY est chercheur au Centre de Grenoble.

Ph. COUSSOT et Ch. ANCEY, *Rhéophysique des pâtes et des suspensions*, EDP-Sciences, 1999.

J. DURAN, *Sables, poudres et grains*, Eyrolles, 1997.

Astéroïdes et comètes : des tas de cailloux

ERIK ASPHAUG

Les astéroïdes menacent la Terre, mais ils détiennent des informations précieuses sur l'origine des planètes.

Au début de la conquête spatiale, personne n'avait entendu parler des astéroïdes. Les astronomes connaissaient mal ces petits corps célestes. Aujourd'hui, on commence tout juste à comprendre de quoi ils sont faits et comment ils se sont formés. Cependant, leur comportement reste énigmatique.

Bien qu'aucune sonde n'ait observé un astéroïde de près, on pense que les plus gros sont des versions miniatures et cabossées de la Lune. La pesanteur y est réduite : quand le diamètre est inférieur à quelques dizaines de kilomètres, elle est trop faible pour leur donner une forme sphérique, et ils ressemblent alors à un haricot sec, à une molaire, à une cacahuète... En raison de cette irrégularité, les objets peuvent même être attirés vers d'autres directions que celle du centre de masse. De surcroît, leur rotation parfois complexe contribue à produire des effets contraires à l'expérience quotidienne : sur certains astéroïdes, le bas n'est plus le bas, on y «tomberait» parfois vers le sommet d'une montagne, et des sauts trop vigoureux conduiraient soit dans l'espace infini, soit sur une orbite chaotique qui, après plusieurs jours, ramène en un endroit complètement imprévisible de la surface. Un caillou que l'on jette devant soi peut retomber sur la tête. Un petit saut conduit parfois à 100 mètres de la position initiale, voire modifie la forme de l'astéroïde. Le plus discret des visiteurs laisserait sur son passage un nuage de poussière qui subsisterait pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines.

Des sondes spatiales, telle NEAR (*Near Earth Asteroid Rendezvous*, soit «rendez-vous avec un astéroïde proche

de la Terre»), mise en orbite autour d'un astéroïde, améliorent notre compréhension de ces objets déroutants. Toutefois, malgré quelques observations lors du passage occasionnel de tels objets à proximité de la Terre, nous connaissons moins bien les astéroïdes (et les comètes, leurs cousines) que nous ne connaissons la Lune à l'aube de l'exploration spatiale. Ces petits corps sont le théâtre d'interactions subtiles entre des forces mineures, dont aucune n'est négligeable ni facile à simuler sur la Terre. Sont-ils solides ou constitués de cailloux agglomérés? Quelle est leur composition? Comment survivent-ils aux collisions avec les autres corps de petite taille? Une sonde ou un astronaute pourraient-ils s'y poser?

Des gâteaux mal cuits

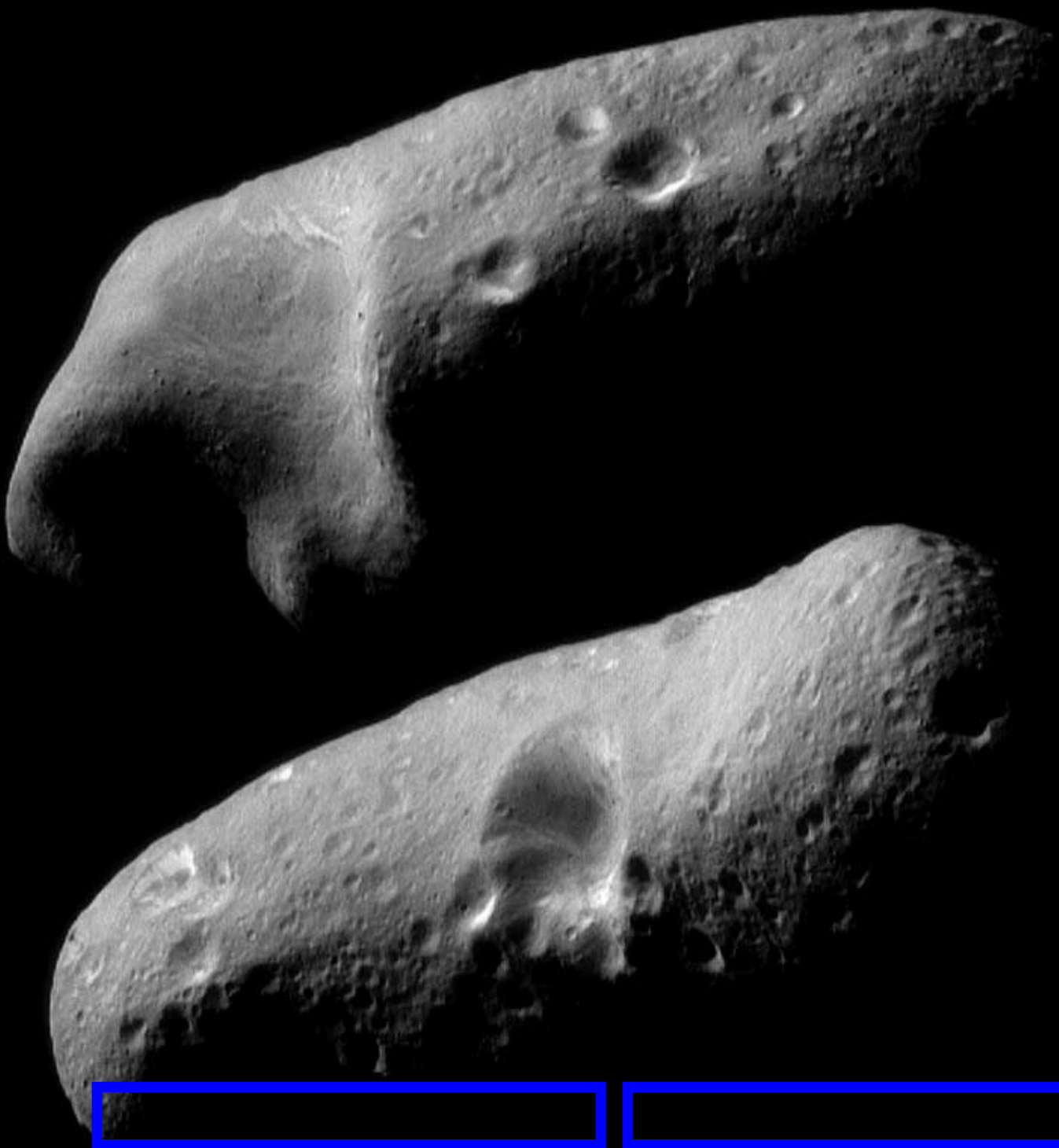
À la fin des années 1980, les astéroïdes n'étaient encore que des points lumineux (environ un millier) formant une ceinture entre Mars et Jupiter ; on en connaissait quelques-uns plus près de la Terre et l'on savait leur parenté avec les comètes, venues des confins du Système solaire. Comme leur couleur et leur luminosité variaient périodiquement, on avait déduit que ces corps avaient des formes irrégulières et une taille comprise entre celle d'une maison et celle d'un pays, avec une période de quelques heures à quelques jours.

Les analyses et observations des dernières décennies ont précisé les idées. En général, les astéroïdes proches de Mars et de la Terre sont faits de roches et de fer, tandis que les astéroïdes proches de Jupiter, sombres et rouges, semblent avoir une composition plus «primitive», c'est-à-dire ana-

logue à celle de la nébuleuse à partir de laquelle les planètes se sont formées, il y a 4 566 milliards d'années. La date de cette coalescence des planètes, naguère incertaine, a été précisée par l'analyse des isotopes du plomb (les produits de la désintégration radioactive de l'uranium) dans les plus vieilles météorites. En fait, on a longtemps pensé que ces roches tombées du ciel étaient des fragments d'astéroïdes ; la comparaison du spectre lumineux émis par les météorites et les astéroïdes a confirmé cette intuition.

De fait, de nombreux astronomes ont pensé que l'on éluciderait l'histoire du Système solaire si l'on observait les astéroïdes au télescope et si l'on analysait les météorites. La mise en œuvre de ce programme a été difficile, mais elle a conduit à une théorie bien acceptée de l'histoire du Soleil et de son cortège de corps. La formation des planètes à partir d'une nébuleuse de gaz et de poussières a commencé avec l'aggrégation de grains minuscules en «planétésimaux», les briques élémentaires des planètes. Au-delà de Mars, l'attraction exercée par Jupiter a bloqué la croissance de ces corps, dont le diamètre s'est estimé inférieur à 1 000 kilomètres. Les fragments qui ne se sont pas agglomérés sont devenus les astéroïdes.

Les plus grosses de ces planètes «ratées» ont accumulé suffisamment de chaleur interne pour se «différencier» : les métaux, plus denses que les roches, ont été attirés vers l'intérieur formant peut-être un noyau, dans certains cas. Des roches ont fondu, et des éruptions volcaniques se sont produites sur certains corps. Aucun astéroïde n'est assez gros pour retenir une atmosphère, mais les minéraux



1. AVEC SON GROS CRATÈRE (en bas), l'astéroïde Éros mesure 33 kilomètres de longueur. Sur la face opposée, la dépression en forme de selle de cheval (en haut, à gauche) présente de nombreuses marques

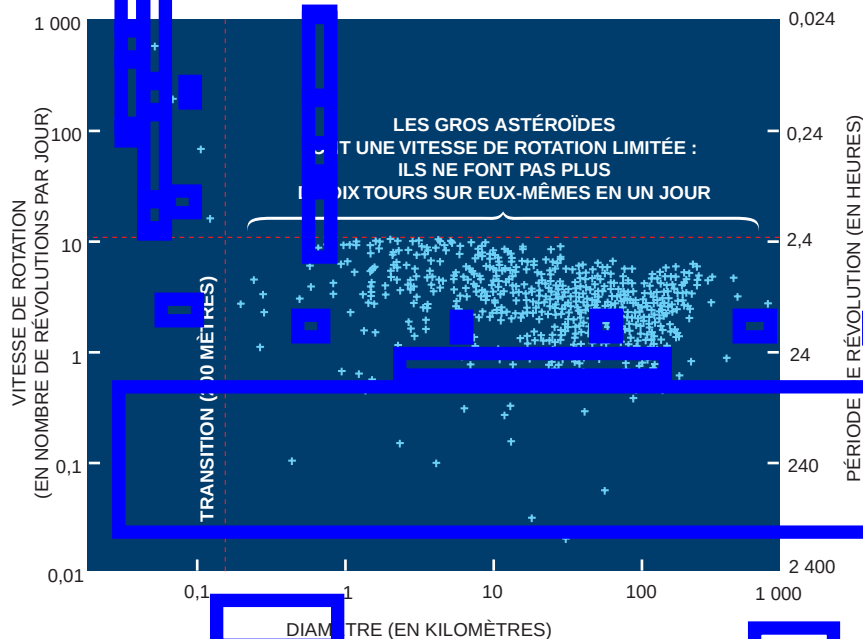
inexpliquées. Grâce à des images comme celles-ci, les astéroïdes, qui étaient autrefois des points lumineux mystérieux, sont aujourd'hui des mondes que l'on explore.

hydratés de certaines météorites révèlent qu'ils ont été formés de l'eau liquide.

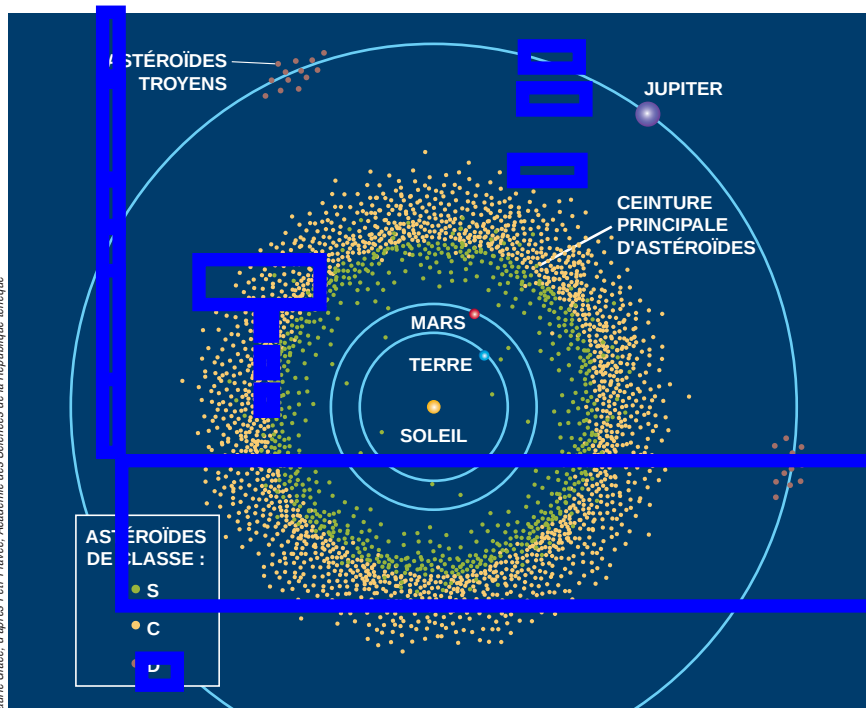
Puis Jupiter perturba les trajectoires des planètes naines, modifiant à la fois l'ellipticité et l'orientation du grand axe

de l'orbite : les collisions entre planètes naines, de sorte que les corps ont cessé de grossir (ils perdaient des morceaux ou volaient en éclats). Souvent,

les débris ont continué à tourner autour du Soleil, formant des familles aux orbites voisines et aux spectres semblables. La plupart des astéroïdes et des météorites sont des morceaux rocheux ou métalliques de planètes naines disloquées. D'autres – la plupart des comètes – sont des corps plus primitifs, qui se sont jamais différenciés, des reliques de la préhistoire des planètes.



2. LES ASTÉROÏDES semblent être de deux types. Ceux dont le diamètre est supérieur à 200 mètres, avec une rotation sur eux-mêmes en plus de deux heures, sont des tas de cailloux. Ils se disloqueraient s'ils tournaient plus vite. Les plus petits, qui tournent sur eux-mêmes en quelques minutes, sont des blocs rocheux. Les tas de cailloux étaient probablement des blocs rocheux qui se sont fragmentés lors de collisions et ont de nouveau agrégé une partie de leurs morceaux.



3. LA CEINTURE PRINCIPALE D'ASTÉROÏDES du Système solaire est à l'extérieur de l'orbite de Mars. Quelques astéroïdes solitaires traversent l'orbite de la Terre (qu'ils percutent parfois). D'autres, connus sous le nom d'astéroïdes troyens et répartis en deux groupes, sont en orbite synchrone avec Jupiter. Dans la ceinture principale, les astéroïdes sont essentiellement composés de roches et de fer (les astéroïdes de classe S). Plus loin, des astéroïdes rouges et sombres sont plus riches en carbone (les astéroïdes de classes C et D).

Le ciel nous tombe sur la tête

Il y a dix ans seulement, la spectroscopie des astéroïdes avait progressé, mais les astronomes n'avaient encore aucune image détaillée d'un astéroïde. Les premiers de ceux qui avaient été découverts, au début du XIX^e siècle, avaient reçu des noms mythologiques, conformément à la tradition astronomique mais le panthéon est rapidement devenu insuffisant : quand on a commencé à repérer les astéroïdes en grand nombre, on a dû se rabattre sur les noms de leurs découvreurs, puis sur ceux de leurs femmes, bienfaiteurs, collègues... Oubliés pendant presque un siècle, ils passionnent aujourd'hui, car les sondes spatiales nous en ont rapporté des images : ils apparaissent non plus comme de faibles scintillements dans le ciel, mais comme des objets aux reliefs stupéfiants.

Cette renaissance est due en partie à Daniel Goldin, administrateur de la NASA, qui a voulu faire « plus vite, mieux, moins cher ». Quelle aubaine pour les spécialistes des astéroïdes : ces corps sont plus accessibles que les planètes majeures du Système solaire. De surcroît, les planétologues et les paléontologues se sont beaucoup intéressés aux astéroïdes, car l'un d'entre eux semble avoir exterminé les dinosaures, il y a 65 millions d'années (voir *Un impact d'origine extraterrestre ?*, par Walter Alvarez et Frank Asaro, *Pour la Science*, décembre 1990).

Un tel impact se reproduira certainement un jour, mais quand ? Tant que nous n'aurons pas recensé les gros astéroïdes qui frôlent la Terre, nous n'en saurons rien. Quand aux comètes potentiellement dangereuses, nous ne les recensons jamais toutes non plus, car leur passage dans le Système solaire est extrêmement rare. La probabilité que la chute d'un corps céleste provoque une catastrophe naturelle qui perturbe l'ensemble du Globe, au cours d'une année donnée, reste extrêmement

faible : c'est la même que la probabilité d'avoir une quinte flush royale au poker. Pourtant, certains de mes collègues caractérisent les astéroïdes par leur potentiel explosif exprimé en mégatonnes, plutôt que par leur diamètre. Les astronomes voudraient que les astéroïdes intéressent pour ce qu'ils sont, mais c'est l'aspect spectaculaire dont le public est friand.

Sa curiosité a d'ailleurs déterminé les récentes explorations des comètes et des astéroïdes. Nous avons aujourd'hui des images d'une dizaine de ces objets et, chaque fois, nous sommes surpris par leurs caractéristiques inédites.

Des tas de cailloux

On pensait que les petits astéroïdes étaient durs et rocheux, car on supposait que les cailloux de leur surface qui s'en détachaient lors des collisions (le régolithe) s'en échappaient, la gravité étant trop faible pour les retenir. On pensait aussi que les petits corps n'étaient jamais des agrégats, car le moindre mouvement rotatif soutenu aurait séparé leurs fragments. Les observations et les simulations récentes ont obligé les astronomes à revoir leurs théories, et l'on considère maintenant que la plupart des astéroïdes de plus de un kilomètre de diamètre sont des assemblages de plusieurs morceaux.

Les images indiquent la présence de régolithe, malgré la faible gravité. La plupart de ces astéroïdes ont un ou plusieurs grands cratères : certains ont un rayon supérieur à l'astéroïde lui-même. Des impacts assez violents pour former de tels cratères ont-ils fragmenté les astéroïdes ? Les mesures de densité moyenne semblent le confirmer : les valeurs mesurées sont étonnamment faibles, ce qui indique que ces corps comportent des cavités.

Ainsi les astéroïdes de plus de un kilomètre de large sont probablement des agrégats sans aucun noyau rocheux. Cette hypothèse du «tas de cailloux» date d'une vingtaine d'années, mais on n'imaginait pas qu'elle s'appliquerait à de si petites échelles.

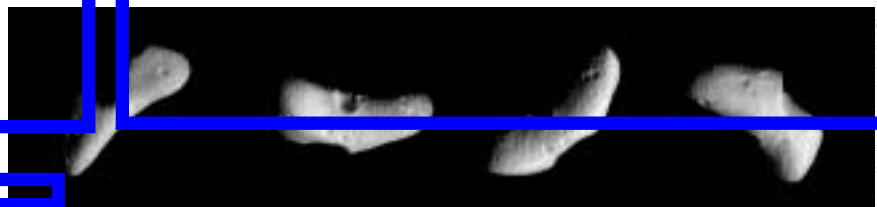
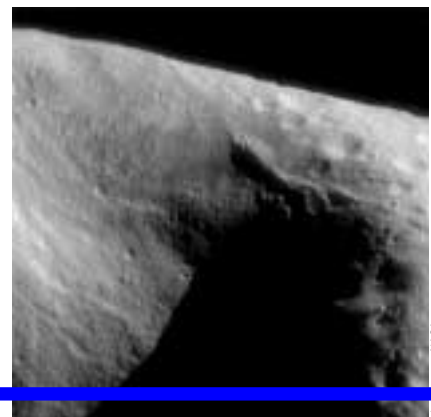
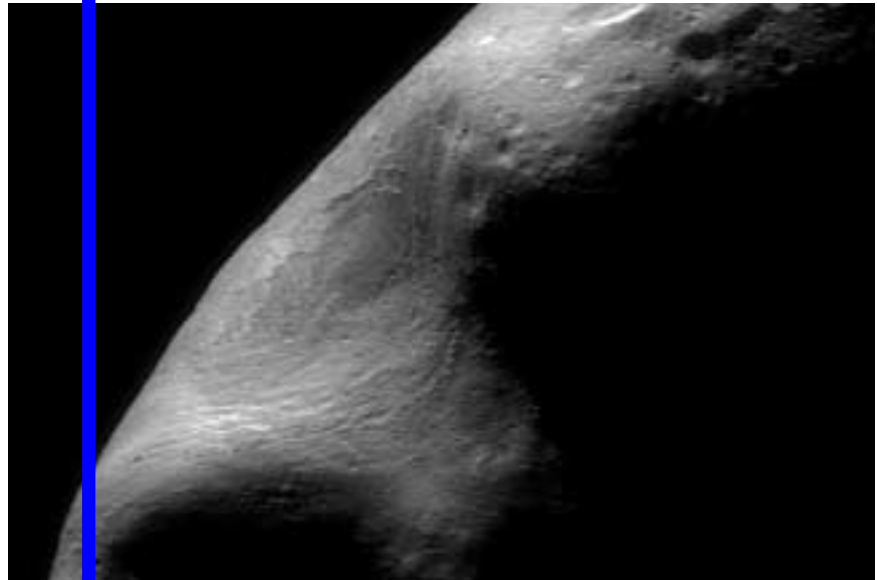
Il y a trois ans, quand la sonde NEAR a survolé l'astéroïde Mathilde, le planétologue Eugene Shoemaker a compris que les immenses cratères et la très faible densité observés s'expliquaient mutuellement : un tas de cailloux supporte beaucoup mieux les chocs qu'un objet d'un seul tenant ; il absorbe et dissipe l'énergie, de sorte que

la face opposée au choc reste inchangée. Les astéroïdes se comportent plutôt comme des sacs de sable frappés par une balle de revolver que comme des vases de cristal.

Pourquoi la plupart des astéroïdes ont-ils une forme si irrégulière ? Elle semble être l'apanage de corps solides, contrairement à l'hypothèse précédente. Toutefois, l'intuition a ses limites. D'après les clichés dont nous disposons, la surface des astéroïdes n'est jamais très inclinée, de sorte que les

débris qui s'y trouvent ne roulent pas. Dans les zones les plus inclinées, on voit des traces de glissements. De petites planètes constituées de roches, voire de sable, peuvent conserver une forme irrégulière (le sable du désert forme bien des dunes, sans être monolithique) ; une rotation rapide contribuerait à les allonger.

En 1992, l'observation de la comète Shoemaker-Levy 9 a corroboré l'hypothèse du tas de cailloux : en s'approchant trop de Jupiter, cette comète



4. ÉROS est composé de plusieurs morceaux, parcourus par des failles, des escarpements et des crêtes. Le relief le plus important est une dépression dont l'intérieur présente des marques inexplicables, mais pas de cratère. Le cratère le plus grand mesure six kilomètres de diamètre. Les débris déposés sur ses bords indiquent que les forces de gravité ont fait retomber les matières éjectées lors d'une collision avec un autre corps. Une arête parallèle aux marques précédentes suggère qu'Éros est parcouru par un système de failles. Il effectue un tour sur lui-même en cinq heures et demie.

Visite guidée des astéroïdes

ÉROS

Numéro du catalogue officiel : 433

Dimensions : $33 \times 13 \times 13$ kilomètres

Masse volumique : 2,7 grammes par centimètre cube

Type d'orbite : passe à proximité de celle de la Terre

Classe spectrale : S

Rotation : 5,27 heures

GASpra

Numéro du catalogue officiel : 951

Dimensions : $19 \times 12 \times 11$ kilomètres

Masse volumique : Inconnue

Type d'orbite : ceinture principale (famille de Flore)

Classe spectrale : S

Rotation : 7,04 heures

Gaspra est le premier astéroïde auquel une sonde ait rendu visite : *Galilée* l'a survolé en 1991 en se rendant vers Jupiter. Certains astronomes pensent que ses dépressions ne sont pas des cratères, mais des facettes qui se seraient formées quand Gaspra s'est détaché de son astéroïde parent. Cependant, la gravité faible et irrégulière de Gaspra donnerait naturellement à d'éventuels très gros cratères une forme aplatie et asymétrique correspondant aux observations.

CASTALIE

Numéro du catalogue officiel : 4769

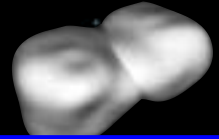
Dimension : $1,8 \times 0,8$ kilomètre

Masse volumique : 2,1 grammes par centimètre cube (surface)

Type d'orbite : traversant l'orbite de la Terre

Classe spectrale : S

Rotation : 4 heures



Castalie est le premier astéroïde dont on a obtenu des images. En août 1989, il est passé à onze distances Terre-Lune de la Terre, encore trop loin pour les télescopes optiques, mais assez près pour les radars. Les images, réalisées avec le plus grand radiotélescope du monde (celui d'Arecibo, à Porto Rico), ont révélé que Castalie a la forme d'une cacahuète : il est probablement constitué de deux morceaux de 800 mètres de longueur, accolés malgré une gravité très faible. De nombreux autres astéroïdes passant régulièrement au voisinage de la Terre ont une configuration similaire.

TOUTATIS

Numéro du catalogue officiel : 4179

Dimension : $4,5 \times 2,4 \times 1,9$ kilomètres

Masse volumique : 2,1 grammes par centimètre cube en surface

Type d'orbite : Traverse l'orbite de la Terre

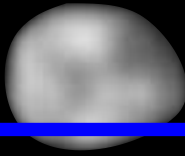
Classe spectrale : S

Rotation : Deux périodes distinctes (5,41 et 7,35 jours)



Fortement attiré par la Terre, Toutatis a une orbite chaotique. Il est animé de deux types de mouvements oscillatoires dont la combinaison aboutit à une rotation non périodique : de sa surface, on ne voit jamais deux fois le même horizon. Le 29 septembre 2004, Toutatis s'approchera à quatre fois la distance Terre-Lune de la Terre. Il sera alors visible aux jumelles.

VESTA



Numéro du catalogue officiel : 4
Dimensions : 525 kilomètres de diamètre
Masse volumique : 3,3 grammes par centimètre cube
Type d'orbite : ceinture principale
Classe spectrale : V
Rotation : 5,34 heures

Parmi les plus gros astéroïdes, Vesta est le seul dont la surface soit en basalte (en lave solidifiée). Dans un passé lointain, cet astéroïde a subi des bouleversements semblables à ceux qu'ont connus la Terre et Mars, peu après leur formation. Des dizaines d'astéroïdes semblables à Vesta existaient, à une époque reculée, mais ils se sont brisés, engendrant des familles d'astéroïdes plus petits. On pense que les météorites ferreuses étaient leurs noyaux et que les météorites ignées sont des morceaux de leur croûte. En 1996, le télescope spatial *Hubble* a pris cette image de Vesta, qui a révélé la présence d'un immense cratère de 430 kilomètres de diamètre. Les petits astéroïdes de type V que l'on observe aujourd'hui viennent peut-être de ce cratère, qui serait vieux d'un million d'années.

MATHILDE

Numéro du catalogue officiel : 253
Dimensions : 66 × 48 × 46 kilomètres
Masse volumique : 1,3 gramme par centimètre cube
Type d'orbite : ceinture principale
Classe spectrale : V
Rotation : 17,4 jours



Avant de rejoindre Eros, la sonde NEAR est passée près de Mathilde. C'était la première fois qu'une sonde spatiale recueillait des informations sur un aussi gros astéroïde primitif de type C. La rotation de ce sphéroïde est parmi les plus lentes, et son orbite est l'une des plus grandes de la ceinture principale. Mathilde a légèrement dévié la trajectoire de la sonde, ce qui nous donne une indication sur sa densité, inférieure de moitié à celle des météorites qui s'y apparentent le plus, des chondrites carbonées : si Mathilde est constituée du même matériau, celui-ci doit être très peu tassé. C'est également vrai pour Eugénie, un autre astéroïde de type C, récemment étudié grâce à un télescope terrestre équipé d'instruments d'optique adaptative puissants. Mathilde est creusée de cratères géants, qui sont parfois plus grands que le rayon moyen de l'astéroïde. Pourtant, ils ne présentent pas les bords ni les débris typiques des grands cratères sur les autres astéroïdes. En outre, aucun cratère ne s'est formé dans un cratère plus ancien de sorte qu'on ne sait pas lequel est le plus vieux.

IDA & DACTYLE

Numéro du catalogue officiel : 243
Dimensions : 56 × 24 × 21 kilomètres
Masse volumique : environ 2,7 grammes par centimètre cube
Type d'orbite : ceinture principale (famille de Koronis)
Classe spectrale : S
Rotation : 4,63 heures



Deux ans après avoir rendu visite à Gaspra, *Galilée* est passé à proximité de l'astéroïde Ida, qui fait partie de la ceinture principale. La sonde a alors découvert Dactyle, son satellite, dont le diamètre ne dépasse pas 1,4 kilomètre. À partir de l'orbite de Dactyle, on a calculé la masse d'Ida. Sa densité est bien inférieure à celle des météorites qui lui ressemblent, les chondrites ordinaires : soit Ida n'a pas la même composition, soit l'astéroïde est poreux. Dactyle s'est peut-être formé à partir de débris issus de l'un des plus grands cratères d'Ida ou au même moment qu'Ida, il y a au moins un milliard d'années, quand le corps qui lui a donné naissance s'est scindé.

s'est disloquée en plus d'une vingtaine de morceaux ; puis, deux ans plus tard, le « collier de perles » qui s'était formé a heurté la planète géante (voir *La comète Shoemaker-Levy 9*, par David Levy, Eugene Shoemaker et Caroline Shoemaker, *Pour la Science*, octobre 1995). Avec Willy Benz, de l'Université de Berne, nous avons calculé que la fragmentation s'explique par la constitution initiale de la comète, qui devait être faite de centaines de grains ; ceux-ci ont subi une sorte de glissement de terrain cosmique. Jupiter allongea la comète parce qu'il attirait plus les parties les plus proches de lui, créant une marée solide ; toutefois, les fragments qui s'attiraient mutuellement se sont rassemblés en petits groupes, un peu comme les gouttes d'eau d'une fontaine. Au total, la dissociation de Shoemaker-Levy 9 semble montrer que les comètes sont des aggrégats dont la densité moyenne est égale aux deux tiers de celle de la glace. Les astéroïdes ont probablement une constitution analogue.

Quand rien n'est important, tout est important

Malgré les arguments en sa faveur, l'hypothèse des tas de cailloux pose des problèmes. La résistance mécanique d'un astéroïde est quasi nulle et la gravité est extrêmement faible, mais ni l'une ni l'autre ne sont négligeables. La gravité, en effet, assure la cohésion des morceaux. D'ailleurs, les enfants qui font des châteaux de sable savent bien que les forces de cohésion très faibles suffisent à faire tenir des édifices. Toutefois, les forces que l'on néglige habituellement deviennent alors importantes : les frottements lors des glissements, les liaisons chimiques, la dissipation de l'énergie cinétique, l'attraction électrostatique... Nous commençons seulement à comprendre comment elles interagissent.

Le type de forces prépondérantes dans les astéroïdes dépend de la taille de ces derniers. On l'étudie en analysant la vitesse de rotation des astéroïdes. Certaines collisions font tourner les astéroïdes plus vite, d'autres plus lentement. Or, si les astéroïdes étaient formés d'un seul bloc, le graphe de la répartition des corps selon leur vitesse devrait être une courbe de Gauss (une courbe en cloche) dont la « queue », à droite de la courbe, correspondrait à des astéroïdes tournant très rapidement sur

eux-mêmes. En revanche, si les astéroïdes sont bien formés de plusieurs fragments agglomérés, la queue de la courbe doit être absente : des astéroïdes tournant sur eux-mêmes en moins de trois heures se désintégreraient sous l'effet des forces centrifuges. Petr Pravec, de l'Académie des sciences de la République tchèque, Alan Harris, à Pasadena, et leurs collègues ont découvert que tous les astéroïdes, sauf cinq, tournent moins vite qu'un tour par 2 heures 11 minutes (voir la figure 2). Les astéroïdes exceptionnels ont un diamètre inférieur à 200 mètres environ.

La conclusion s'impose : les astéroïdes de plus de 200 mètres de diamètre sont des tas de cailloux. Les simulations de collisions récentes confirment l'existence d'un seuil de vitesse de rotation pour ce diamètre. Les collisions font exploser les gros astéroïdes, mais les débris ont généralement une vitesse inférieure à la « vitesse de désintégration » (celle à partir de laquelle ils s'échapperaient dans l'espace), soit environ un mètre par seconde et par kilomètre de rayon d'as-

téroïde. En quelques heures, la gravité rassemble les fragments (sauf les plus rapides) en un tas aggloméré (voir la figure 3). Comme les collisions entre astéroïdes sont courantes, la plupart des gros objets en ont déjà subi. Les petits astéroïdes, eux, sont probablement monolithiques, car les fragments d'impact sont moins retenus par la gravité (qui est alors très faible).

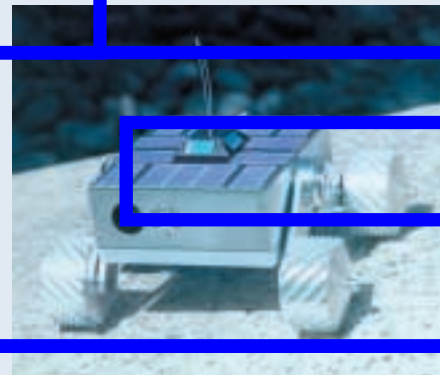
Ainsi les petits astéroïdes ont des formes spectaculaires, parce qu'ils ne retiennent pas les débris formés lors des collisions. Les gros astéroïdes sont des assemblages de morceaux plus petits, auxquels la gravité et les collisions aléatoires ont donné une forme arrondie ou, s'ils tournent sur eux-mêmes, une forme allongée. Leurs cratères ont des parois abruptes et ils contiennent des débris éjectés par les impacts, puis déposés, tandis que leur surface est recouverte de régolithe. Évidemment, tous les intermédiaires sont envisageables. Notamment, selon ces critères, l'astéroïde Matilde serait à la fois petit et gros, car ses énormes cratères n'ont pas de bords visibles ni de débris à l'intérieur,

Les missions futures

Six missions exploreront bientôt les astéroïdes et les comètes. La sonde *Stardust* de la NASA, lancée en février 1999, reviendra en 2006 avec quelques grains de poussière de la queue de la comète Wild 2. La sonde spatiale *MUSES-C* sera lancée en 2002 par l'Agence spatiale japonaise, et elle recueillera des échantillons sur Nérée, où elle déposera un robot, qui se déplacera en roulant si les frottements sont suffisants.

Centauro, qui sera lancée en 2002, inspectera le noyau de deux comètes, en 2003 et 2006, et peut-être un troisième en 2008. En 2003, *Rosetta* sera lancée par l'Agence spatiale européenne vers la comète Wirtanen, qui voyage vers l'intérieur du Système solaire. Elle survolera également deux petits astéroïdes. *Rosetta* et son module d'atterrissage observeront Wirtanen lorsque la comète quittera le Système solaire externe en direction du point de sa trajectoire le plus proche du Soleil, avant d'exploser.

La sonde *Deep Impact* réalisera la première expérience géochimique sur un astéroïde. Elle enverra un projectile de cuivre de 500 kilogrammes sur la comète Tempel 1. Le cratère d'impact nous renseignera sur la structure des comètes. Une autre sonde pourrait tirer dans un astéroïde des « balles intelligentes », c'est-à-dire des projectiles blindés contenant chacun un accéléromètre et un émetteur radio. Les accéléromètres enregistreraient le ralentissement lors du choc, indiquant si l'astéroïde s'apparente plus à du sable ou à un rocher ; on détecterait également les signaux sismiques dus aux autres balles qui s'écraseraient sur l'astéroïde. Cet ensemble de données révélerait la structure interne de l'astéroïde, de la même façon que les géologues ont découvert la structure terrestre en écoutant les tremblements de terre.



LE NANOROVER roulera à la surface de l'astéroïde Nérée. Si vous souhaitez des plans pour construire votre modèle, consultez <http://spaceplace.jpl.nasa.gov/muses3.htm>.

mais sa forme est sphéroïdale. Le minuscule astéroïde Dactyle serait «gros», car il est sphéroïdal et ses cratères sont nets. Manifestement, la théorie des astéroïdes reste incomplète.

État de choc

Ce constat n'a rien de surprenant : même sur la Terre, les physiciens comprennent encore mal le comportement des tas de sable ou les glissements de terrain. En revanche, deux types d'études commencent à éclairer le comportement des astéroïdes au cours des collisions.

Derek Richardson et ses collègues de l'Université de Washington simulent les astéroïdes par des piles de sphères discrètes. Telles des boules de billard cosmiques sur une table bancale (ce défaut correspondant à la gravité), ces sphères se heurtent, rebondissent et ralentissent en raison des frottements

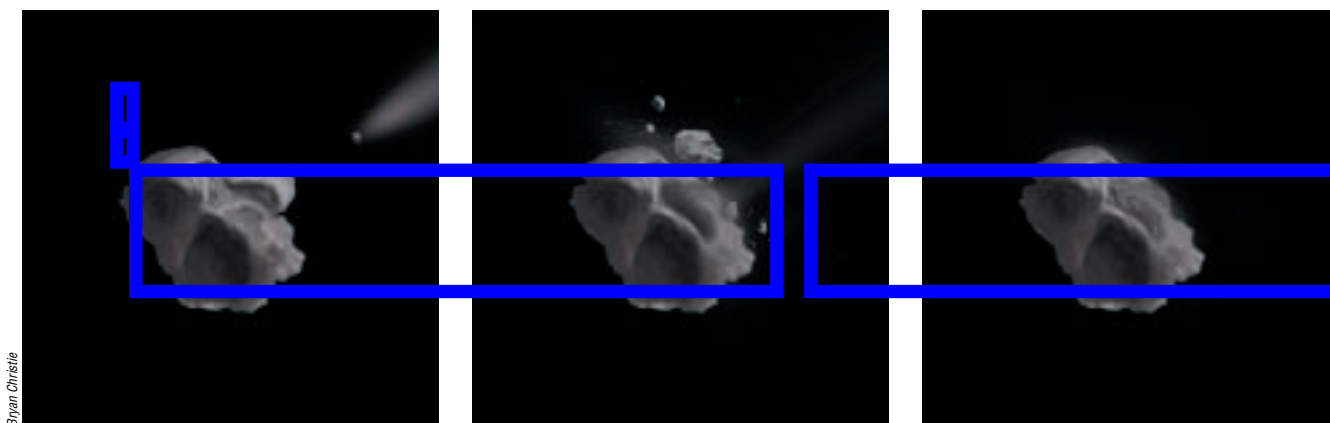
et d'autres formes de dissipation de l'énergie. Quand les chocs donnent aux boules assez d'énergie, elles se dispersent, mais en général, elles finissent par se regrouper. Les simulations de D. Richardson s'appliquent à l'étude des collisions peu violentes qui ont abouti à l'accrétion des astéroïdes dans le Système solaire primitif, avant que la vitesse des petits corps n'augmente sous l'influence gravitationnelle de la planète Jupiter, alors naissante. Cependant, dans ce modèle, on constate que l'accrétion de matériel sur les planétésimaux est difficile, même après les collisions les moins violentes.

La description des collisions à grande vitesse, telles qu'elles eurent lieu lors des quatre derniers milliards d'années, est plus compliquée, parce que de nombreux phénomènes ont alors joué : la cohésion des astéroïdes, leur friabilité, les changements de

phase, la génération et la propagation des ondes de choc...

Avec V. Benz, j'ai cherché de nouvelles techniques de calcul pour traiter ce genre de cas. Au lieu de considérer les astéroïdes comme des assemblages de sphères, nous les traitons comme des corps continus faits de plusieurs couches, avec des fissures et des cavités.

Nous avons notamment simulé l'impact d'un objet de 6 000 tonnes sur l'astéroïde Castalie (de masse égale à un milliard de tonnes), à une vitesse de cinq kilomètres par seconde. Cette collision libère une énergie égale à 17 kilotonnes, soit autant que l'explosion d'Hiroshima. C'est assez pour briser Castalie, constituée, dans notre simulation, de deux morceaux soudés par la gravité. Nous observons également que le projectile, ainsi qu'une partie de Castalie de même masse



Bryan Christie

5. UN ASTÉROÏDE FORMÉ DE MORCEAUX AGGLOMÉRÉS et dont la structure témoigne des collisions passées rencontre un astéroïde plus petit, qui se déplace à grande vitesse. De tels chocs sont courants. Ils ne provoquent qu'une désagrégation localisée. En quelques minutes, les débris les plus petits et les plus rapides

s'échappent. Les plus gros dérivent lentement vers l'extérieur. Certains finissent par s'échapper, mais d'autres reviennent vers l'astéroïde. Quelques jours plus tard, la situation s'est stabilisée et, progressivement, les débris issus de collisions ultérieures recouvrirent les traces de celle-ci.



Bryan Christie

6. UN ASTÉROÏDE MONOLITHIQUE ne réagit pas à une collision comme un astéroïde formé de morceaux agglomérés, de même qu'une bûche ne réagit pas à un coup de hache comme un tas de copeaux de bois. L'onde de choc se propage en profondeur, faisant éclater l'astéroïde entier. Les débris les plus rapides s'échappent. Les plus gros gravi-

tent lentement autour de l'astéroïde pendant plusieurs heures. Beaucoup se rassemblent, formant un nouvel astéroïde. Les astéroïdes monolithiques se transforment donc souvent en astéroïdes agglomérés. Peu d'astéroïdes monolithiques de plus de quelques centaines de mètres subsistent.

que le projectile, se vaporisent en quelques millisecondes, engendrant une onde de choc puissante. Comme cette dernière ne se propage pas dans le vide, elle rebondit sur les surfaces de l'astéroïde, y compris sur la fracture entre ses deux parties. De ce fait, le morceau de l'astéroïde qui n'a pas été heurté directement n'est pas perturbé par l'onde de choc, tandis que le morceau heurté se divise en plusieurs dizaines de gros fragments, qui mettent des heures à se disperser : les plus gros finissent par se rassembler.

En changeant la configuration initiale ou les paramètres de l'astéroïde, qui sont d'ailleurs mal connus, on obtient des résultats complètement différents. Notamment, si on définit les astéroïdes comme des tas de cailloux, ils explosent difficilement.

Rendez-vous avec Éros

En comparant les images d'astéroïdes à des simulations fondées sur différentes hypothèses initiales, on cherche à comprendre les caractéristiques les plus étranges de ces corps. Avec Peter Thomas, de l'Université Cornell, nous avons ainsi analysé la collision qui forma le plus gros cratère de l'astéroïde Mathilde : nous obtenons un diamètre, une forme et un dépôt de débris analogues à ceux qui ont été observés.

Quand on suppose que Mathilde fut initialement d'un seul tenant, on doit conclure que l'astéroïde se serait cassé en plusieurs dizaines de morceaux, contrairement aux observations. Avec l'hypothèse du tas de cailloux, la simulation concorde avec les observations. Kevin Housen, du Laboratoire Boeing de physique des collisions, pense aussi que Mathilde est un tas de cailloux, mais il considère que les cratères sont des fosses de tassement, comme des creux dans un sac de grain, plutôt que le résultat de collisions.

Ces études préparent les missions futures. Selon que les astéroïdes sont des agglomérats ou des monolithes, on n'utilisera pas les mêmes méthodes pour prélever des échantillons : à plus longue échéance, on devra également tenir compte de la constitution des astéroïdes pour y construire des télescopes, en extraire des minéraux ou les dévier s'ils menacent la Terre. L'irrégularité du champ gravitationnel complique déjà les missions d'exploration des astéroïdes et des comètes : autour de ces corps, les

sondes ont souvent des orbites chaotiques, de sorte qu'elles risquent de s'écraser à la surface des objets qu'elles visitent ; pour les mêmes raisons, le pointage des caméras et des autres instruments dans la bonne direction est difficile. Pour éviter ces inconvénients, la sonde NEAR observe Éros en restant à plus de 100 kilomètres de lui, de sorte que l'objet, en forme de pomme de terre irrégulière, exerce une attraction analogue à celle d'une sphère. En mesurant les écarts de NEAR par rapport à une orbite elliptique, on déterminera la répartition des masses à l'intérieur d'Éros.

NEAR tourne autour de cet astéroïde à la vitesse d'un cycliste peu pressé. La sonde envoie vers la Terre une quantité considérable d'informations qui devraient d'abord montrer la différence entre les astéroïdes et les météorites. Des caméras cartographient Éros avec une résolution de quelques mètres, des spectromètres analysent sa composition, et un magnétomètre détectera un éventuel champ magnétique propre, ainsi que ses interactions avec le champ solaire. Les missions suivantes étudieront les astéroïdes et les comètes encore plus en détail, à l'aide de modules qui se poseront, feront des forages et renverront des échantillons. Ainsi comprendra-t-on mieux la physique des petits corps planétaires, où la cohésion joue parfois un rôle aussi important que la gravité. Assez gros pour retenir leur substance, mais trop petits pour lui donner une forme ronde, ni rochers ni planètes, les astéroïdes tiennent à la fois du ciel et de la Terre.

Erik ASPHÄUG est astrophysicien à l'Université de Californie.

Hazards Due to Comets and Asteroids, sous la direction de Tom Gehrels, University of Arizona Press, 1994.

John LEWIS, *Mining the Sky*, Addison-Wesley, 1996.

Erik ASPHÄUG, Steven J. OSTRO, R.S. HUDSON, D.J. SCHEERES et Willy BENZ, *Disruption of Kilometre-Sized Asteroids by Energetic Collisions in Nature*, vol. 33, pp. 437-440, 4 juin 1998.

Harry MCSWEEEN, *Meteorites and Their Parent Planets*, deuxième édition, Cambridge University Press, 1999.

Eileen RYAN et William BOTTKE, *Asteroid Fragmentation and Evolution of Asteroids*, in *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, vol. 28, pp. 367-389, Annual Reviews, 2000.



Ce que disent les pierres
Maurice Mattauer

CE QUE DISENT LES PIERRES
Maurice Mattauer

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

Code P001 • 100 F
144 pages

Voir bon de commande page 90

Les muqueuses, sources d'immunité

FRANÇOISE MASCAUT • CAMILLE LOCHT

Les muqueuses, les couches cellulaires qui tapissent notamment l'intestin et les poumons, forment une barrière entre l'intérieur de l'organisme et l'extérieur. Elles empêchent l'entrée des agents étrangers et sont dotées d'un système immunitaire spécifique qui est activé quand cette barrière est franchie.

Mitridate VI, sultan oriental et empereur tyrannique, fut, dans les années -100 à -60, le précurseur de l'immunité acquise par les muqueuses. À juste titre, il craignait qu'on ne l'empoisonne. Afin de se protéger contre les poisons usuels à base de plantes, il ingéra quotidiennement de faibles quantités d'extraits végétaux. Cette «vaccination orale» eut un pouvoir protecteur que lui-même n'avait pas escompté. Trahi par son propre fils, l'empereur tenta de se donner la mort avec ses filles en avalant le poison dont il avait caché une dose létale dans la poignée de son sabre. Ses deux filles succombèrent, mais lui survécut ; il demanda à son mercenaire de le poignarder, afin d'échapper à ses soldats, qui se étaient mutinés et voulaient le capturer.

Constantement exposé à des agresseurs – virus, bactéries, parasites, champignons – présents dans l'environnement, l'organisme se défend : sa survie en dépend. Les microbes profitent de toutes les «portes d'entrée» possibles pour infecter l'organisme : les muqueuses qui tapissent le tube digestif, les voies respiratoires, le système urinaire et les voies sexuelles. La surface des muqueuses est considérable : si on les étalait, les muqueuses qui tapissent le tube digestif de l'homme recouvriraient tout un terrain de tennis (soit 400 mètres carrés) ! Les muqueuses sont pourvues d'un système immunitaire de riposte immédiate qui bloque les infections : 80 pour cent de toutes les cellules immunitaires appartiennent au

système des muqueuses. S'il est pourvu des mêmes constituants que le système immunitaire général, le système immunitaire des muqueuses contient des cellules et des molécules spécifiques sur lesquelles nous reviendrons.

La tâche du système immunitaire des muqueuses est encore plus délicate que celle du système immunitaire général, encore nommé systémique : s'il doit, comme ce dernier, distinguer les molécules propres à l'organisme – le soi – des molécules étrangères – le non-soi –, il doit aussi différencier les micro-organismes pathogènes contre lesquels il défend l'organisme et les micro-organismes inoffensifs, voire même utiles pour l'organisme, qui doivent être «tolérés» : ce sont, par exemple, les aliments ou les bactéries non pathogènes de la flore intestinale normale qui sont indispensables. Contrairement au système immunitaire systémique, le système des muqueuses a élaboré des mécanismes de tolérance vis-à-vis de divers antigènes.

Nous examinerons quels sont les acteurs du système immunitaire des muqueuses, les mécanismes de sensibilisation, d'activation et de tolérance, les maladies déclenchées par un fonctionnement anormal du système immunitaire et, enfin, les applications potentielles : puisque de nombreux micro-organismes pathogènes pénètrent dans l'organisme par les muqueuses, on pourrait utiliser cette porte d'entrée pour introduire des vaccins destinés à protéger l'organisme. En effet, le système immunitaire est doté de mémoire :

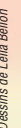
certaines infections protègent contre des infections ultérieures par le même germe, et le système immunitaire se souvient des germes qu'il a déjà rencontrés et qu'il a réussi à éliminer. La vaccination repose sur cette mémoire immunitaire spécifique de l'agent infectieux : bien qu'ils ne déclenchent pas d'infection, les vaccins apportent au système immunitaire à reconnaître les antigènes de divers agents pathogènes. La vaccination par les muqueuses est aujourd'hui une voie d'immunisation dont on découvre les multiples applications potentielles.

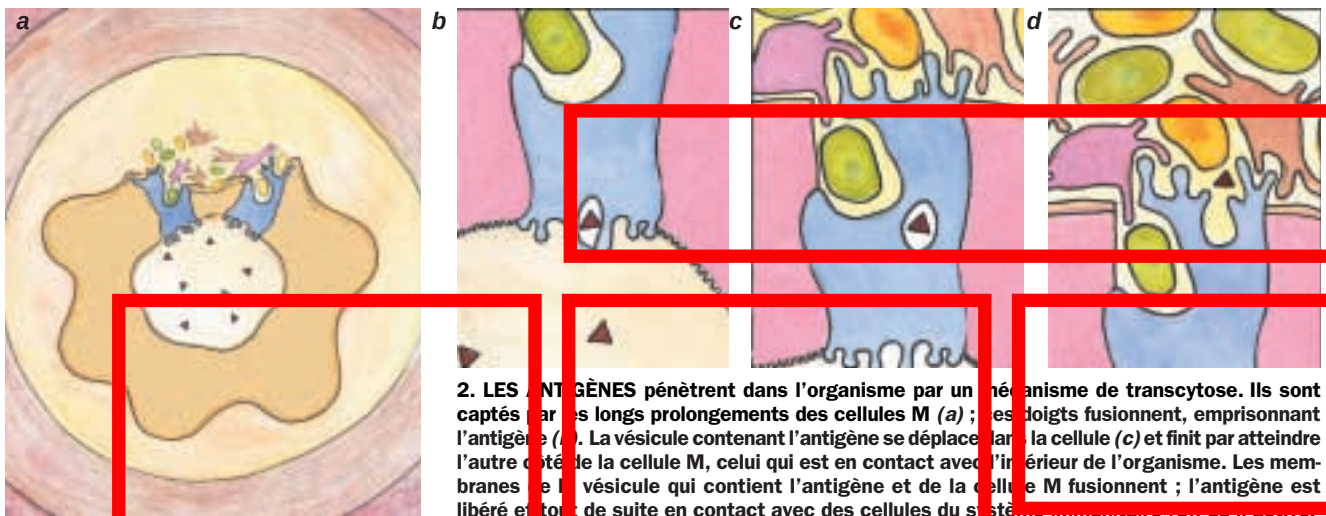
Les cellules M

Des le début du xx^e siècle, les immunologistes avaient compris que les muqueuses ont leur propre système de défense, indépendant du système immunitaire systémique. Elles hébergent, dans des compartiments spécialisés qui leur sont associés, des acteurs cellulaires et moléculaires spécifiques.

1. LE SYSTÈME IMMUNITAIRE DES MUQUEUSES est activé par les molécules spécifiques ou antigènes, de micro-organismes présents dans la «lumière» des poumons ou de l'intestin. Ces antigènes pénètrent dans l'organisme par l'intermédiaire des cellules M, interface entre le milieu extérieur et l'intérieur de l'organisme. Dès que les antigènes sont en contact avec les cellules du système immunitaire, regroupées dans les plaques de Peyer, ils les activent. Les lymphocytes activés quittent ces amas cellulaires : ils empruntent le circuit lymphatique, puis la circulation sanguine. En cheminant dans l'organisme, ils transmettent l'immunité aux autres muqueuses.

Les leucocytes des plaques de Peyer sont essentiellement des lymphocytes T, des lymphocytes B, des macrophages et des cellules dendritiques. Les macrophages et les cellules dendritiques captent les antigènes diverses par les cellules M, et les présentent aux lymphocytes T et B.





Les lymphocytes non sensibilisés qui circulent dans le sang portent, à leur surface, des molécules d'adhérence, la Lsélectine et l'intégrine $\alpha_4\beta_7$. Lorsqu'ils passent à proximité des cellules endothéliales des veinules qui portent les molécules MADCAM-1, ils sont piégés et quittent les veinules qui sillonnent les plaques de Peyer. Dans ces plaques, les lymphocytes *T* sont en contact direct avec les cellules présentatrices d'antigènes qui les activent. Les cellules présentatrices d'antigènes et les lymphocytes *T* activent également des lymphocytes *B* qui deviendront des cellules productrices d'anticorps, ou plasmacytes. Lorsque les lymphocytes parviennent dans les amas, ils se multiplient, mais ne sont pas encore totalement différenciés. Ils subissent un long processus de maturation et de différenciation entre le site où ils sont activés et le site où ils agissent réellement, qui peut être éloigné.

Avant leur rencontre avec leur antigène spécifique, les lymphocytes *B* portent généralement, à leur surface, des anticorps de la classe des immunoglobulines M. Quand ils rencontrent l'antigène dont ils sont spécifiques, les lymphocytes *B* modifient le type d'immunoglobulines qu'ils portent : des immunoglobulines A remplacent les immunoglobulines M. Les cytokines, des molécules solubles produites par les lymphocytes *T*, par les cellules épithéliales, par les cellules présentatrices d'antigènes jouent un rôle essentiel dans cette commutation.

Les lymphocytes *T* et *B* ainsi sensibilisés quittent ensuite les plaques de Peyer par les vaisseaux lymphatiques et rejoignent les ganglions, où

leur différenciation se poursuit. Les lymphocytes partiellement différenciés quittent les ganglions par la circulation lymphatique et rejoignent ensuite la circulation sanguine. Les vaisseaux lymphatiques constituent un «réseau parallèle» au système sanguin qui relie différents tissus lymphoïdes, notamment les plaques de Peyer, à la circulation sanguine. Ils contiennent des cellules du système immunitaire et de la lymphe. Ce liquide, dont la composition est proche de celle du sérum, progresse dans les vaisseaux lymphatiques grâce à la contraction des muscles squelettiques et à la pulsion des artères : les mouvements des tissus adjacents sont indispensables à la progression de la lymphe et des cellules immunitaires qu'elle véhicule.

Finalement, les lymphocytes muqueux sensibilisés quittent la circulation sanguine au niveau des différentes surfaces muqueuses grâce à leur forte affinité pour les cellules épithéliales qui tapissent les vaisseaux sillonnant les muqueuses (et qui portent les molécules MADCAM-1). Cette interaction régule la circulation des cellules immunitaires des muqueuses et assure la communication entre les différentes muqueuses : une réactivité antigénique acquise sur un site s'étend rapidement aux autres sites. Toutefois, le système immunitaire des muqueuses est plus efficace sur les sites proches de ceux de la première rencontre avec l'antigène : la réaction immunitaire y est plus vigoureuse que sur les sites éloignés. Ainsi, une stimulation antigénique par voie orale déclenche une réaction intense de l'intestin grêle et du colon ascendant, et

une réaction plus faible des segments plus éloignés du colon, de la cavité urogénitale et des amygdales. De même, une immunisation par voie nasale provoque généralement une réaction intense des voies respiratoires, et une faible réaction de l'intestin.

Les autres muqueuses

Des structures lymphoïdes, dont la morphologie ressemble à celle des plaques de Peyer, tapissent les muqueuses respiratoires des bronches et du nez. Elles semblent peu nombreuses, mais coexistent avec l'autres structures dans les voies respiratoires, telles que les amygdales ou l'anneau de Waldeyer, des amas de lymphocytes enfouis dans le tissu conjonctif des voies aériennes supérieures et disposés en anneau entre les amygdales. Les amygdales recueillent la majeure partie des agents pathogènes qui pénètrent dans le pharynx. Les invaginations profondes – les cryptes amygdaliennes – emprisonnent bactéries et particules qui traversent l'épithélium muqueux et parviennent au tissu lymphoïde, où elles sont détruites. Les cellules immunitaires gardent le souvenir des agents pathogènes rencontrés et peuvent réactiver des défenses immunitaires spécifiques tout au long de la vie. De surcroît, les poumons contiennent des quantités notables de macrophages dans les alvéoles et de cellules dendritiques dans l'épithélium des voies respiratoires et dans les parois des alvéoles. Ces cellules captent les antigènes et les transportent directement vers les ganglions lymphatiques, où elles les présentent aux lymphocytes.

La muqueuse uro-génitale se caractérise par la présence d'un épithélium

stratifié, c'est-à-dire composé de plusieurs couches de cellules. Le système immunitaire des muqueuses uro-génitales a quelques spécificités. Il doit protéger l'homme et la femme contre des infections mais tolérer les cellules germinales, les spermatozoïdes «étrangers», ainsi que le fœtus dont la moitié seulement des protéines sont du «soi» (identiques à celles de la mère), l'autre moitié provenant du «non-soi» (le père). Bien que de très quantités notables d'immunoglobulines A et de lymphocytes soient présentes dans les muqueuses uro-génitales, l'activation de réactions immunitaires dans ces tissus est difficile : les sites inducteurs seraient situés en dehors des voies uro-génitales. Nous avons indiqué que les réactions immunitaires déclenchées à un endroit ont des effets en des régions qui peuvent être éloignées du site d'induction, mais que l'intensité est souvent maximale à proximité de ce site. Ainsi, les meilleures réactions immunitaires dans les muqueuses uro-génitales sont déclenchées par administration rectale d'antigènes. Toutefois, d'autres voies d'administration des antigènes, notamment par voie nasale, déclenchent aussi des réactions immunitaires dans les muqueuses uro-génitales.

Les différents acteurs du système des muqueuses

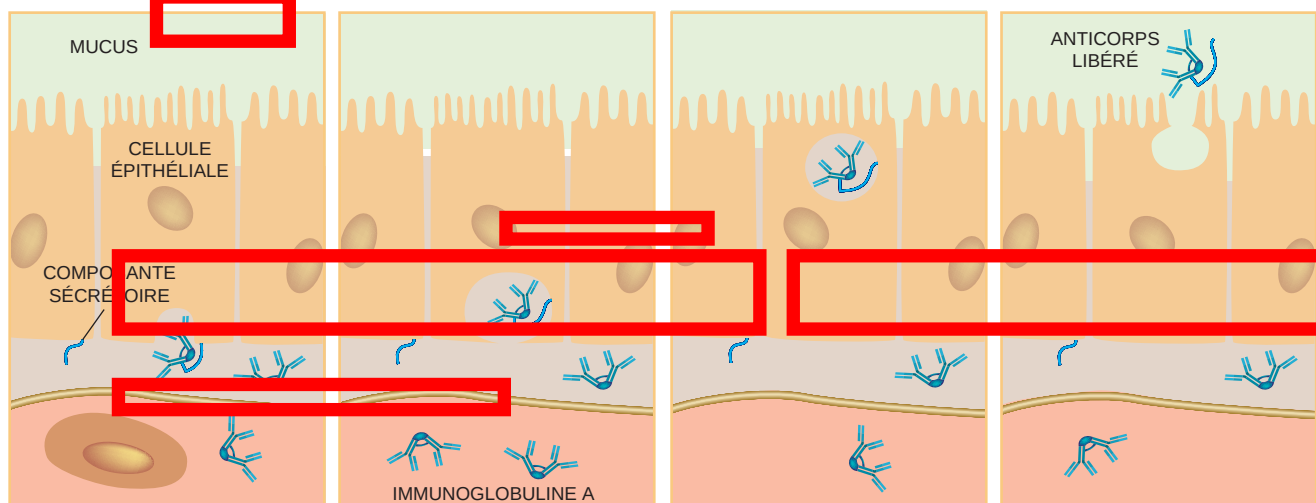
Les effecteurs du système immunitaire des muqueuses se répartissent en deux catégories : les effecteurs cellulaires (lymphocytes et macrophages) et les effecteurs humoraux, essentiellement les immunoglobulines A sécrétatoires.

C'est au début du XX^e siècle que le pathologiste russe Alexander Besredka a découvert la présence d'anticorps dans les sécrétions des muqueuses. Ces anticorps étaient-ils produits localement? Provenaient-ils du sang? Si la première hypothèse a rapidement été retenue, ce n'est que dans les années 1950 que l'on a découvert que la plupart des anticorps des muqueuses sont d'un type particulière. Contrairement aux immunoglobulines A présentes dans le sérum, qui sont des monomères, celles présentes dans les sécrétions sont des dimères : deux monomères identiques sont reliés par une petite protéine, nommée la chaîne J (J pour *jonction*) à laquelle se lie également une autre protéine, dite composante sécrétoire, qui participe au transport de ces anticorps à travers la couche épithéliale.

Chez l'homme, les immunoglobulines A sont incontestablement celles dont la synthèse quotidienne est la plus importante : 66 milligrammes par kilogramme de poids corporel et par jour. Elles sont présentes dans toutes les sécrétions (par exemple, les larmes, la salive, le suc intestinal, le lait). Elles sont produites par des plasmacytes, issus de la différenciation des lymphocytes et sensibilisés, lors d'une première rencontre avec un antigène dans une plaque de Peyer ; ils ont ensuite migré via les vaisseaux lymphatiques, puis le sang, vers les sites effecteurs, où leur différenciation s'est achevée. Les immunoglobulines A forment, avec les chaînes J, des complexes qui sont excrétés et reconnus par la composante sécrétoire, exprimée à la surface des cellules épithéliales. Cette

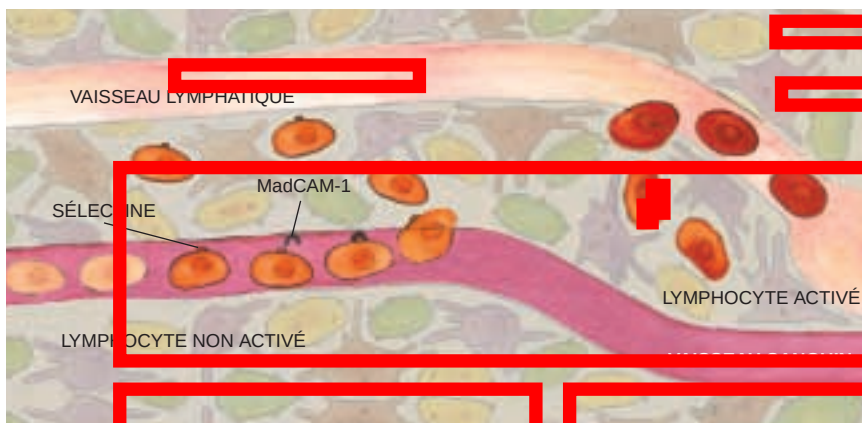
dernière fonctionne comme un récepteur de immunoglobulines A et assure leur transport à travers les cellules épithéliales vers le milieu extérieur. Les immunoglobulines A ainsi associées à la chaîne J et à la composante sécrétoire sont résistantes, conservant leurs fonctions biologiques dans des milieux riches en enzymes. Pourtant certaines bactéries pathogènes responsables de méningites, de pneumonies ou de maladies sexuellement transmissibles ont acquis la capacité de produire des protéases qui détruisent certaines immunoglobulines A.

L'importance des immunoglobulines A dans l'immunité est d'abord attestée par le pouvoir protecteur, pour le nouveau-né, du lait maternel, riche en anticorps de type immunoglobulines A sécrétoires. Par ailleurs certaines personnes qui ne produisent pas ces anticorps sont plus sensibles aux infections des muqueuses. Les immunoglobulines A sécrétoires empêchent la pénétration des germes pathogènes à l'intérieur de l'organisme en les maintenant dans les sécrétions externes des muqueuses et en favorisant leur élimination : les micro-organismes sont capturés par les immunoglobulines A, qui, grâce à leur forme dimérique, forment rapidement un réseau imbriqué d'immunoglobulines piégeant les agents pathogènes (voir la figure 5). Ces agglutinations de micro-organismes et d'immunoglobulines A forment des complexes immuns éliminés avec le mucus qui recouvre les muqueuses. Les immunoglobulines A neutralisent également les virus et certaines toxines et enzymes bactériennes en se



3. LE TRANSPORT des immunoglobulines A sécrétoires se fait aussi par transcytose. Ces anticorps sont libérés par des cellules spécialisées, des plasmacytes, situés juste au-dessous de la membrane basale de

l'épithélium. Ils traversent la membrane basale, sont pris en charge par un récepteur spécialisé, la composante sécrétoire, transportés dans une vésicule à travers la cellule épithéliale et libérés dans le mucus.



4. LES LYMPHOCYTES non sensibilisés qui circulent dans le sang portent, en surface, des molécules d'adhérence : la L-sélectine et l'intégrine $\alpha 3 \beta 1$. Les cellules des veinules où ils circulent portent des molécules MADCAM-1 qui fixent la L-sélectine et l'intégrine. Les lymphocytes ainsi captés quittent les vaisseaux qui sillonnent les plaques de Peyer. Au contact des cellules présentatrices d'antigènes, les lymphocytes sont activés, se multiplient et poursuivent leur différenciation. Ensuite, ils quittent les plaques de Peyer par les vaisseaux lymphatiques et rejoignent la circulation générale. Ils peuvent ainsi coloniser différentes muqueuses qui confèrent l'immunité acquise localement à l'organisme entier.

fixant sur leurs structures antigéniques ; de plus, elles empêchent les agents pathogènes d'adhérer aux cellules épithéliales. De surcroît, une même immunoglobuline A peut se lier à une bactérie et, simultanément, à une molécule nommée lactoferrine, qui est une sorte de pompe à fer. L'immunoglobuline fait le relais entre la lactoferrine et la bactérie, qui perd son fer vital et qui finit par être détruite.

Malgré l'importance des immunoglobulines A dans l'immunité des muqueuses, l'immunité cellulaire a un rôle notable. De nombreux lymphocytes sont présents au sein des muqueuses, surtout des lymphocytes T auxiliaires qui portent le récepteur CD_4 . Certains lymphoblastes T (les précurseurs des lymphocytes T) peuvent se rendre dans l'épithélium des muqueuses et se différencier en lymphocytes intraépithéliaux, lesquels portent souvent le récepteur CD_8 . Ils jouent un rôle dans l'immunité cellulaire cytotoxique.

Les lymphocytes des muqueuses sécrètent en permanence d'importantes quantités de cytokines, telles que l'interféron-gamma et l'interleukine-4, et maintiennent les muqueuses dans un état d'inflammation physiologique permanente, mais contrôlée. Ces cytokines semblent augmenter la production des molécules nécessaires à la présentation des antigènes, notamment les molécules du complexe majeur d'histocompatibilité, et améliorer le transport des immunoglobulines A.

Les réactions du système immunitaire des muqueuses contre les sub-

stances extérieures ne doivent pas être trop violentes : ainsi, les substances de l'alimentation ne doivent déclencher ni hypersensibilités ni réactions allergiques. Un mécanisme de tolérance garantissant la maîtrise des réactions immunitaires.

La tolérance orale

Au début du XX^e siècle, H. Gideon Wells avait remarqué que le système immunitaire de jeunes animaux ne réagissait pas à certaines protéines injectées, à condition qu'elles aient été préalablement administrées par voie orale. Depuis, ces observations ont été confirmées pour de nombreux antigènes. Par ailleurs, cette «tolérance» serait également induite par d'autres muqueuses.

La tolérance correspond à un état d'insensibilité immunologique spécifique vis-à-vis d'un antigène qui, dans d'autres circonstances, déclencherait une réaction immunitaire efficace. L'administration orale peut induire une tolérance, ou encore une mise au repos de tous les paramètres immunitaires, que ce soit la production d'anticorps de type immunoglobulines G, M et E, les activations cellulaires ou encore la prolifération des lymphocytes. Cependant, après toléransation par absorption orale, les lymphocytes B, producteurs d'anticorps, semblent récupérer beaucoup plus vite leur capacité de réagir à l'antigène que les lymphocytes T, et l'immunité cellulaire est plus facile à tolérer que l'immunité humorale (celle qui repose sur la production des anticorps).

Cette différence reflète probablement une sensibilité à la tolérance qui varie selon les sous-populations de lymphocytes T auxiliaires produisant des cytokines. Certaines cytokines, telles que l'interféron gamma et l'interleukine 2, favorisent ce que l'on nomme la voie Th_1 , c'est-à-dire des réactions de type cellulaire : c'est la voie des réactions de défense dirigées contre certains micro-organismes pathogènes, notamment ceux qui se logent dans les cellules, avec activation des acteurs cellulaires de l'immunité. Au contraire, d'autres cytokines, telles que les interleukines 4 et 5 déclenchent plutôt la production d'anticorps : c'est la voie nommée Th_2 , ou encore voie de l'allergie. Les deux voies, Th_1 et Th_2 , sont antagonistes : en présence de micro-organismes pathogènes intracellulaires, les lymphocytes activés produisent de l'interféron gamma qui inhibe la fonction des lymphocytes de la voie Th_2 . Inversement, l'interleukine 4 inhibe la fonction des lymphocytes de la voie Th_1 . Toutefois, d'autres paramètres interviennent également dans les phénomènes de tolérance différentielle.

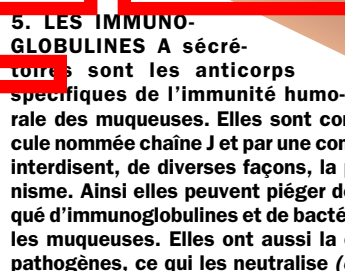
La tolérance, par exemple aux antigènes de la flore bactérienne ou aux antigènes alimentaires, s'établit assez vite après administration orale. Un à deux jours après cette administration, les réactions immunitaires systémiques sont déjà notablement réprimées et l'insensibilité maximale est atteinte au bout d'une à deux semaines. Certains aspects de cette tolérance peuvent perdurer pendant des mois voire des années. La persistance de l'antigène assure, en partie, la longévité de la tolérance, laquelle dépendrait aussi de la dose initiale : l'absorption d'une dose importante déclenche une tolérance plus longue qu'une dose faible. De surcroît, de très faibles doses amorcent parfois les réactions immunitaires plus qu'elles ne les inhibent : de très faibles doses d'antigènes alimentaires prédisposent parfois certains enfants à l'eczéma. Enfin, l'administration orale répétée d'un antigène déclenche généralement une meilleure tolérance que son application unique, même à haute dose.

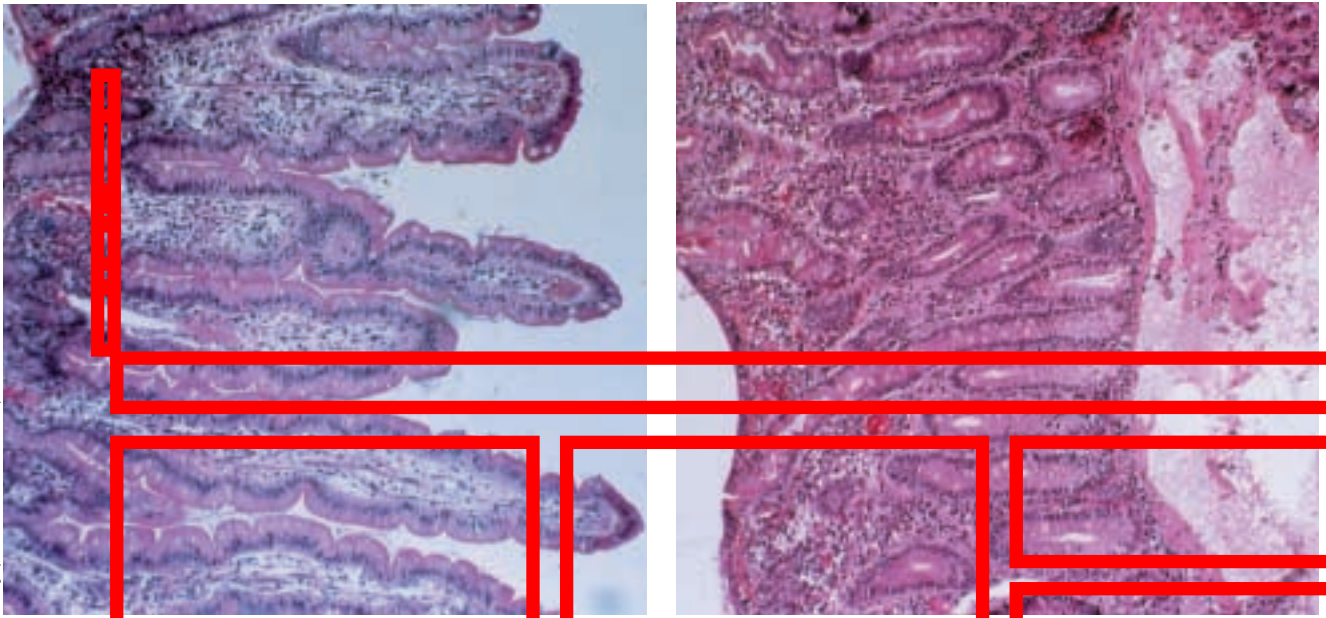
Deux mécanismes principaux semblent gouverner la tolérance : soit la mise au repos, ou anergie, de certaines cellules, ou bien l'autodestruction, ou apoptose, des cellules qui

L'induction de la tolérance dépend aussi du patrimoine génétique, de l'âge, du statut immunologique et de l'état nutritionnel. Les gènes codant les molécules de présentation des antigènes, notamment celles du complexe majeur d'histocompatibilité, semblent jouer un rôle dans la tolérance. Certaines lignées de souris deviennent plus difficilement tolérantes que d'autres, dont elles diffèrent uniquement par les gènes codant ces molécules d'histocompatibilité. Enfin, la tolérance augmente avec l'âge, ce qui expliquerait peut-être que les

Malgré le rôle protecteur des immunoglobulines A sécrétées, la plupart des individus qui ont un déficit ne sont pas malades parce

La maladie cœliaque, ou entéropathie au gluten, survient, chez des personnes génétiquement prédisposées, après ingestion du gluten présent dans la farine. Le gluten déclenche une inflammation de la muqueuse de l'intestin grêle par les lymphocytes *T*, qui aboutit à une atrophie des villosités de la muqueuse : la surface d'absorption de la muqueuse intestinale diminue, de sorte que l'absorption des aliments se fait mal. Plusieurs perturbations immunologiques surviennent : la perte de tolérance vis-à-vis de la gliadine, la principale protéine des farines de céréales, et une réaction auto-immune dirigée contre la muqueuse digestive, notamment contre un constituant de la matrice extracellulaire, la transglutaminase. Des anticorps anti-gliadine et anti-transglutaminase apparaissent dans le sérum de ces personnes.





6. LES VILLOSITÉS intestinales assurent l'absorption des aliments au travers de la paroi intestinale. Contrairement aux villosités normales (a gauche), celles des personnes ayant une maladie cœliaque sont notablement réduites (à droite), de sorte que ces malades maigrissent.

La maladie cœliaque touche plus d'une personne sur 1 000 en Europe. Les personnes atteintes présentent une diarrhée chronique accompagnée de carences nutritionnelles qui résultent de la mauvaise absorption des aliments. Elles perdent du poids et se sentent fatiguées. Souvent, le diagnostic n'est établi qu'au moment de l'apparition des complications de la maladie cœliaque, une anémie, des carences en vitamines, ou encore des troubles osseux. Le diagnostic formel repose sur la mise en évidence d'une atrophie des villosités intestinales sur une biopsie (voir la figure 6). Le traitement consiste à éliminer le gluten de l'alimentation.

La maladie de Crohn et la rectocolite ulcéro-hémorragique sont les deux principales maladies inflammatoires du tube digestif. La maladie de Crohn est caractérisée par une inflammation profonde d'une partie du tube digestif, de la bouche à l'anus. Au contraire, dans la rectocolite, l'inflammation est limitée au gros intestin. Ces deux maladies se manifestent, le plus souvent, par des diarrhées intermittentes chroniques, de la fièvre, une perte de poids, et des crampes douloureuses de l'abdomen. Dans les deux cas, l'inflammation de la muqueuse intestinale est caractérisée par une infiltration par de nombreuses cellules, notamment des lymphocytes et des macrophages. L'inflammation physiologique du tube digestif n'est plus contrôlée : des cytokines et des immunoglobulines G sont

produites en excès par les cellules de la muqueuse intestinale. On détecte, dans le sang des personnes atteintes, des anticorps spécifiques dirigés contre la levure de boulanger dans la maladie de Crohn, et contre des constituants des cellules polynucléaires neutrophiles (un type de cellules du système immunitaire) dans la rectocolite ulcéro-hémorragique.

L'absorption des antigènes par les muqueuses est limitée tant par des barrières mécaniques et chimiques que par la présence d'anticorps de type immunoglobulines A. Toutefois, de petites quantités d'antigènes sont captées et leur permanence, surtout par la muqueuse digestive. Normalement, les réactions immunitaires restent maîtrisées lors d'une nouvelle présentation de l'antigène, grâce aux mécanismes de tolérance orale : les manifestations allergiques, notamment d'origine alimentaire, résulteraient d'une rupture de la tolérance orale à l'égard d'un antigène. Lorsque cela survient, des immunoglobulines E sont libérées dans la circulation sanguine et se fixent sur leurs récepteurs spécifiques portés par certaines cellules du système immunitaire, les basophiles et les mastocytes, présentes dans tout l'organisme. C'est ainsi que les allergies alimentaires s'accompagnent, outre des symptômes digestifs (chatouillement au niveau de la muqueuse buccale, nausées, vomissements, diarrhée), de manifestations cutanées (urticaire,

eczéma), respiratoires (toux, sifflement, asthme), et éventuellement générales (hypotension, troubles du rythme cardiaque).

Les vaccins muqueux

L'immunisation par voie orale fut démontrée – près de 20 siècles après Mithridate – par Paul Ehrlich, le physiologiste allemand qui est l'un des pères de l'immunologie. Il montra que l'administration orale de faibles quantités de substances très toxiques protège contre des doses importantes de ces poisons. Une vaccination efficace par voie nasale a été décrite pour la première fois au début du XX^e siècle ; on montra alors qu'une seule administration intranasale d'un extrait de *Streptococcus pneumoniae* protégeait des lapins contre une infection par le pneumocoque.

Depuis, de nombreuses études ont confirmé l'efficacité des vaccinations par l'intermédiaire des muqueuses. Un des vaccins le plus utilisés dans le monde et qui a contribué à la quasi-disparition de la poliomyélite est administré par voie orale. Cette voie d'administration offre plusieurs avantages. Contrairement aux vaccinations par injection, les vaccinations orales ou nasales déclenchent une immunité des muqueuses, ce qui est particulièrement intéressant, puisque près de 90 pour cent des germes infectieux pénètrent par les muqueuses. Par ailleurs, la vaccination orale ou nasale

évite l'utilisation de seringues, ce qui diminue le prix de la vaccination, ainsi que la douleur due aux injections.

Toutefois, administrés par les muqueuses, la plupart des antigènes n'induisent qu'une réaction immunitaire de faible intensité, et beaucoup peuvent même déclencher une tolérance. Afin de potentialiser les réactions immunitaires des muqueuses, les antigènes doivent être présentés par des vecteurs adaptés ou avec des molécules immunostimulantes, nommées adjuvants. Un des adjuvants muqueux les plus puissants est la toxine du choléra. La coadministration de cette toxine avec un antigène stimule une réaction immunitaire intense contre l'antigène. Toutefois, cette toxine est responsable des diarrhées typiques du choléra, et l'on ignore encore s'il est possible de dissocier son activité de toxine et son activité d'adjuvant.

Stimuler le système immunitaire des muqueuses

Pour augmenter l'immunogénicité au niveau des muqueuses, on peut aussi introduire les antigènes dans des vecteurs qui les protègent contre une dégradation prématurée et qui se lient spécifiquement aux cellules qui activent les réactions immunitaires. Deux types de vecteurs ont été élaborés : les particules inertes et les vecteurs vivants. Les capsules constituées de polymères capables d'adhérer aux muqueuses ont été mises au point. Certaines de ces particules, qui contiennent à la fois l'antigène et des adjuvants, se sont révélées efficaces en laboratoire.

On envisage aussi d'utiliser des vecteurs recombinants vivants qui produiraient les antigènes directement sur les sites d'activation des réactions immunitaires. Des vaccins expérimentaux sont constitués de bactéries vivantes ou de virus modifiés qui

produisent des antigènes étrangers. Encore faut-il que les vecteurs soient parfaitement inoffensifs et qu'ils persistent chez les personnes vaccinées suffisamment longtemps pour déclencher et entretenir les réactions immunitaires. Des bactéries non pathogènes, telles les bactéries lactiques utilisées dans l'alimentation, ou des bactéries pathogènes atténuées sont à l'étude. Plusieurs vaccins ont été testés avec succès sur des animaux de laboratoire, et certains l'ont aussi été chez l'homme.

On tente aussi d'exploiter le système immunitaire des muqueuses pour vacciner contre le virus de l'immunodéficience humaine, car, dans plus de 80 pour cent des infections, le VIH est transmis par les muqueuses sexuelles. On a constaté que, chez les personnes séropositives, les autres maladies sexuellement transmissibles sont plus fréquentes et plus graves. Une stimulation des muqueuses sexuelles, avant que la charge virale, c'est-à-dire le nombre de particules virales infectieuses par millilitre de sang, soit trop importante serait efficace pour lutter contre le VIH et peut-être aussi contre les co-infections sexuellement transmissibles.

L'équipe de Jay Berzofsky, à Bethesda, a montré qu'une vaccination rectale avec des antigènes du VIH active une réaction immunitaire protectrice chez la souris. Toutefois, cette approche vaccinale ne résout pas la difficulté que pose toute vaccination potentielle contre le virus : la formidable capacité du VIH à modifier ses structures antigéniques, ce qui lui permet d'échapper aux défenses immunitaires.

Bien qu'aujourd'hui très peu de vaccins soient administrés par la voie des muqueuses, ce type de vaccination contre des agents infectieux, mais aussi contre des maladies inflammatoires et auto-immunes devrait rapidement progresser.

Françoise MASCART dirige l'unité de recherche sur l'immunité des muqueuses au sein du laboratoire d'immunologie expérimentale de l'Université Libre de Bruxelles. Camille LOCHT dirige l'unité INERM 11447 à l'Institut Pasteur de Lille.

F. MASCART-LEMONE et A. SCHMIT, *Maladie coeliaque de l'adulte*, in *Encycl. Méd. Chir.*, éditions Elsevier, Gastro-entérologie, 9-053-A-20, 1998.

P. BRANDTZAEG, I. N. FARSTAD et

G. HARALDSEN, *Regional specialisation in the mucosal immune system : primed cells do not always home along the same track*, in *Immunol. Today*, vol. 20, pp. 267-277, 1999.

C. LOCHT, *Live bacterial vectors for intranasal delivery of protective antigens*, in *Pharmaceutical Science and Technology Today*, vol. 3, pp. 121-128, 2000.

M. B. MAZANEC et al., *A three-tiered view of the role of IgA in mucosal defense*, in *Immunol. Today*, vol. 14, pp. 430-435, 1993.

La culture adoucit la surpopulation

FRANS DE WAAL • FILIPPO AURELI • PETER JUDGE

Les fortes densités de population engendrent-elles la violence ? Cette croyance, fondée sur des recherches menées sur les rats, ne s'applique ni à l'homme ni aux autres primates.

Au XVIII^e siècle, l'économiste anglais Thomas Malthus (1766-1834) prévoyait que la croissance démographique augmenterait les famines, la misère et le vice. En 1962, dans un article, le psychologue John Calhoun reprit ces thèses et les testa expérimentalement. Il admit la relation entre la surpopulation et les famines ou les maladies, mais explora l'influence de la surpopulation sur l'agressivité : plaçant des rats dans un espace limité, il observa des meurtres, des agressions sexuelles et du cannibalisme. Les comportements violents s'observaient principalement dans la zone centrale d'alimentation, malgré la présence de nourriture en d'autres endroits de la ménagerie : par un phénomène de stimulation sociale, les rats étaient irrésistiblement attirés vers le centre, alors que nombre d'entre eux ne pouvaient atteindre le distributeur de nourriture qui s'y trouve.

Cette expérience fut rapidement célèbre, et nombre d'intellectuels n'hésitèrent pas à comparer certains comportements violents des êtres humains, telles des émeutes, à ceux de ces rats. On voyait les prémices de l'anarchie ou de la dictature dans la propension des êtres humains à se regrouper dans les villes.

Une telle extrapolation est hâtive, et l'observation des populations humaines montre qu'elle est indue. En nous fondant sur les statistiques démographiques publiées par l'Organisation des Nations unies, nous avons, par exemple, montré que le nombre d'homicides par habitant n'est pas corrélé à la densité de la population.

La relation existe-t-elle toutefois, masquée par d'autres phénomènes ? Pour affiner la comparaison et écarter des facteurs tels que le niveau de vie, nous avons refait l'analyse en répartissant les pays dans trois classes : les pays à économie de marché, les pays de l'Est et les pays en développement. Cette fois, nous observons une corrélation significative entre la démographie et le nombre de meurtres... mais inversée ! La criminalité est supérieure dans les pays de l'Est, pourtant moins peuplés que les pays en développement. En outre, pour les pays à économie de marché, les États-Unis ont le plus fort pourcentage d'homicides, malgré une faible densité de population ; les Pays-Bas, dont la densité de population est 13 fois supérieure, ont un pourcentage d'homicides huit fois inférieur.

Comme la criminalité est souvent plus élevée en ville qu'à la campagne, nous avons vérifié notre analyse en tenant compte, pour chaque pays, de la proportion de population urbaine. Là encore, nous n'avons pas observé de corrélation entre la densité de population et le nombre d'homicides. L'histoire et la culture semblent bien plus importantes que l'espace disponible.

Ces conclusions sont confirmées par les observations de groupes plus restreints. Par exemple, les rassemblements d'enfants et d'étudiants sont parfois l'occasion d'un déploiement d'agressivité légère, mais guère plus. Dans les années 1980, plusieurs études ont confirmé que l'espèce humaine ne réagit pas comme les rats à la surpo-

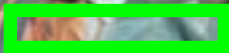
pulation. Par exemple, le psychiatre Andrew Baum et ses collaborateurs de l'Université de Bethesda ont découvert que les étudiants des résidences universitaires, ou des parcs d'agences installés avec de nombreuses autres personnes, passent moins de temps en groupe que les étudiants qui jouissent de plus d'espace : ils ont plus souvent leur porte de chambre fermée.

Nous ne sommes pas des rats

Autrement dit, l'espèce humaine n'a pas de tendance au regroupement social. Aujourd'hui, lors des trajets qui conduisent sur les lieux de travail ou lors des courses de Noël, par exemple, les individus se regroupent en grand nombre sans perdre le contrôle de leur comportement. Ainsi le modèle des rats ne s'applique-t-il pas aux humains. Pourquoi ? Notre culture et notre intelligence font-ils de nous des animaux particuliers ? La gestion de la surpopulation fait-elle partie de l'héritage ancien ? L'étude des primates éclaire ces questions.

Dans les années 1960, les premières études sur les primates semblaient confirmer les observations faites chez les rats : en Inde, les singes des villes sont plus agressifs que ceux des forêts ; dans les zoos, les singes

1. LA CROISSANCE DE LA POPULATION n'a pas les conséquences catastrophiques, telles les famines, la pénurie et la déviance sociale, que Malthus prédisait au XVIII^e siècle. Les études indiquent que les êtres humains ont des comportements sociaux qui les aident à supporter la promiscuité.



apparemment dominés par des mâles terrifiants au sommet d'une hiérarchie sociale qui semblait due à la captivité, étaient excessivement violents. On supposait évidemment qu'en opposition, la paix et l'égalité régnaient dans la nature.

Les études contredirent bientôt ces idées. L'agressivité, par exemple, augmentait parfois avec la densité, et dans certaines circonstances, diminuait. Ainsi, des primatologues observèrent des combats violents, parfois jusqu'à la mise à mort, lorsqu'un groupe de macaques était transporté dans un enclos 70 fois plus vaste que l'ancien. Puis, après deux ans et demi passés dans cet enclos, la même augmentation d'agressivité eut lieu quand les singes furent remis dans un espace réduit.

Ces expériences mesuraient l'effet des changements de densité démographique. D'autres analysèrent la modification des groupes : quand on ajoute des individus à des groupes déjà formés sans que l'environnement soit modifié, on observe la xénophobie de ces animaux. Parmi les 17 études les mieux conçues de ces dernières décennies, 11 seulement ont montré une agressivité qui augmentait avec la densité de population.

Parallèlement, on découvrait que les primates sauvages n'étaient pas

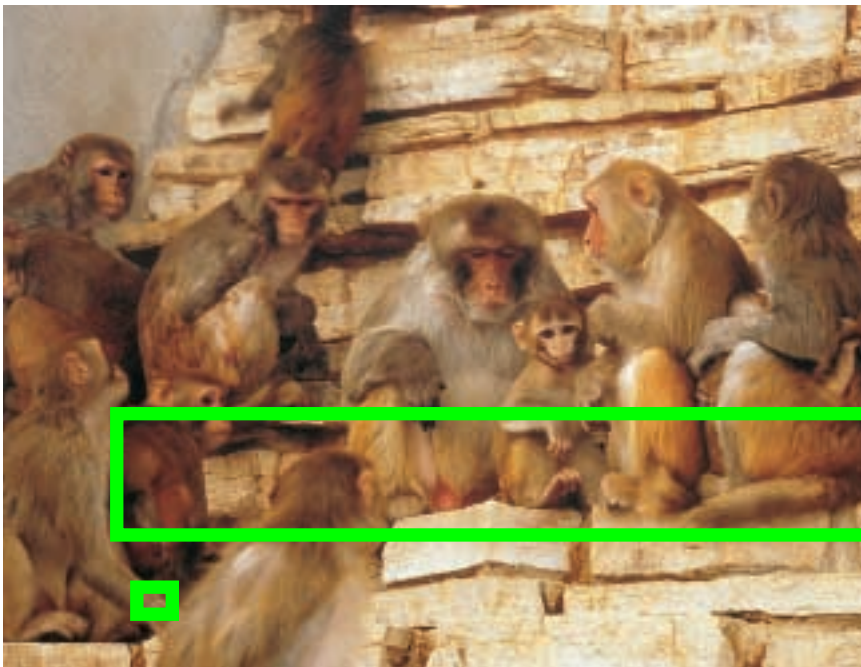
les créatures pacifiques et égalitaires que l'on pensait. Dans les années 1970, des zoologistes ont observé des agressions nouvelles chez de nombreuses espèces de singes, des macaques aux chimpanzés, ainsi que des hiérarchies strictes bien définies et stables pendant des décennies. Le stress de la vie sauvage est réel : on l'a confirmé en mesurant les concentrations en cortisol (une hormone) dans le sang de singes sauvages : ces concentrations dépendent du statut hiérarchique des animaux (voir *Le stress chez les babouins*, par Robert Sapolsky, *Pour la Science*, mai 1990).

Ces études conduisirent naturellement à une question : comment les primates évitent-ils les conflits dans les situations de surpopulation ? Au zoo d'Arnhem, aux Pays-Bas, l'étude d'une très grosse colonie de chimpanzés captifs nous a livré le premier indice. En été, les singes vivent sur une vaste île boisée, tandis qu'ils sont regroupés dans un bâtiment chauffé pendant l'hiver ; la superficie par animal est alors divisée par 20, mais les conflits augmentent peu. De surcroît, l'entassement favorise des comportements sociaux tels que les toilettes, les embrassades et les postures de soumission. Ce comportement social évite-t-il les conflits ? Nous avons étudié expérimentalement cette

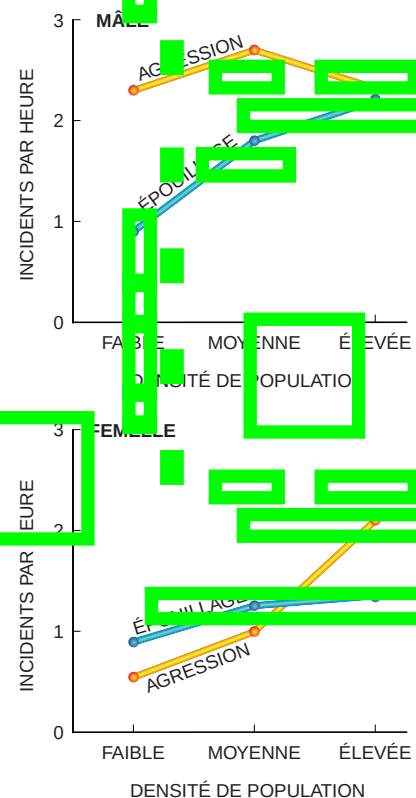
question. Bien entendu, la surpopulation multiplie les occasions de conflits, mais nous subodorions que les primates avaient des stratégies pour limiter les effets néfastes de la surpopulation. Comme certaines de ces aptitudes devaient être acquises, nous avons supposé que les animaux qui avaient longtemps vécu dans un milieu forte densité avaient une « culture sociale » différente, comme dans l'espèce humaine, où les comportements sont divers : lors d'une conversation, les Britanniques restent plus distants que les Arabes.

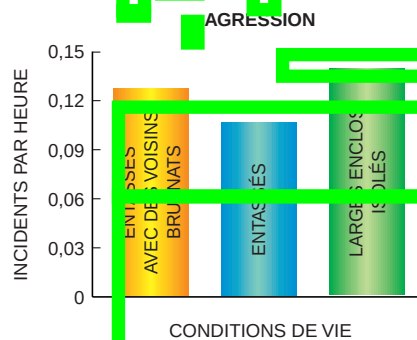
La culture, un moindre mal

Nous avons étudié 122 macaques rhésus répartis sur trois sites différents : dans les enclos extérieurs surpeuplés du centre de primatologie du Wisconsin dans les vastes parcs du centre de primatologie d'Atlanta et sur l'île Morgan, au large de la Caroline du Sud. Sur cette dernière, les primates ont 2 000 fois plus d'espace que dans le centre du Wisconsin. Dans les trois groupes, les animaux des deux sexes cohabitent depuis de nombreuses années, souvent depuis plusieurs générations. Les contacts avec l'homme, pour la nourriture et les soins, étaient comparables. Les sociétés de macaques rhésus sont subdivisées en

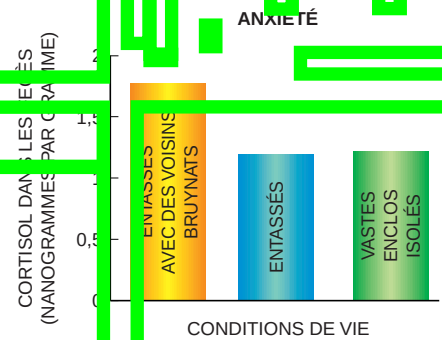


2. PLUS LES MACAQUES RHÉSUS SONT NOMBREUX dans un espace donné, plus la fréquence de toilettage apaisant entre mâles, et des femelles par les mâles, augmente. Les singes s'adaptent ainsi aux situations d'entassement. Parmi les femelles non apparentées, le nombre d'agressions augmente avec l'entassement, mais les toilettes qui réduisent les conflits sont également plus fréquents.





3. LES CHIMPANZÉS SAUVAGES se battent pour dominer le territoire. En captivité, ils sont dérangés par la proximité de congénères bruyants. L'étude de ces singes dans des conditions de vie différentes – entasses avec des voisins bruyants, entassés sans bruits et dispersés dans de vastes enclos isolés – a montré que les agressions (b) ne sont pas plus nombreuses, mais que le stress varie selon le bruit des voisins : les chimpanzés enfermés dans de petites enclos et exposés aux vocalisations d'autres groupes ont des concentrations en cortisol (une hormone du stress) supérieures à celle de singes d'autres groupes.



sous-groupes, nommés clans matrilinéaires, formés de femelles apparentées et de leur progéniture.

Les femelles restent ensemble toute leur vie, tandis que les mâles quittent leur groupe natal à la puberté. Les macaques rhésus distinguent les membres de leur famille des autres, et les relations privilégiées, tel le toilettage social, sont plus intenses entre les membres d'un même clan matrilinéaire. Les femelles d'un clan se soutiennent fermement dans les conflits avec d'autres clans matrilinéaires. La hiérarchie stricte de ces sociétés et leur tempérament querelleur font des macaques rhésus des sujets d'étude idéaux. Comment supportent-ils la surpopulation ?

La première observation a beaucoup surpris : dans des conditions de forte densité, l'agressivité des mâles adultes n'est pas modifiée ; mieux encore, les relations privilégiées sont plus fréquentes. Ils toilettent également davantage les femelles, et celles-ci en font de même avec les mâles. Le toilettage est un comportement apaisant : le rythme cardiaque d'un singe ralentit lorsqu'il est toiletté. De surcroît, les femelles découvrent leurs dents plus souvent que les mâles : il s'agit d'une mimique de soumission qui apaise un individu domi-

nant, éventuellement agressif (voir la figure 2).

Cependant, les femelles réagissent différemment envers les autres femelles : l'intérieur des clans matrilinéaires, les conflits sont plus nombreux, mais ne modifient pas le niveau déjà élevé des échanges privilégiés. Avec les membres des autres clans matrilinéaires, les agressions augmentent et ce pair avec le toilettage et les manifestations de soumission.

Ainsi, au sein d'un groupe matrilinéaire, les relations sont peu perturbées par les conflits, car ces derniers sont compensés par les réconciliations et les contacts réconfortants. L'augmentation de la densité n'a alors que peu d'effet ; seuls les liens familiaux doivent être réaffirmés plus souvent.

En revanche, entre clans matrilinéaires, les relations amicales sont rares et les conflits fréquents. La réduction de l'espace restreint les possibilités de fuite et augmente le risque de conflits ; pourtant, les femelles de macaques rhésus font un réel effort pour améliorer ces relations potentiellement explosives.

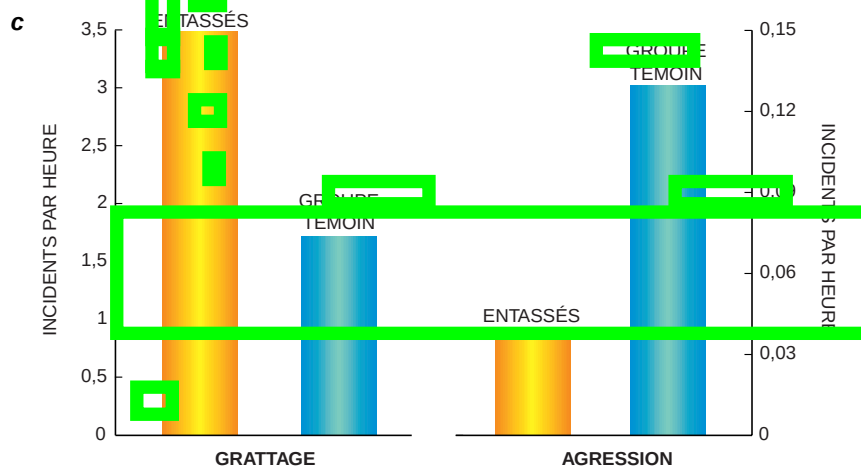
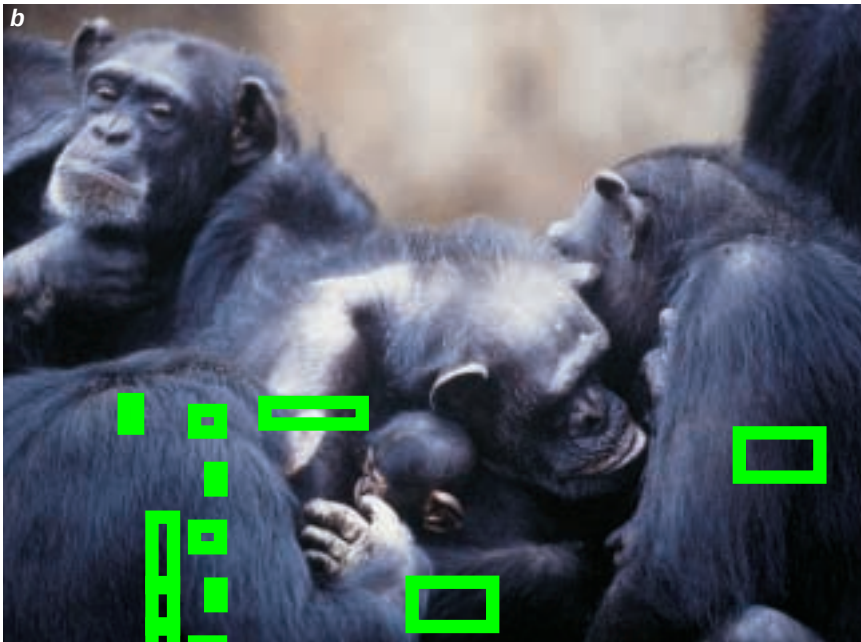
Nous nous sommes ensuite intéressés aux chimpanzés : nos plus proches parents nous ressemblent physiquement, psychologiquement

et sur le plan cognitif. Leur organisation sociale ressemble aussi à celle des êtres humains : les liens affectifs entre mâles sont forts (ce phénomène est rare dans la nature), les échanges nombreux et les jeunes dépendent longtemps de leur mère. Les chimpanzés sauvages mâles ont un comportement parfois violent : ils envahissent parfois les territoires voisins et tuent des mâles ennemis ; en captivité, ces affrontements sont évités, car les différents groupes sont séparés par des clôtures.

Le sang-froid des chimpanzés

L'étude de plus de 100 chimpanzés, répartis en plusieurs groupes au Centre de primatologie d'Atlanta, a montré que la surpopulation dans les enclos ne modifie pas l'agressivité. Les chimpanzés poursuivent leur toilettage et leurs comportements d'apaisement, et semblent maîtriser les éventuelles tensions sociales dues à la promiscuité (voir la figure 3).

On admet difficilement que les animaux contrôlent leurs émotions, mais les chimpanzés sont capables de sang-froid et de dissimulation : ils rusent parfois, cachant des intentions hostiles jusqu'à ce que l'adversaire arrive



4. L'«EFFET ASCENSEUR» explique le comportement des chimpanzés et des êtres humains face à la surpopulation : lors de courtes périodes d'entassement, les individus limitent les interactions sociales et évitent ainsi les conflits (a). Les chimpanzés font de même en réduisant leurs interactions agressives (b). Toutefois, les situations de surpopulation accroissent l'anxiété : les chimpanzés confinés se grattent plus souvent (c).

à leur portée. Dans notre étude, nous avons surtout enregistré les réponses des chimpanzés aux vocalisations des groupes voisins. Celles-ci provoquent le plus souvent des hululements et des démonstrations d'attaque, qui, dans la nature, se manifestent lors des intrusions territoriales.

Toutefois, dans un espace restreint, l'excitation des individus perturbe le groupe ; de ce fait, les chimpanzés réagissent trois fois moins aux vocalisations des voisins que lorsqu'ils disposent de plus d'espace. Suffisamment intelligents, ils évitent ainsi de réagir à des stimuli extérieurs quand leurs réactions créeraient des difficultés. Un tel comportement n'étonne plus les primatologues qui étudient les chimpanzés en milieu naturel : les mâles en patrouille sur le territoire restent silencieux lorsque le risque d'être détecté par leurs voisins leur est préjudiciable.

L'inhibition d'une réaction naturelle a un «coût» biologique : un stress permanent affaiblit le système immunitaire, réduisant la longévité des animaux. Nous étudions le stress des chimpanzés grâce à deux techniques non invasives. D'une part, nous enregistrons la fréquence de grattage : à l'instar de étudiants devant une question difficile, les primates révèlent leur anxiété en se grattant. D'autre part, nous analysons la concentration en cortisol des excréments. Ces deux mesures ont montré que le niveau de stress n'est pas influencé par l'espace restreint ou étendu, mais qu'il augmente avec l'intensité des vocalisations des voisins.

L'«effet ascenseur»

L'absence d'agressivité dans des conditions de forte densité ne signifie pas que les chimpanzés entassés sont heureux et détendus. Le maintien de l'ordre social leur demande beaucoup d'efforts, et les animaux préfèrent avoir plus d'espace : chaque printemps, quand les chimpanzés du zoo d'Orlèans entendent la porte de l'enclos extérieur s'ouvrir pour la première fois, ils crient de joie, se ruent à l'extérieur et, dans un tutoiement général, s'étreignent, s'embrassent et se donnent de grandes claque sur le dos.

Lors de courtes périodes d'entassement intense, la situation est encore plus complexe. Les macaques rhé-

sus sont plus agressifs et plus menaçants, mais ils ne deviennent pas violents. Les menaces maintiennent les congénères à distance et évitent ainsi un contact indésirable. Les animaux limitent les interactions sociales actives : ils adoptent un profil bas pour fuir les ennuis.

Les chimpanzés, qui maîtrisent mieux leurs émotions, sont même moins agressifs quand ils sont entassés pendant une courte période. Cette réaction, nommée «effet ascenseur», face aux risques d'une promiscuité passagère, rappelle celle des personnes, dans un ascenseur, qui, pour réduire les frictions, restent immobiles, évitent le regard des autres et parlent à voix basse (voir la figure 4).

Nous sommes les descendants d'une longue lignée d'animaux sociaux, dotés d'importantes capacités d'adaptation à des situations aussi peu naturelles que les enclos bondés ou les rues surpeuplées des villes. Cette adaptation a un coût, mais elle est certainement préférable à l'anarchie des sociétés de rats.

Frans DE WAAL est directeur au Centre de recherches sur les primates d'Atlanta. Filippo AURELI est professeur de biologie à l'Université de Liverpool. Peter JUDGE est professeur à l'Université Bloomburg, en Pennsylvanie.

F. DE WAAL, *De la réconciliation chez les primates*, Flammarion, 1992.

F. DE WAAL, *La politique du chimpanzé*, Odile Jacob, 1995.

F. DE WAAL, *Morales de singe*, Bayard Éditions, 1997.

E.T. HALL, *The Hidden Dimension*, Doubleday, 1966.

A. BAUM, *Crowding*, in *Handbook of Environmental Psychology*, vol. 1, sous la direction de D. Stokols et I. Altman, Wiley, 1987.

F.B.M. DE WAAL, *The Myth of a Simple Relation between Space and Aggression in Captive Primates*, in *Zoo Biology Supplement*, vol. 1, pp. 141-148, 1989.

F. AURELI et F.B.M. DE WAAL, *Inhibition of Social Behavior in Chimpanzees under High-Density Conditions*, in *American Journal of Primatology*, vol. 41, n° 3, pp. 213-226, mars 1997.

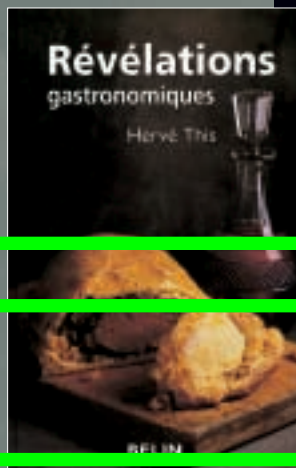
P.G. JUDGE et F.B.M. DE WAAL, *Rhesus Monkey Behaviour under Diverse Population Densities: Coping with Long-Term Crowding*, in *Animal Behaviour*, vol. 54, n° 3, pp. 643-662, septembre 1997.

Une nouvelle rencontre de la science et de l'art.



LES SECRETS DE LA CASSEROLE

Comment préparer plus de 20 litres de mayonnaise à partir d'un seul jaune d'œuf ? En explorant les bases des émulsions. Comment obtenir un bon rôti ? En empruntant à la chimie les secrets des sucres et des acides aminés. Comment obtenir de bonnes gelées ? En reprenant les résultats récents de la physico-chimie des gels. Code 1585-130 F 224 pages



RÉVÉLATIONS GASTRONOMIQUES

Encore un livre de recettes ! Oui, mais des recettes garanties par des expérimentations rigoureuses, des secrets d'aliments et des tours de main culinaires. Chaque geste culinaire est ici disséqué, commenté du triple point de vue culinaire, physico-chimique et gastronomique. Code 1756-130 F 320 pages

Ces deux ouvrages ont obtenu le Prix de l'Académie nationale de Cuisine 1997.

LA CASSEROLE DES ENFANTS

Laissés seuls pour la soirée, deux enfants doivent cuisiner leur dîner. Mais leur sens aigu de l'observation et de l'expérimentation leur fait découvrir les bases de la chimie et de la physique. Ce livre pourrait être un manuel, s'il n'évoquait les molécules et leurs transformations de façon si simple et si amusante.

Code 2309-80 F-128 pages



BELIN

Voir bon de commande page 90

La mémoire des disques durs

JON TOIGO

Les physiciens et les ingénieurs de l'industrie micro-électronique devront mettre en œuvre des principes physiques nouveaux pour augmenter la capacité des disques durs

Dans de nombreuses entreprises, le volume de données informatiques stockées double chaque année. Regroupant des informations sur plusieurs disques durs, de nombreuses organisations gèrent aujourd'hui jusqu'à des téraoctets d'information (un téraoctet correspond à environ 10 000 milliards de chiffres 0 ou 1). Grâce à des programmes qui récupèrent les données et les analysent, les sociétés analysent les tendances, améliorent les services qu'elles proposent, coordonnent leurs lignes de production, etc. Parallèlement, les utilisateurs d'ordinateurs personnels conservent sans compter d'importantes quantités d'informations : messages électroniques, photographies, logiciels de jeux...

Ces applications ne sont possibles que grâce aux disques durs magnétiques qui ont été mis au point ces dernières années. L'évolution est fulgurante : aujourd'hui, la capacité de ces disques performants et peu onéreux double tous les neuf mois, alors que les performances des puces électroniques, qui suivent la loi de Moore, ne doublent que tous les 18 mois. Le prix moyen par million d'octets (un octet est égal à huit bits, ou chiffres binaires 0 ou 1), pour les disques durs, est passé de 70 francs en 1988 à 10 centimes en 1999, et l'on prévoit qu'il sera à moins de 2 centimes en 2002. Le marché des disques durs est considérable : 145 millions de disques durs ont été vendus en 1998 et 170 millions en 1999 (voir la figure 2).

Cette croissance se poursuivra-t-elle ? Et des progrès techniques sont-ils encore possibles ? On découvre aujourd'hui que la technique atteint

une limite due à l'« effet superparamagnétique ». Cet effet apparaît quand l'énergie utilisée pour le stockage magnétique d'un chiffre binaire 0 ou 1 est comparable à l'énergie d'agitation thermique : les fluctuations perturbent le stockage. Cherchant à accroître la capacité des disques durs, les ingénieurs ont recherché des zones magnétiques et s'approchent à grands pas de la barrière fatidique. La limite due à cet effet devrait être atteinte vers 2005. Comment progresser encore ? Plusieurs solutions sont étudiées.

Des merveilles magnétiques

Les disques durs contiennent aujourd'hui des piles de plateaux, formés chacun d'un support en aluminium ou en verre, recouvert de matériau magnétique et de couches protectrices. De part et d'autre de chaque plateau, des têtes de lecture enregistrent des informations en aimantant de petits secteurs, nommés domaines, alignés dans le sens de la longueur selon des pistes concentriques (voir l'encadré des pages 68 et 69) ; les têtes de lecture récupèrent l'information en détectant les aimantations. Des bras mécaniques pilotés par des moteurs déplacent les têtes avec précision au-dessus des pistes, tandis qu'un système hydrodynamique ajuste la hauteur des têtes à quelques fractions de micromètres au-dessus de la surface des disques. Un moteur fait tourner la pile de disques à une vitesse de 3 600 à 10 000 tours par minute.

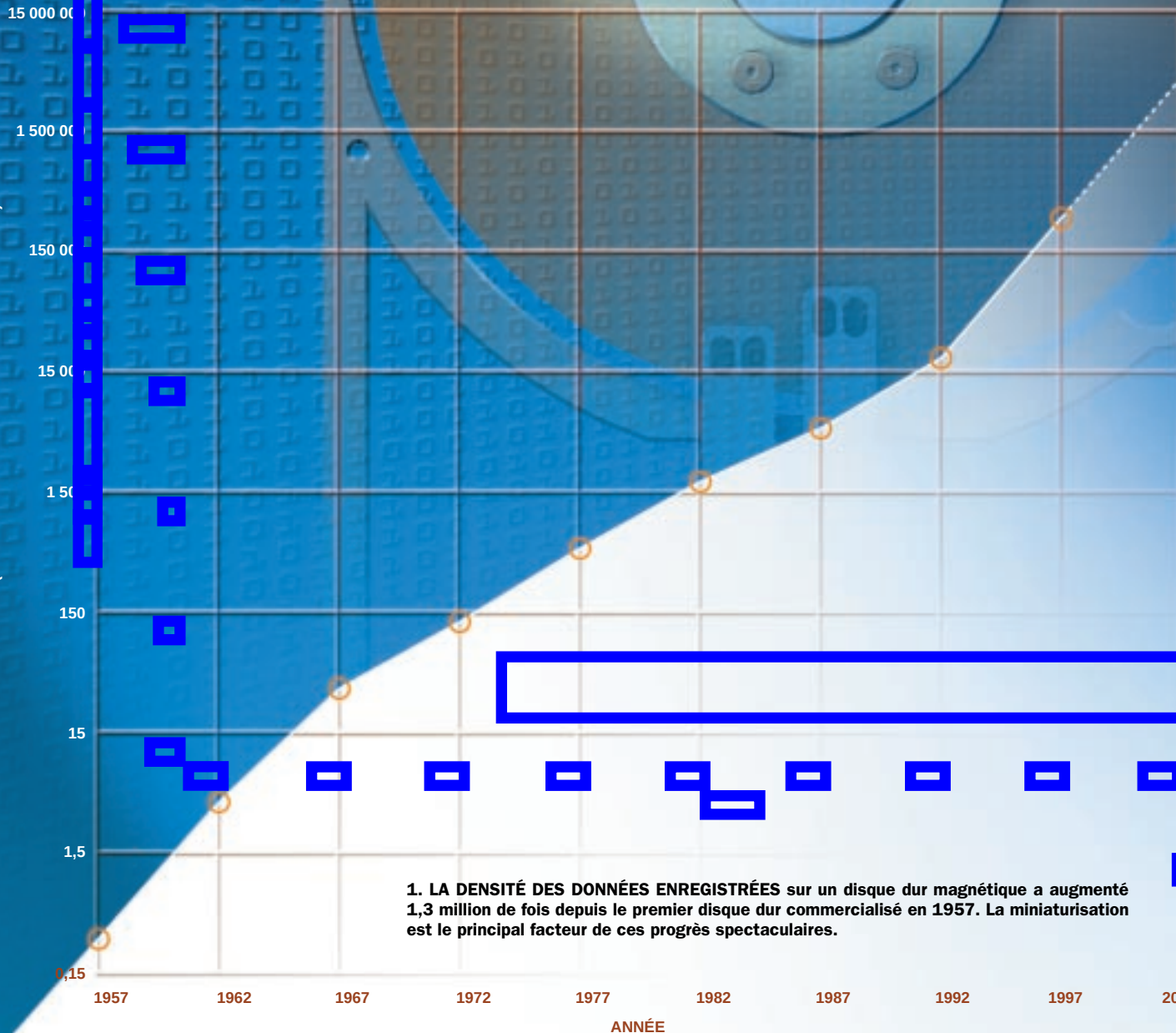
Quel progrès ! Le premier disque dur pesait une tonne : le RAMAC construit

par la Société IBM en 1956 stockait seulement cinq millions d'octets. De celui-ci jusqu'aux derniers disques durs d'ordinateurs de bureau, d'une capacité de plus de 70 milliards d'octets, les progrès ont essentiellement consisté en une miniaturisation : les têtes de lecture et d'enregistrement sont plus petites, les disques plus minces, les distances entre têtes et plateaux réduites...

Les premières têtes de lecture et d'écriture étaient en ferrite (un oxyde de fer et d'autres métaux). À partir de 1979, les ingénieurs mirent au point des procédés de fabrication des têtes à couches minces par les mêmes méthodes que celles de fabrication des puces micro-électroniques ; ces têtes lisaient et écrivaient les bits sur des domaines plus petits. Au début des années 1990, les têtes à couches minces qui lisaient directement les informations en détectant un courant électrique induit par le survol des zones aimantées ont été remplacées par des systèmes qui captent les infimes modifications de résistance électrique dues au champ magnétique. Observé pour la première fois par Lord Kelvin en 1857, cet effet de magnétorésistance conduisit à des têtes plus sensibles, de sorte qu'on a rétréci les domaines de mémorisation des données.

Puis, en 1997, une équipe de la Société IBM perfectionna les têtes de lecture magnétorésistives en alternant deux couches de matériaux magnétiques avec une couche non magnétique. Ces têtes, nommées GMR (*Giant Magnetoresistive*, soit « magnétorésistance géante ») sont environ quatre fois plus sensibles, car les deux couches magnétiques, à la manière

DENSITÉ D'INFORMATION (EN MILLIERS DE BITS PAR CENTIMÈTRE CARRÉ)



1. LA DENSITÉ DES DONNÉES ENREGISTRÉES sur un disque dur magnétique a augmenté 1,3 million de fois depuis le premier disque dur commercialisé en 1957. La miniaturisation est le principal facteur de ces progrès spectaculaires.

d'un polariseur et d'un analyseur de lumière, augmentent artificiellement la magnétorésistance de la tête : selon l'orientation du domaine lu, les électrons diffusent facilement ou non d'une couche magnétique de la tête à l'autre. Les disques durs stockèrent alors jusqu'à 15 milliards de bits par centimètre carré.

En 1998, certains experts avaient fixé la barrière de l'effet superparamagnétique à 23 milliards de bits par centimètre carré, mais les têtes GMR semblent fixer cette limite à 23 milliards de bits par centimètre carré : cette valeur est, pour les ingénieurs, l'objectif à atteindre, voire à dépasser.

Plus courts, donc plus denses

Jusqu'ici, c'est l'amélioration de la sensibilité des têtes de lecture qui a conduit à l'augmentation des capacités des disques. Cependant, des ingénieurs s'attachent à réduire la taille des éléments binaires jusqu'à la limite de l'effet superparamagnétique. La stabilité thermique du support devient alors l'élément primordial, ainsi que sa coercivité (sa résistance aux champs magnétiques ambiants). La question fondamentale est la suivante : combien de grains, c'est-à-dire de petits cristaux magnétiques, sont-ils nécessaires pour obtenir une aimantation qui résiste à l'effacement thermique ? La réponse dépend de l'organisation des grains.

Jusqu'ici, 500 à 1 000 grains de matériau magnétique étaient utilisés pour l'enregistrement d'un bit. Toutefois, en mars 2000, des ingénieurs de la Société IBM ont mis au point un procédé d'auto-assemblage de cristaux magnétiques de cobalt et de platine grâce à des micelles (de microscopiques gouttes de lipides) qui sont déposées sur le disque, puis éliminées. Les grains sont alors plus réguliers, plus petits et mieux organisés : un bit requiert moins de grains, et les densités peuvent être supérieures à 20 milliards de bits par centimètre carré.

La réduction de la taille des bits de données à l'aide de grains de matériau magnétique plus petits et moins nombreux semble une façon évidente d'augmenter la capacité des disques durs. Cependant, on doit simultanément empêcher l'interférence des bits adjacents : des ingénieurs étudient ainsi certaines terres rares et des éléments de transition très stables magnétiquement, tels des alliages fer/platine ou

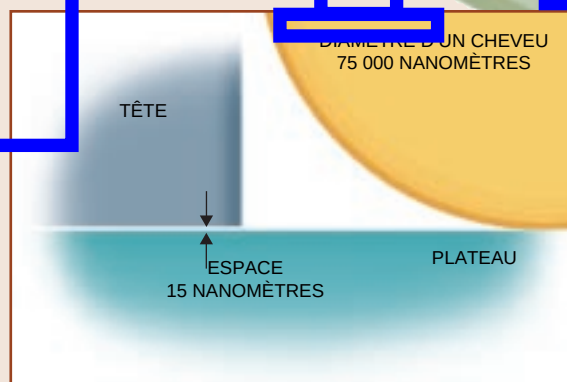
Fonctionnement d'un disque dur

Le disque dur actuel contient un empilement de plateaux en rotation sur lesquels les données sont mémorisées et lues par plusieurs têtes. Les données sont codées par l'aimantation d'une couche disposée à la surface des plateaux. Un même fichier peut être réparti sur plusieurs zones et plusieurs plateaux.

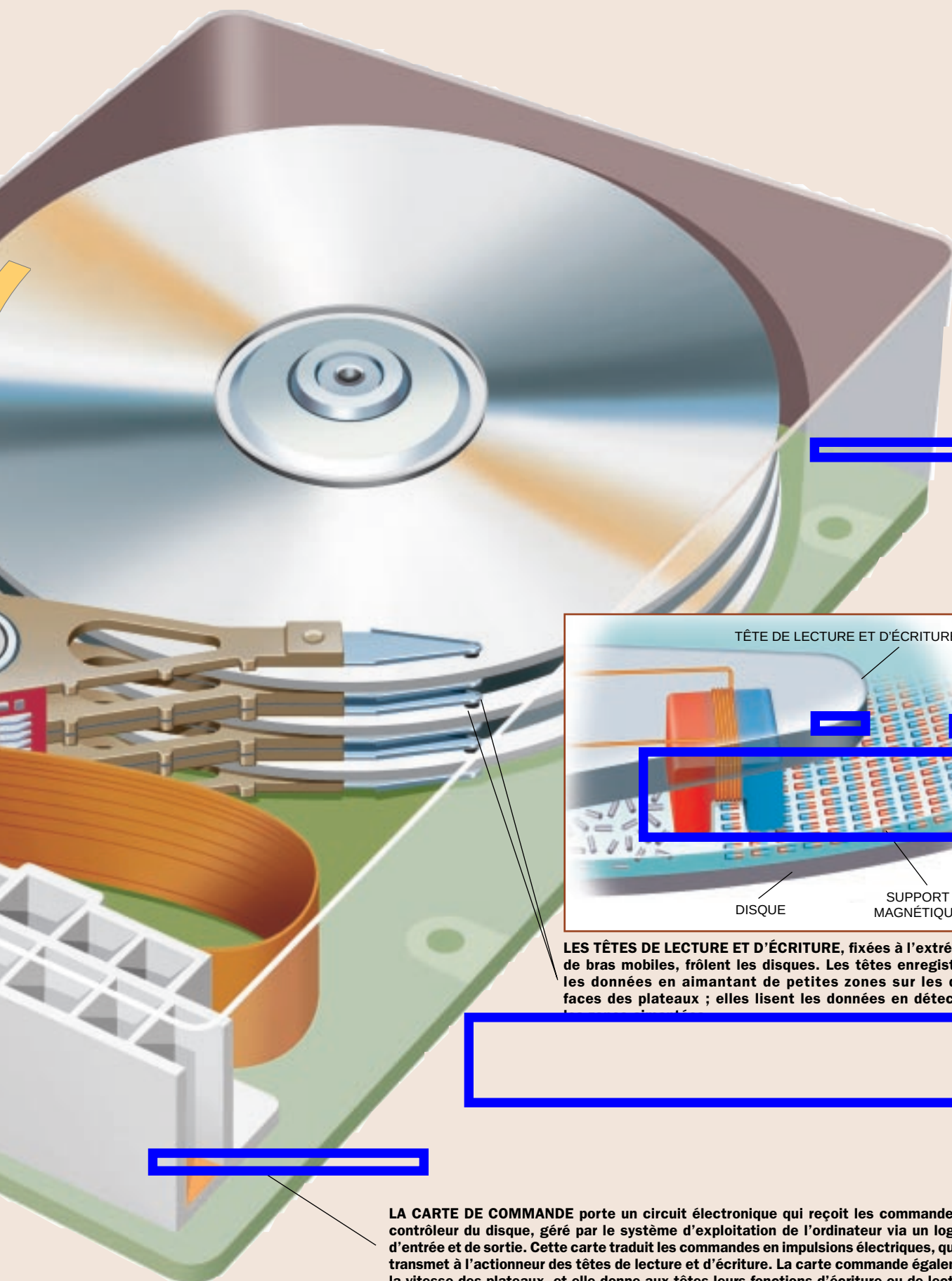
LES PLATEAUX, constitués de métal ou de verre, sont recouverts d'une couche magnétique. Ils tournent à une vitesse de plusieurs milliers de tours par minute, entraînés par un moteur électrique. La capacité d'un disque dépend du nombre de plateaux (jusqu'à huit) et du revêtement magnétique.

L'ACTIONNEUR DE LA TÊTE déplace et aligne avec précision les têtes de lecture et d'écriture près des pistes concentriques à la surface des plateaux.

BOÎTIER DE PROTECTION



L'ESPACE entre la tête de lecture et d'écriture et la surface du plateau est 5 000 fois inférieur au diamètre d'un cheveu humain.



TÊTE DE LECTURE ET D'ÉCRITURE

DISQUE

SUPPORT
MAGNÉTIQUE

LES TÊTES DE LECTURE ET D'ÉCRITURE, fixées à l'extrémité de bras mobiles, frôlent les disques. Les têtes enregistrent les données en aimantant de petites zones sur les deux faces des plateaux ; elles lisent les données en détectant

LA CARTE DE COMMANDE porte un circuit électronique qui reçoit les commandes du contrôleur du disque, géré par le système d'exploitation de l'ordinateur via un logiciel d'entrée et de sortie. Cette carte traduit les commandes en impulsions électriques, qu'elle transmet à l'actionneur des têtes de lecture et d'écriture. La carte commande également la vitesse des plateaux, et elle donne aux têtes leurs fonctions d'écriture ou de lecture.

cobalt/samarium. En jargon industriel, ces métaux dont la coercivité est élevée sont nommés matériaux «durs».

Toutefois, l'écriture sur les matériaux durs est difficile : ceux-ci sont «ramollis» par un laser qui, en les chauffant, réduit la coercivité des grains. Les données sont alors écrites (voir la figure 4). Lorsque le matériau refroidit, son «durcissement» protège les informations contre l'effet superparamagnétique.

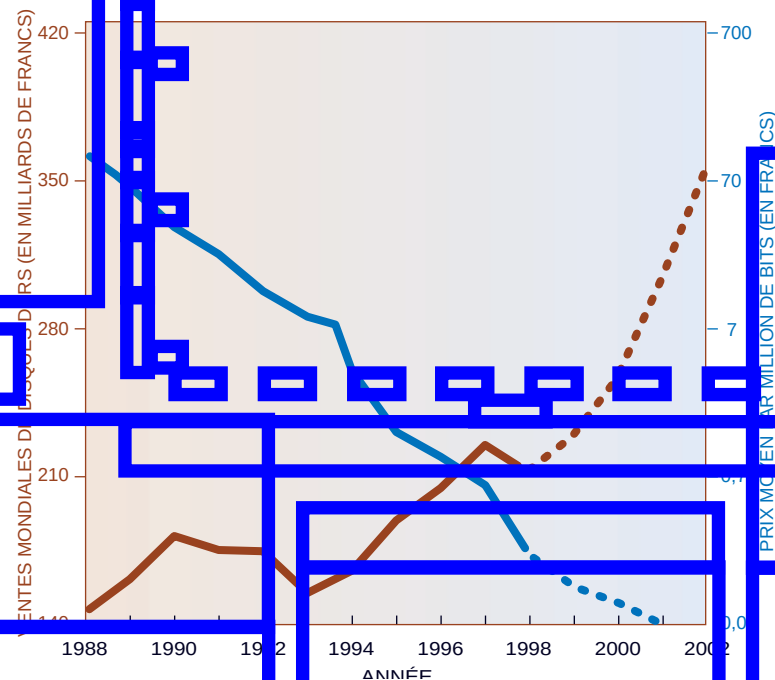
La largeur des pistes

Comment lire les informations stockées dans des zones réduites ? La plupart des têtes expérimentales ont une largeur de trois pistes, de sorte qu'elles captent du bruit indésirable pendant la lecture.

Néanmoins, si les têtes étaient plus étroites, leur disposition au-dessus des pistes devrait être plus précise. On pourrait utiliser un laser de guidage, mais celui-ci augmenterait la complexité et le coût de l'ensemble du disque.

Une autre solution est l'utilisation d'un support composé d'une couche de mémoire permanente, placée au-dessous d'une couche de lecture : pour lire les informations, on effacerait l'aimantation de la couche de lecture, puis un laser bien focalisé chaufferait la piste appropriée de la couche de mémoire, afin de transférer les données dans la couche de lecture par un procédé de couplage magnétique. Seules les informations transférées dans la couche de lecture seraient alors lisibles, et les informations des autres pistes ne perturberaient pas le signal enregistré. Une tête de lecture large suffirait.

Évidemment, le guidage du faisceau laser doit être très précis : on doit éviter de chauffer accidentellement des bits adjacents à ceux que l'on écrit, car on perdrait des informations mémorisées antérieurement. Afin d'éviter cet écueil, les ingénieurs de la Société *Seagate* utilisent un disque sur lequel des sillons séparent les pistes circulaires de bits. En augmentant la surface qui sépare deux pistes, ces



2. LES VENTES DE DISQUES DURS ont considérablement augmenté, à mesure que le coût de l'unité de mémoire diminuait.

sillons empêchent la chaleur du laser de se propager aux pistes voisines.

Des ingénieurs d'autres sociétés explorent d'autres moyens d'augmenter la capacité des disques durs en organisant les supports de mémoire, par exemple en séparant les bits de mémoire par des barrières. On étudie ainsi des «supports structurés», où le disque porte des bosses et des creux à sa surface ; chaque relief mémorise un bit. En théorie, un bit de données (un 0 ou un 1) peut être mémorisé dans un seul grain magnétique. Ainsi, avec un diamètre de grain de sept à huit nanomètres, ce type de support contiendrait plus de 1 500 milliards de bits (ou 1,5 téraoctet) par centimètre carré (voir la figure 3).

Pour créer les reliefs et les creux, les ingénieurs s'inspirent des procédés photolithographiques utilisés par l'industrie micro-électronique : un laser ou un faisceau d'électrons impressionne une couche photosensible, puis l'attaque chimique des couches non exposées crée des reliefs à la surface du disque. Cependant, les procédés photolithographiques actuels créent au mieux des reliefs d'environ 80 milliardièmes de mètre de diamètre, dix fois plus larges que le diamètre requis.

La capacité des disques augmentera ainsi avec le raccourcissement des zones élémentaires de stockage de l'information, mais aussi avec un rétrécissement des pistes qui portent ces zones. Aujourd'hui, les disques portent envi-

ron 800 pistes par centimètre ; elles sont distantes d'environ 100 nanomètres. Cette limite est imposée par la résolution des têtes d'enregistrement et par la précision du système de détection de la position sur les différentes pistes.

Des têtes bien faites

La plupart des têtes de lecture ont une forme de fer à cheval qui couvre la largeur d'une piste. Elles écrivent dans le sens longitudinal, c'est-à-dire le long de pistes circulaires, mais les champs magnétiques qu'elles créent s'étendent radialement, et des pistes insuffisamment

espacées entraînent la perte d'informations sur des pistes adjacentes.

Peut-on fabriquer des têtes d'enregistrement plus petites ? Si un faisceau abrasif d'ions peut affiner et équilibrer la tête d'écriture, ce qui réduit la largeur de la piste sur laquelle elle écrit, la tête de lecture, qui est une superposition de plusieurs éléments, est plus complexe à obtenir. En outre, une densité de 60 000 pistes par centimètre requiert des pistes de moins de 170 nanomètres de largeur : une telle taille demandera un positionnement plus précis ; un second actionneur différentiel, qui sera au premier ce que le poignet est à l'épaule, ajustera la position de la tête.

De surcroît, si l'on stocke les informations sur des secteurs plus courts de pistes plus étroites, les signaux seront plus faibles : la séparation de ces signaux et du bruit de fond nécessitera de nouveaux algorithmes pour retrouver les informations avec précision. Les programmes actuels analysent un rapport signal sur bruit de fond inférieur à celui requis pour des densités de mémorisation supérieure à 15 milliards de bits par centimètre carré.

Puisqu'on ne peut indéfiniment réduire la taille des domaines qui stockent les bits individuels, quand l'aimantation est parallèle à la surface des disques, pourrait-on aimanter les disques verticalement, c'est-à-dire en créant des champs perpendiculaires à la surface ?

Serrés, debout

Selon les ingénieurs de la Société *TeraS-tor* qui mettent au point de tels dispositifs, la limite qu'impose l'effet superparamagnétique peut alors être dépassée et les capacités peuvent atteindre 10 milliards de bits par centimètre carré.

Dans les disques durs, un laser chauffe une petite zone qui devient ainsi aimantable. La densité d'information est alors considérable, parce que le faisceau laser est concentré sur un point d'un diamètre inférieur à un micromètre, grâce à une «lentille à immersion solide». Cette lentille, inventée à l'Université de Stanford, a une forme de sphère tronquée, et son principe ressemble à celui qui est utilisé dans la microscopie à immersion liquide : la lentille et l'objet à observer sont placés dans un liquide, souvent de l'huile, dont l'indice de réfraction est différent de celui de l'air, augmentant l'agrandissement en focalisant les rayons lumineux. Grâce à ce principe, le faisceau laser est ici concentré. En outre, dans la technique de «champ proche» qui est utilisée, la distance qui sépare la tête de lecture et d'écriture du support de mémorisation est inférieure à la longueur d'onde du faisceau laser, ce qui réduit la dispersion de la lumière (voir la figure 3).

Le support d'enregistrement est une couche de matériau magnétique déposée sur un disque de plastique. Les bits d'information sont inscrits perpendiculairement à la surface du disque, et non plus horizontalement. Ainsi, les champs magnétiques des bits se renforcent mutuellement et ne sont pas soumis à l'effet superparamagnétique.

En outre, les zones chauffées par le faisceau laser pour l'enregistrement de chaque bit se chevauchent : ces derniers ont alors une forme de croissant ; cette méthode d'enregistrement double le nombre de bits écrits linéairement sur une piste. La lecture utilise l'effet Faraday : l'aimantation modifie la polarisation d'un faisceau laser réfléchi sur le disque. Selon cette aimantation, on obtient des directions de polarisation différentes, qui codent des 0 ou des 1.

Ces nouveaux disques durs seront commercialisés à la fin de l'an 2000. Toutefois, leur capacité sera seulement de 20 milliards d'octets, sur des supports amovibles de la taille d'un disque compact, alors que les disques durs actuels ont déjà des capacités supé-

rieures à 70 milliards d'octets. Les premiers modèles remplaceront peut-être, dans un premier temps, les actuels produits de sauvegarde d'informations pour lesquels la vitesse d'accès est importante (à bandes et optiques).

Les ingénieurs qui travaillent à ce projet espèrent atteindre ensuite des capacités supérieures à 300 milliards d'octets. Ils sont optimistes, et certains estiment que les perfectionnements des matériaux, des techniques de fabrication et du traitement du signal permettront, d'ici à quelques années, de fabriquer des disques durs avec de telles densités de mémorisation. Leurs prévisions se fondent sur l'examen des progrès passés : l'introduction des têtes à couches minces a demandé près de dix ans, la mise au point des têtes magnéto-résistives a nécessité six ans de plus, notamment pour mettre au point des éléments de lecture et d'écriture séparés pour la tête. Pourtant le passage aux disques durs est fait en quelques mois.

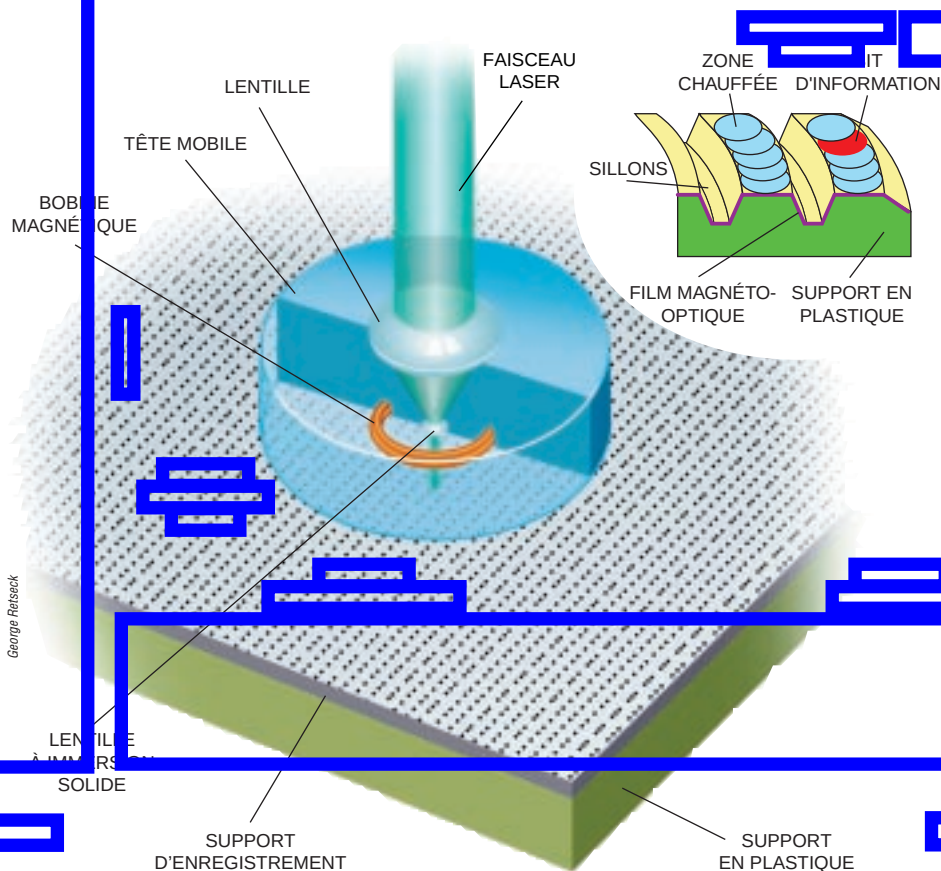
La rotation est rapide, car les têtes GMR n'imposaient que quelques

changements des composants périphériques des disques durs. L'augmentation des capacités jusqu'à plus de 20 milliards de bits par centimètre carré sera peut-être une simple évolution plutôt qu'une révolution.

Le problème de la vitesse

La performance des disques durs tient également à la vitesse d'accès aux données. Or, si la capacité des disques durs augmente de 130 pour cent par an, les vitesses d'accès ne progressent que de 40 pour cent.

Classiquement, les ingénieurs ont augmenté la vitesse de rotation des disques. Toutefois, lorsqu'un disque tourne plus vite, les turbulences de l'air et les vibrations entraînent parfois des erreurs d'enregistrement sur les pistes. Parmi les améliorations possibles, des paliers fluides dans le moteur peuvent remplacer les roulements à billes en acier et en céramique, qui fusent et deviennent bruyants lorsque les plateaux tournent à plus de 10 000 tours par minute.



3. DANS LES SYSTÈMES MAGNÉTO-OPTIQUES, un faisceau laser chauffe un point minuscule sur le disque, ce qui permet à la tête de modifier les propriétés magnétiques du point. Une première lentille concentre le faisceau sur une lentille à immersion solide, laquelle focalise la lumière en un point d'un diamètre inférieur à un micromètre. Dans ce procédé, les zones chauffées se chevauchent : chaque bit, inscrit verticalement, a une forme de croissant (en haut à droite) ; la densité d'information est ainsi augmentée.

Apparemment, l'industrie du stockage des données envisage la production de disques durs de deux types : pour certains, la capacité sera privilégiée ; pour d'autres, ce sera la vitesse. Les premiers seront adaptés au stockage de masses telles les sauvegardes des fichiers d'archives, les seconds à des applications pour lesquelles l'accès rapide aux données est primordial.

Naguère, les utilisateurs préféraient des disques plus volumineux aussi peu coûteux que possible, même quand l'accès aux données était ralenti. Toutefois, les nouvelles applications requièrent des disques rapides. Par exemple, le commerce électronique, via le réseau Internet, impose aux sociétés de stocker et de manipuler rapidement des volumes importants d'informations relatives aux clients.

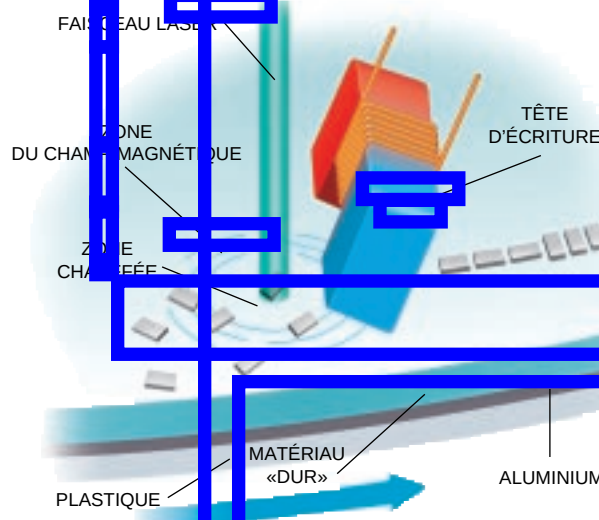
Le dilemme de la capacité et des performances s'aggravera probablement avec la mise en œuvre des solutions au problème de l'effet superparamagnétique. Certaines des solutions proposées s'enorgueillissent de grosses capacités de mémoire, mais leurs vitesses médiocres les condamneront à certaines applications. Pour atteindre des densités de mémorisation supérieures à 20 milliards de bits par centimètre carré, les experts concluent qu'on devra utiliser des matériaux radicalement différents pour les supports de mémoire.

De nouveaux supports

Depuis près de 40 ans, la mémoire holographique est un Graal de l'industrie micro-électronique : on prévoit de stocker des billions d'octets (soit l'équivalent de millions de livres) dans un dé de matériau cristallin gros comme un morceau de sucre. En outre, la vitesse de recherche des données mémorisées serait bien supérieure à celle des méthodes magnétiques.

Seuls ou réunis en consortiums financés par des fonds publics, les principaux groupes informatiques s'efforcent de mettre au point un système à mémoire holographique pratique, commercialisable en 2010.

Comment fonctionnerait un tel système ? La mise en mémoire s'effectuerait par des méthodes optiques, dans



4. DANS LES DISQUES EN MATÉRIAUX «DURS», on chauffe les points successifs des pistes à l'aide d'un laser, de sorte qu'une tête orientée ensuite spécifiquement les cristaux magnétiques éclairés.

des cristaux photosensibles. Les informations seraient stockées et extraites par pages entières de données. Chaque page contiendrait des milliers, voire des millions de bits. Les pages seraient inscrites successivement, à l'aide de deux faisceaux laser. À sa traversée d'un écran à cristaux liquides, nommé modulateur de lumière spatiale, l'un de ces deux faisceaux, nommé faisceau objet, formerait avec la page de données à mémoriser un motif de carrés clairs et opaques, analogue à une grille de mots croisés qui s'afficherait sur un écran.

Un hologramme de cette page serait créé par l'interférence de ce faisceau objet et d'un second faisceau, nommé faisceau de référence, dans le matériau d'enregistrement photosensible. Selon la nature de ce matériau, le motif d'interférence optique serait inscrit par les changements physiques ou chimiques, telles les variations de l'indice de réfraction ou des propriétés d'absorption de la lumière ou de l'épaisseur du matériau photosensible (voir la figure 6).

Une fois ce motif d'interférence mémorisé, son éclairage par l'un des deux faisceaux d'origine conduirait à une diffraction de la lumière qui reconstituerait l'autre faisceau. Ainsi, en éclairant le cristal par le faisceau de référence, on recréerait le faisceau objet, avec sa page de données. On détecterait ensuite le motif des données à l'aide d'une puce du type de celles qui sont utilisées dans les caméras numériques ; les données de la puce seraient alors transmises à l'ordinateur.

Le même cristal pourrait contenir de nombreux motifs d'interférence cor-

respondant chacun à une page de données. Pour sélectionner les pages, on modifierait la longueur d'onde du laser ou l'angle entre le faisceau objet et le faisceau de référence.

En 1999, un groupe de recherche composé de plusieurs sociétés a présenté une mémoire holographique d'où des données ont été extraites à une vitesse d'un milliard de bits par seconde ;

le support est un disque en polymère d'une taille voisine de celle d'un disque compact, capable de mémoriser des volumes de données très importants. De plus, les composants et les matériaux utilisés sont facilement

intégrables dans de futurs produits.

Simultanément, d'autres membres du même consortium ont présenté un autre dispositif pour lequel l'accès rapide a été privilégié, plutôt que les capacités de mémorisation. Doté d'un système de positionnement à très haute vitesse pour diriger son laser à travers un cristal de niobate de lithium, il accéderait à une donnée choisie au hasard en moins de 100 millièmes de seconde. Cette vitesse est supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celles des disques magnétiques (il faut plusieurs microsecondes pour rechercher une information stockée). Un temps d'accès aussi faible est possible grâce aux faisceaux laser, que l'on peut déplacer rapidement, sans inertie.

Bien qu'encourageants, ces résultats sont encore à compléter par d'autres innovations avant que la mémoire holographique ne soit commercialisable. Par exemple, l'image de la page de données sur la puce doit être parfaite pour que la mémorisation et la récupération des informations fonctionnent convenablement.

Trouver le bon matériau pour le support de mémoire est également une difficulté : les cubes de niobate de lithium et d'autres substances inorganiques, ainsi que des polymères sont à l'étude par diverses entreprises telles Bayer, IBM, L'Institut Max Planck, mais aucun d'eux ne semble être l'idéal pour un système de mémorisation.

Alors que plusieurs groupes perfectionnent leurs prototypes, quelques équipes explorent les propriétés de tels systèmes. L'«associativité», c'est-à-dire

la capacité de regrouper des informations analogues, est l'une des plus intéressantes.

Aujourd'hui, on retrouve les informations mémorisées sur les disques grâce à leur adresse, et non pas d'après leur contenu. Avec la mémoire holographique, les données sont comparées optiquement sans être extraites ; lors de recherches dans de grosses banques de données, on est immédiatement dirigé vers ce qui correspond le mieux.

Après la mémorisation, la projection d'une page de données reconstruit tous les rayons de référence des données dont le motif est similaire. L'intensité de chaque rayon de référence indique le degré de correspondance entre le motif des données mémorisées et la page de données désirée.

Le stockage à résolution atomique

Les systèmes de mémoire holographique remplaceront peut-être un jour les disques durs magnétiques de nos ordinateurs de bureau, mais ils ne conviendraient pas au stockage de masse dans des systèmes miniatures, telles les montres ordinateurs, ou dans les véhicules spatiaux, où la forme, la masse et la consommation électrique sont des critères prépondérants.

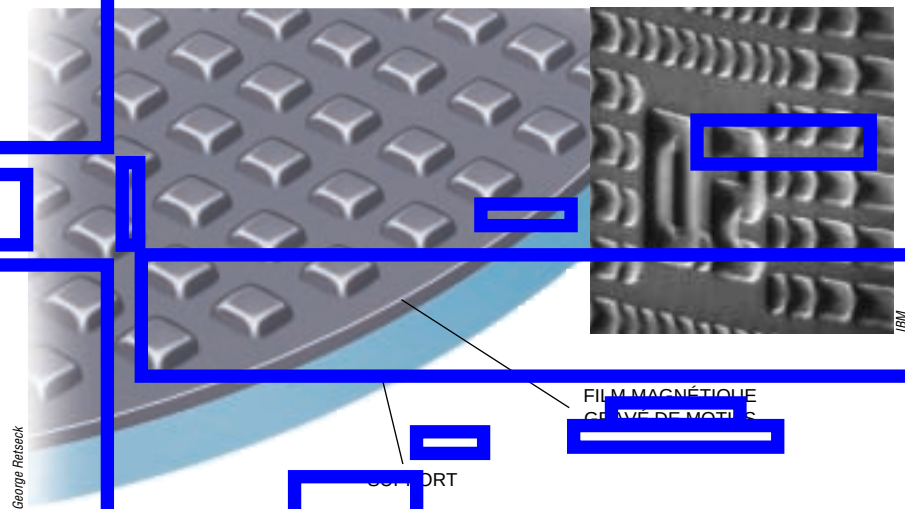
Inspirés par les progrès en microscopie à sonde atomique, où une pointe microscopique survole la surface d'un matériau, formant des images d'une précision de quelques nanomètres, les ingénieurs de la Société Hewlett Packard étudient un dispositif gros comme un ongle qui stockerait plus de 150 milliards de bits par centimètre carré. Ce «système de mémoire à résolution atomique» utilise un réseau de pointes pour lire et écrire les données. Un micro-actionneur déplacera le support sous les pointes (voir la figure 7).

Les ingénieurs chargés du projet doivent résoudre quatre difficultés principales. La première est le choix d'un support de mémoire approprié. Aujourd'hui, ils ont sélectionné un matériau qui présente deux états physiques différents, stables à température ambiante. L'une des phases est amorphe, et l'autre cristalline. Les bits sont inscrits sur ce «support à changement de phase» par un chauffage : le matériau passe alors d'un état à l'autre.

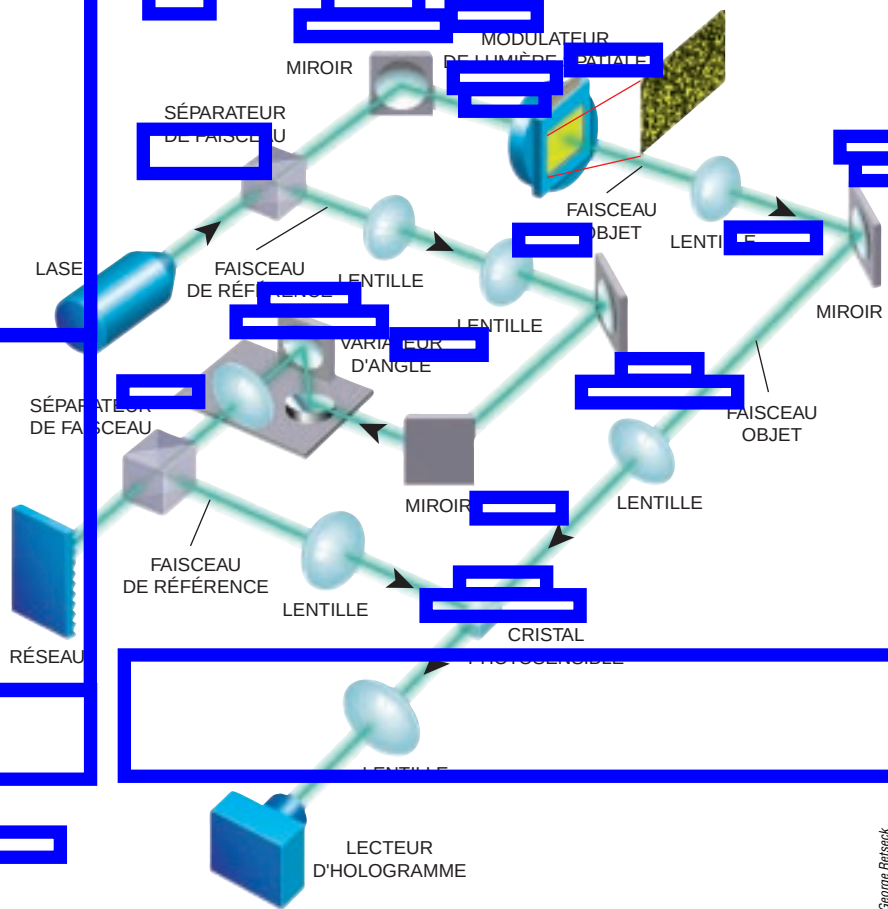
La deuxième difficulté réside dans la réalisation des pointes, qui doivent émettre un faisceau d'électrons dans

une direction précise lors de l'application de la tension électrique. Le faisceau doit être puissant quand il chauffe les points de données du support, afin d'écrire ou d'effacer les informations,

et il doit être plus faible quand il lit les informations en détectant la résistance des points de données (on peut également détecter d'autres propriétés électriques des points). On explore



5. DES BOSSES ET DES CREUX créés sur des disques magnétiques éviteraient la désalignement des zones de données par l'effet superparamagnétique. Ici, chaque bit est enregistré dans une bosse dont la largeur ne doit pas dépasser huit nanomètres pour atteindre les densités souhaitées. La Société IBM a créé de telles structures (à l'échelle de 100 à 200 nanomètres).



6. LES MÉMOIRES HOLOGRAPHIQUES stockent les données page par page dans des cristaux photosensibles. Un faisceau objet capte les données lorsqu'il traverse un modulateur de lumière spatiale. Puis on enregistre dans un cristal la figure d'interférences de ce faisceau et d'un faisceau de référence. Un dispositif mécanique modifie l'angle du faisceau de référence pour enregistrer une autre page.

notamment des techniques de lecture optique à « champ lointain », où la pointe est à un micromètre du support.

Troisièmement, on cherche à construire des micro-actionneurs qui déplacent le support avec une précision de l'ordre du nanomètre. Enfin, de tels dispositifs doivent être logés dans des boîtiers robustes, à côté d'autres éléments. Les éléments mobiles du dispositif devront probablement fonctionner sous vide ou, au moins, dans une atmosphère contrôlée, afin de réduire les frottements et la dérive.

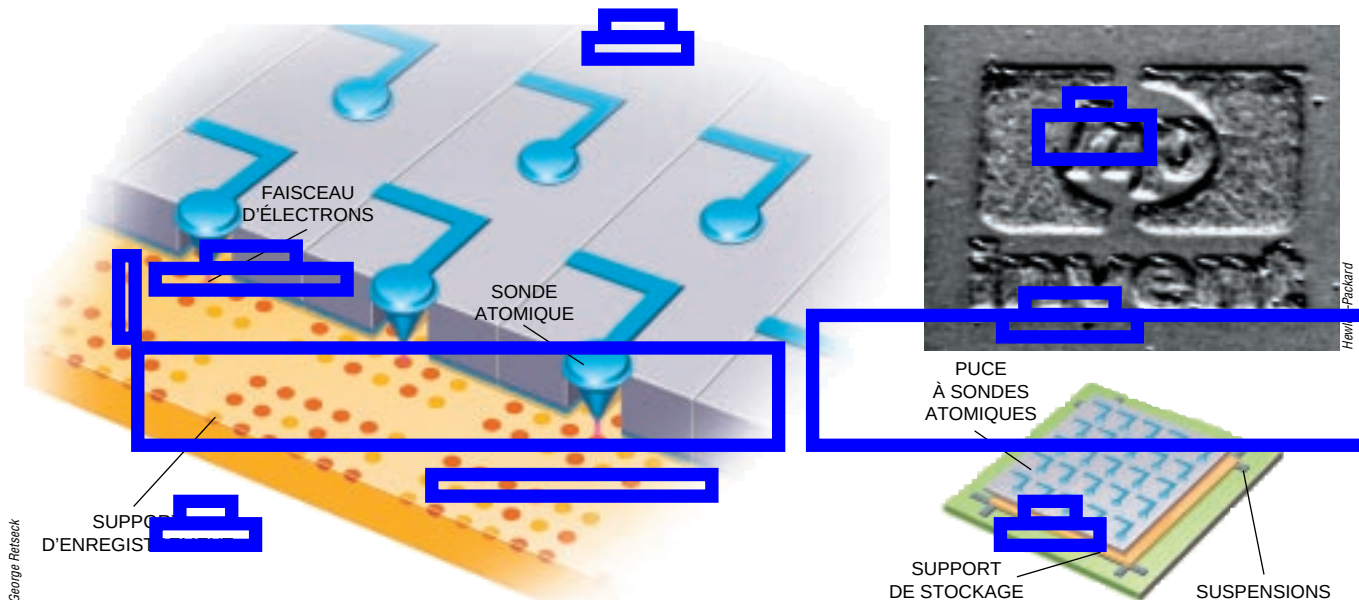
persion de électrons émis par les pointes et de diminuer la propagation de la chaleur par le gaz au-dessus du support.

Malgré la miniaturisation croissante des disques durs magnétiques, les dispositifs de stockage à résolution atomique seront compétitifs pour de nombreuses applications. Ils ont l'avantage de consommer très peu d'énergie : lorsqu'ils n'effectuent pas de lecture ou d'écriture, leur consommation est nulle (alors que les disques durs sont en rotation constante).

Les premiers modèles stockeront sans doute un milliard d'octets, mais les capacités augmenteront progressivement ; la densité n'est limitée que par la taille minimale des points de données.

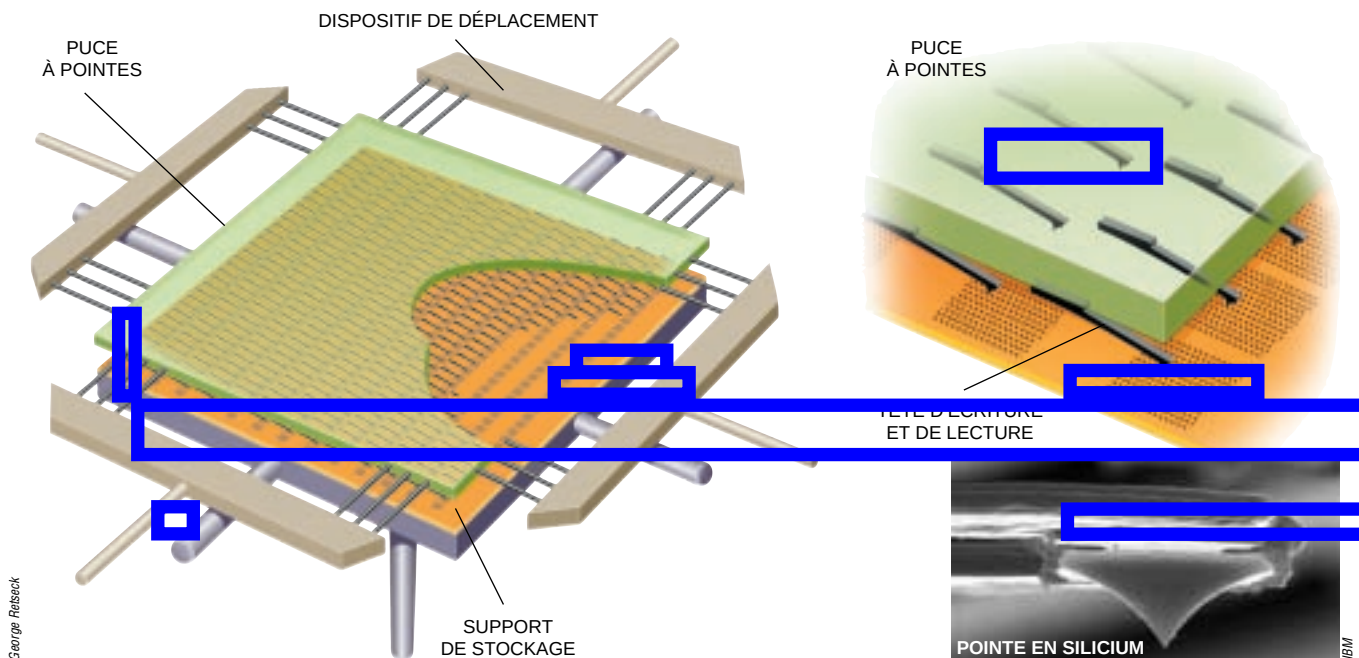
Les « cartes perforées » du futur

Dans les mémoires à sonde atomique, les mémorisations sont temporaires. Au contraire, avec une version moderne de la carte perforée, le stockage est per-



7. LES FAISCEAUX D'ÉLECTRONS d'une « puce à sondes atomiques » enregistrent les données sur un support en chauffant de minuscules points du support à l'aide de faisceaux d'électrons : le chauffage modifie l'état physique des points de données. Sous la puce, le

support est déplacé avec une extrême précision (*en bas, à droite*). Ainsi le logotype de la société *Hewlett Packard*, de 30 micromètres de large (*en haut, à droite*), a été enregistré et visualisé par une seule pointe sur un support à changement de phase.



8. LE MILLIPEDE est constitué de 32 rangées de 32 pointes en silicium (*à gauche*) qui enregistrent et lisent les données sous la forme de minuscules entailles gravées sur une surface plastique. Chaque extrémité de pointe a un rayon de 20 nanomètres (*photographie de droite*).

manent. Il a l'avantage de s'effectuer sur des supports très bon marché : des feuilles de matière plastique. Aux débuts de l'informatique, les cartes perforées étaient un moyen populaire, quoique bruyant, de mémoriser des informations. Aujourd'hui, l'idée mécanique a été conservée, mais réduite à des dimensions minuscules. Ainsi, la Société IBM a récemment mis au point un prototype, nommé *Millipede*, qui stocke jusqu'à 80 milliards de bits par centimètre carré (soit 15 fois plus que le meilleur disque dur magnétique), sous la forme d'entailles microscopiques sur une surface plane de polymère.

Le *Millipede* est composé de pointes dont l'extrémité (d'un diamètre de 40 nanomètres) repose légèrement sur une surface plastique lisse en mouvement. Lorsqu'un courant électrique passe dans la pointe, celle-ci est brièvement chauffée à 400 °C : elle fond le polymère créant une série d'entailles qui codent les informations.

Pour lire ces informations, on chauffe l'extrémité de la pointe à une température constante de 350 °C (inférieure à la température de fusion du plastique) tout en la déplaçant sur la surface du polymère. Lorsque la pointe tombe dans une entaille, sa chaleur se dissipe : la baisse de température est alors détectée par un changement de résistance électrique de la pointe.

De fabrication simple, le *Millipede* est constitué de 32 rangées de 32 pointes qui se déplacent sur une surface de neuf millimètres carrés (voir la figure 8). Ces pointes sont en silicium et fonctionnent simultanément, gravant leurs entailles sur une mince couche de plastique qui recouvre un substrat de silicium. Le nombre de pointes peut encore augmenter, et l'utilisation de nanotubes de carbone réduirait leur taille.

Plusieurs problèmes subsistent cependant : l'usure mécanique émousse les pointes et élargit les entailles gravées sur la surface plastique ; les marques ins-

crites risquent alors de se chevaucher et de brouiller les informations.

La plupart des nouvelles mémoires sont encore en début de mise au point, et des prototypes réalistes ne seront construits que si des innovations majeures résolvent les problèmes techniques éventuels. D'ici là, les fabricants de disques durs continueront d'apporter encore quelques améliorations aux disques durs magnétiques classiques.

Aujourd'hui, le prix du bit de mémoire diminue de 1,5 pour cent chaque semaine. L'industrie ne maintiendra un tel rythme que si elle parvient à remplacer les disques durs magnétiques. Néanmoins, personne ne sait quelle technique s'imposera. Les grandes sociétés, prudentes, explorent simultanément plusieurs systèmes.

La plupart des experts pensent que l'effet superparamagnétique ne bloquera pas le développement de l'informatique. Une arrivée tardive de produits de stockage plus performants sera sans doute compensée par l'association intelligente de plusieurs disques. De telles associations existent depuis les années 1980, utilisées lorsqu'un seul disque ne peut répondre aux besoins de certaines sociétés.

Une autre approche prometteuse consiste à placer les disques et les grappes de disques dans des réseaux de systèmes de mémoire, que l'on peut modifier afin de répondre aux appétits de stockage croissants. Ce «service de stockage» livrera automatiquement aux utilisateurs des applications avec la taille et le type de mémoire dont ils ont besoin.

Malgré l'extension des coûts de gestion, ces améliorations constituent un moyen de répondre à court terme aux besoins des sociétés et des consommateurs en matière d'espace de stockage pour leurs informations, en attendant que les dispositifs de haute capacité soient disponibles sur le marché.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSSES SÛRES

DIDIER NORDON

Des cailloux
dans les choses sûres



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

144 pages - 70 F
Code 1897

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 90

Jon TOIG est consultant en informatique.

John C. MALLINSON, *Magneto-Resistive Heads: Fundamentals and Applications*, Electromagnetism Series, contributions by Isaak D. Mayergoyz, Academic Press, 1995.

Kanu G. ASHAR, *Magnetic Disk Drive Technology: Heads, Media, Channel, Interfaces and Integration*, IEEE Press, 1997.

Shan X. WANG, et A.M. TARATORIN, *Magnetic Information Storage Technology*, Electromagnetism Series, Academic Press, 1999.

Magnetic Recording: The First 100 Years, sous la direction de Eric D. Daniel, C. Denis Mee et Mark H. Clark, IEEE Press, 1999.

Holographic Data Storage, sous la direction de Hans J. Coufal et Demetri Salitis, Springer-Verlag TELOS, 2000.

Les myxines, charognards océaniques

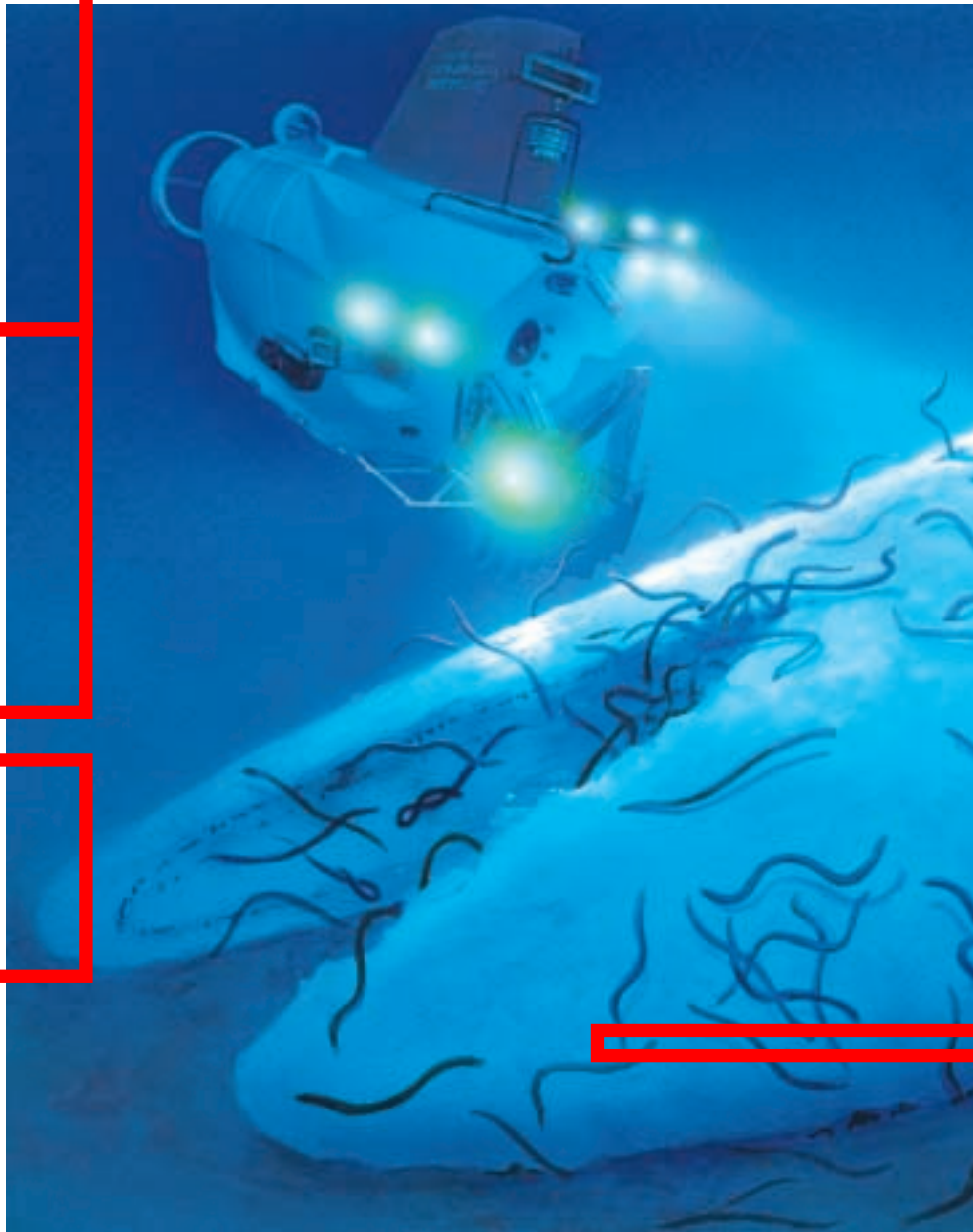
FREDERIC MARTINI

Naguère confondues avec les lampiroies, les myxines ressemblent probablement aux premiers animaux qui ont possédé un crâne, précédant ainsi les plus anciens animaux ayant une colonne vertébrale.

Après une heure de descente dans une obscurité quasi complète, notre sous-marin de recherche glisse sur le fond vaseux de l'océan, environ 1 700 mètres sous la surface du Pacifique, au large des côtes californiennes. Le pilote allume les projecteurs, éclairant un épais nuage de sédiment soulevé par notre arrivée. Pendant quelques minutes, nous attendons que les particules se redéposent, mais le sonar indique une grosse masse à environ 240 mètres devant nous. En nous approchant, nous découvrons le cadavre d'une baleine grise de 30 tonnes. Il grouille de centaines de myxines, longues d'une cinquantaine de centimètres, qui rongent méthodiquement le lard blafard.

Ces scènes cauchemardesques fascinent les biologistes qui s'intéressent aux myxines, car elles donnent un aperçu saisissant de la vie de ces créatures étranges et visqueuses. Pendant des années, les habitudes des myxines et leur place dans l'arbre évolutif de la vie sont restées mystérieuses. Aujourd'hui, on sait que les myxines semblent avoir peu changé au cours des 330 derniers millions d'années ; par plusieurs aspects, elles ressemblent aux premiers craniates (les ani-

1. LES MYXINES grouillent sur cette baleine morte, au fond de l'océan Pacifique, au large des côtes californiennes. Les biologistes découvrent que les myxines, qui ont peu changé pendant les 330 millions d'années de leur évolution, jouent un rôle important dans les écosystèmes des fonds océaniques, à la fois comme prédateurs et comme charognards.



maux possédant un crâne). La lignée évolutive conduisant à l'homme (et à tous les autres vertébrés) s'est probablement séparée de celle des myxines il y a environ 530 millions d'années. En outre, on sait aujourd'hui que les myxines sont abondantes dans les fonds océaniques et qu'elles y jouent un rôle écologique important.

Boules gluantes de la mer

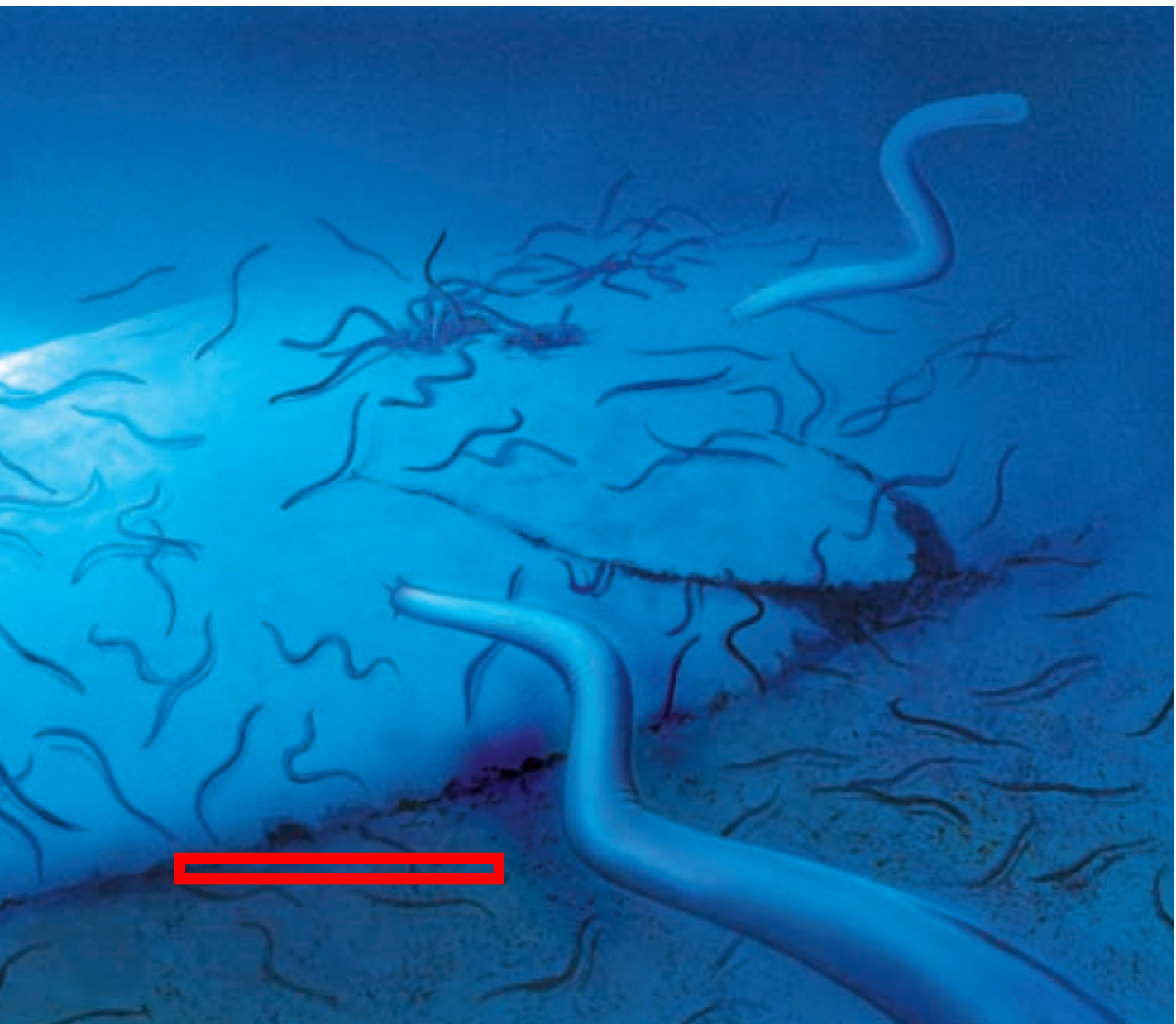
Les myxines sont étonnamment visqueuses : grâce à leurs 200 glandes à mucus, les adultes sécrètent, en quelques minutes, assez de mucus pour transformer un seau de sept litres d'eau en une bouillie gélatineuse. Les animaux s'adaptent aux

circonstances : ils produisent peu de mucus quand ils se nourrissent sur un cadavre, mais, quand ils sont attaqués ou capturés, toutes leurs glandes sont actives. Le mucus blanc et visqueux qu'elles sécrètent gonfle plusieurs centaines de fois en absorbant l'eau de mer, formant une boule gluante qui enrobe les branchies de poissons prédateurs et les étouffe ou, au moins, les gêne. Cependant, malgré cette fonction, le mucus semble aussi gêner les myxines ; pour s'en débarrasser, elles font avec leur queue un nœud qu'elles font glisser vers la tête.

On confond souvent les myxines et les anguilles, car ces deux animaux sont allongés et cylindriques. Toutefois les myxines ne sont pas des anguilles ; ces

dernières sont des poissons osseux, aux yeux proéminents, qui ont des paires de nageoires pectorales et pelviennes, un squelette rigide, des écailles osseuses et de fortes mâchoires. Comme les autres poissons osseux, les anguilles respirent par des branchies attachées à des os, nommés arcs branchiaux, et recouvertes par un volet osseux, l'opercule.

Les myxines sont de constitution et de fonction bien plus simples (voir les figures 2 et 3). Elles n'ont pas de véritables yeux ni de nageoires paires, et leur ébauche de squelette comprend seulement un axe longitudinal rigidifié (la corde), fait d'un tissu qui ressemble au cartilage, et plusieurs éléments cartilagineux plus petits, dont un crâne rudimentaire. Les myxines



Rob Wood

n'ont pas d'écailles ; elles ont une peau épaisse et glissante, et de grosses glandes à mucus. Elles n'ont pas de mâchoires et elles respirent grâce à une série de petites poches qui diffèrent des branchies de tous les autres poissons actuels.

Les myxines occupent les eaux marines de l'ensemble du Globe, à l'exception des mers arctiques et antarctiques. Bien que vivant toujours près du fond des océans, ces animaux peuvent vivre à différentes profondeurs. La température de l'eau semble limiter l'habitat des myxines, qui préfèrent des eaux à moins de 22 °C. Dans les froides zones côtières au large de l'Afrique du Sud, du Chili et de la Nouvelle Zélande, les myxines montent en surface : elles ont été retrouvées dans des bassins formés par la marée sur le littoral. Cependant, dans les mers tropicales, les myxines sont rarement à moins de 600 mètres de profondeur.

On connaît 60 espèces de myxines, dont la plupart appartiennent à deux genres principaux : *Eptatretus* et *Myxine* (de nombreuses espèces de ces genres ne sont connues que par un seul spécimen). Le genre *Eptatretus*, avec environ 37 espèces, comprend la plus grande myxine connue, *Eptatretus scolobolus*, qui atteint 1,4 mètre de long et pèse plusieurs kilogrammes. Les espèces d'*Eptatretus* ont, sous la peau, des vestiges d'yeux, recouverts par une peau translucide. Leur nez porte également la trace de lignes latérales, des structures sensorielles qui s'étendent sur

toute la longueur des faces latérales des poissons osseux. Les *Eptatretus* occupent individuellement des terriers permanents creusés dans le fond océanique, et rôdent parmi les fonds rocheux, sableux ou vaseux.

Les individus du genre *Myxine*, qui comprend une vingtaine d'espèces, ont un habitat plus spécialisé qu'*Eptatretus*. Ils sont plus minces, ont des yeux encore plus dégénérés, sans tache transparente, et ne présentent pas de ligne latérale. Ces animaux vivent dans des terriers transitoires, et on les trouve toujours près d'un sédiment meuble et vaseux.

Les myxines mangent de petites proies vivantes ou se comportent en charognards. Pour se nourrir, elles avancent un appareil buccal très efficace, formé de deux plaques dentaires portant chacune deux rangées courbes de pointes cornées. Articulées sur la ligne médiane, ces plaques s'ouvrent et se ferment comme un livre. Pour saisir une proie (vers marin, poisson mort ou main du pêcheur), la myxine déploie son appareil buccal, provoquant ainsi l'ouverture du «livre», puis presse les plaques dentaires contre la proie. Quand la myxine rétracte son appareil buccal, le «livre» se referme, et les pointes se faisant face saisissent et déchirent la chair de

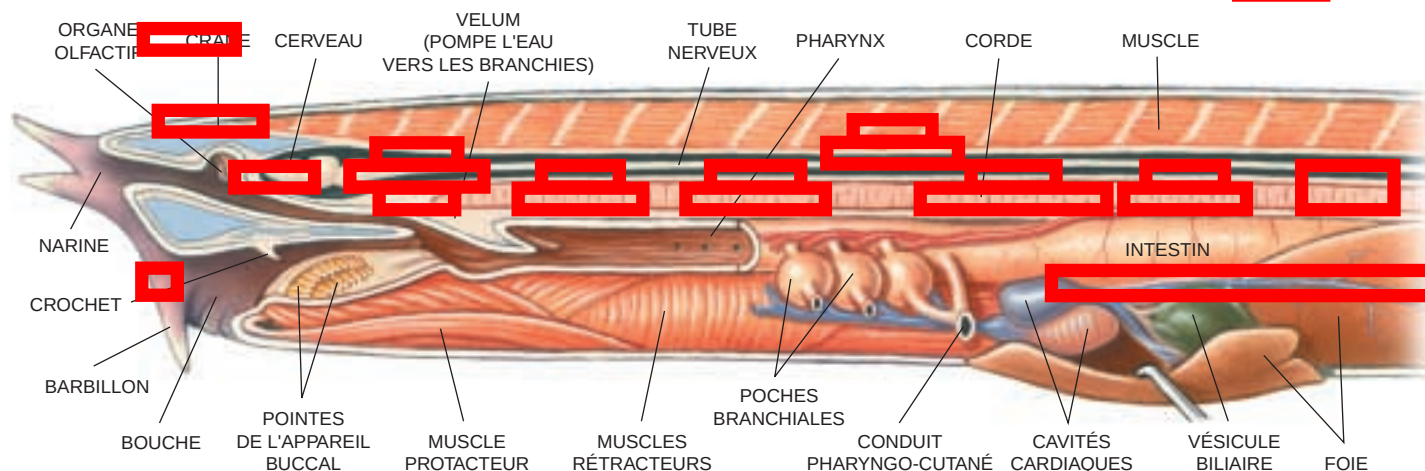
la proie ; le crochet placé au-dessus des plaques dentaires évite que les proies vivantes ne s'échappent en se tortillant entre deux morsures. Comme chez les poissons osseux, il convient bien lorsque la myxine

attaque des vers marins au corps mou et à la peau mince, mais les pointes cornées ne percent pas les écailles des poissons ou la peau des baleines. Lorsqu'elles se nourrissent sur un gros cadavre, et à moins que d'autres charognards n'aient déjà ouvert la voie, les myxines empruntent le chemin le plus simple, pénétrant dans le corps par la bouche, les branchies ou l'anus. Elles consomment alors les tissus mous de l'intérieur, pour ne laisser que la peau et les os. Plus d'un pêcheur aorti une belle prise qui s'est révélée être une enveloppe vide pleine de myxines.

On connaît mal la reproduction des myxines. Les gonades se forment dans un repli de tissu, du côté droit de la cavité abdominale. Un ovaire s'élabore dans les deux tiers antérieurs du repli chez les femelles ; chez les mâles, le testicule apparaît dans le tiers postérieur (on a observé des individus comportant les deux types de gonades). Les femelles, qui, chez certaines espèces, sont 100 fois plus nombreuses que les mâles, produisent en une fois 20 à 30 œufs, riches en vitellus et protégés par une coquille. Les œufs mûrs sont directement libérés dans la cavité abdominale. Ces œufs, dont le diamètre est compris entre deux et sept centimètres selon les espèces, ont en général un filament recourbé à chaque extrémité ; grâce à ce crochet, ils s'accrochent les uns aux autres et sont expulsés en chaîne. Chez les mâles, le testicule produit du sperme qui est ensuite libéré dans la cavité abdominale. Les œufs ou le

2. LES VUES ANATOMIQUES de la partie antérieure (à gauche) et postérieure (à droite) d'une myxine du Pacifique soulignent à la fois les spécificités de l'animal et les autres caractères plus généraux (comme le crâne) qui persistent chez des animaux plus évolués (la

partie centrale, environ un tiers de la longueur de l'animal, n'a pas été représentée). Comme chez plusieurs espèces de myxines, ce spécimen possède à la fois un ovaire et un testicule, qui libèrent œufs et spermatozoïdes dans le cloaque.



sperme quittent alors la cavité abdominale par un orifice débouchant dans le cloaque, cavité qui reçoit et expulse également les urines et les fèces.

La vie sexuelle des myxines demeure un mystère quasi total. Nous supposons que les myxines femelles pondent leurs œufs avant qu'ils soient ensuite fécondés par les mâles, mais nous ignorons où, quand et comment la fécondation se produit. Nous ne savons pas non plus pourquoi les femelles sont plus nombreuses que les mâles et quelle est la fréquence de production des œufs.

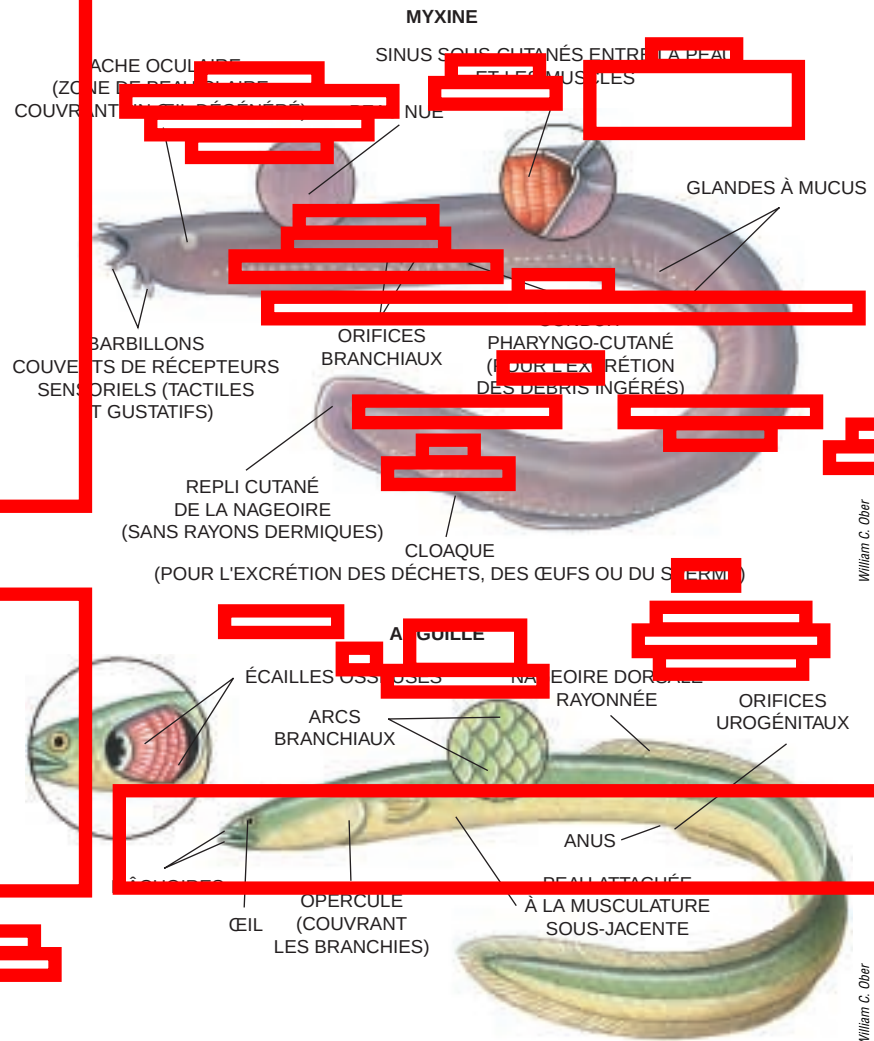
Le développement embryonnaire de la myxine demeure également obscur. Malgré plus de 100 années de recherches, seulement trois œufs fécondés du genre *Myxine* ont été découverts, et ils étaient abîmés. La situation est à peine meilleure pour les autres genres de myxines : environ 200 œufs fécondés du genre *Eptatretus* ont été recueillis dans la baie de Monterey en Californie, entre 1896 et 1942, mais aucun n'a été trouvé depuis. Pourquoi, également, n'a-t-on trouvé aucun juvénile de myxine (de moins de 170 millimètres de long)? Où sont-ils? Que mangent-ils? À quelle vitesse grandissent-ils? À quel âge sont-ils mûrs sexuellement?

Des fossiles vivants

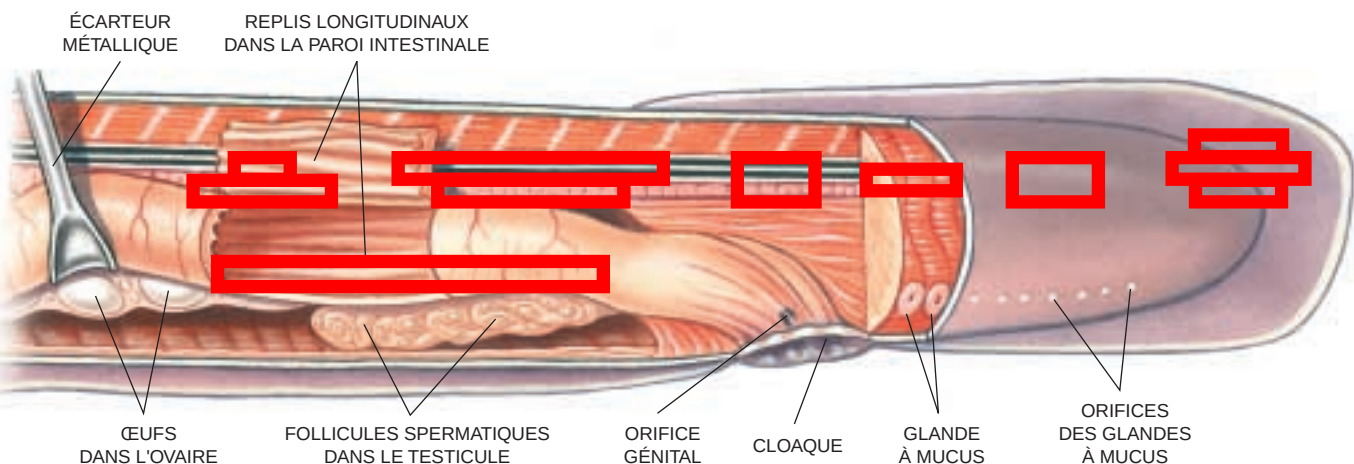
En raison de la biologie énigmatique des myxines, leur parenté avec les autres groupes n'est toujours controversée. Par exemple, en 1758, le célèbre biologiste Carl von Linné classa les myxines avec les vers plutôt qu'avec les poissons ; or nous savons maintenant que les myxines et les vers sont des animaux très éloignés. Aujourd'hui, les biologistes

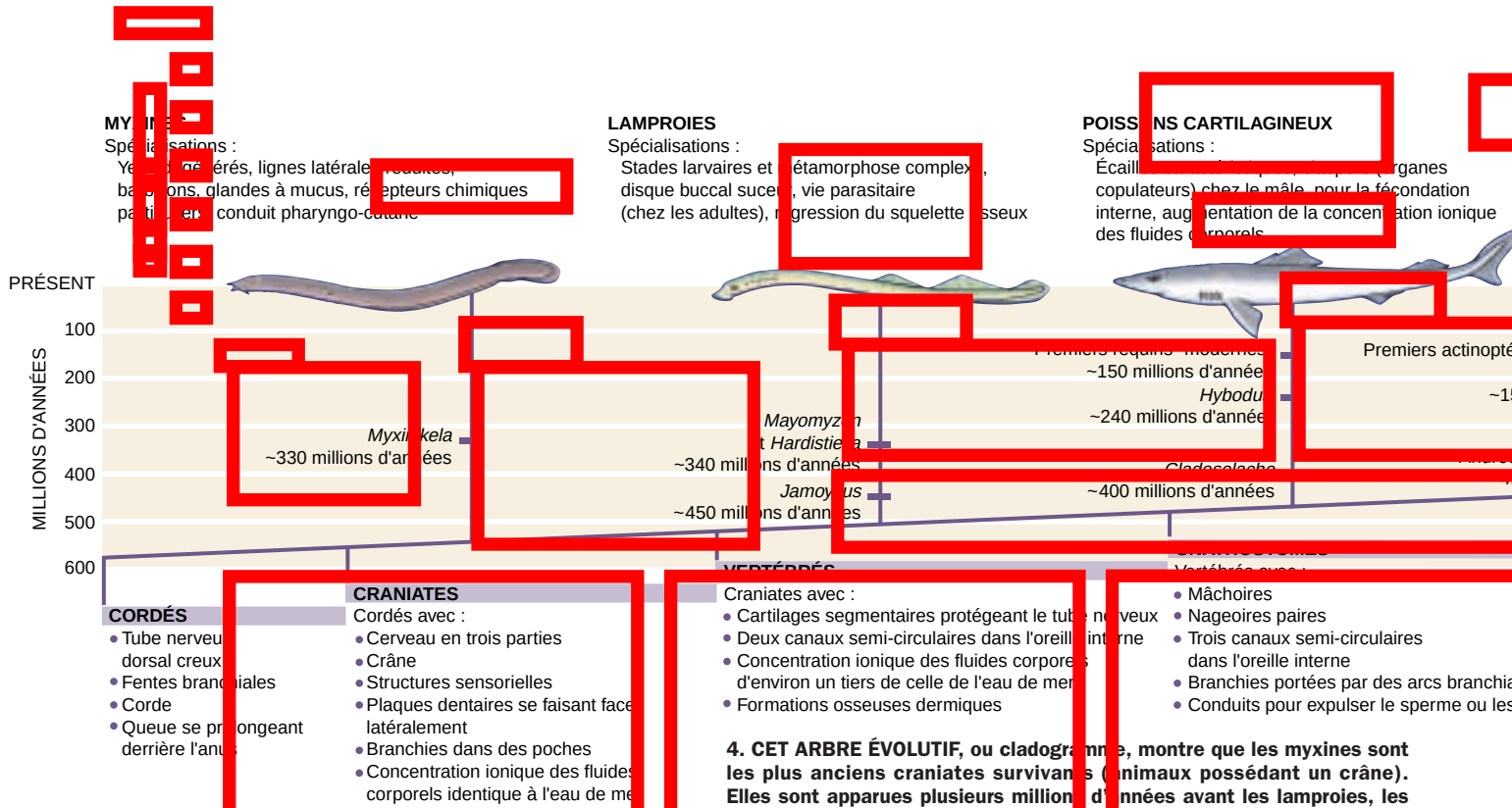
reconnaissent que les myxines ont comme des machines à remonter le temps. Le terme de «fossile vivant» a été souvent utilisé pour qualifier le cœlacanthe, poisson rare des profondeurs océaniques qui possède des

nageoires à une charnière qui fut découverte pour la première fois en 1938 au large de l'Afrique du Sud, dans l'archipel des Comores. Toutefois, les cœlacanthes sont des nouveaux nés évolutifs à côté des myxines : ils ont



3. MALGRÉ LEUR FORME SIMILAIRE, la myxine du Pacifique (*en haut*) et l'anguille du genre *Anguilla* (*en bas*) sont bien différents : l'anguille est un poisson osseux plus évolué. La myxine n'a pas de mâchoires, de nageoires paires, d'yeux, d'écailles, de rayons dans la nageoire dorsale, d'arcs branchiaux ni d'opercules.





peu change depuis leur dernière apparition dans le registre fossile, voici 60 millions d'années, mais une myxine fossilisée, *Myxinikela*, a été trouvée dans des sédiments déposés il y a 330 millions d'années. À l'exception de ses yeux, une *Myxinikela* passerait aisément pour une myxine actuelle.

Les myxines ont été délaissées par les biologistes pendant une grande partie du siècle dernier en raison du mode de classification alors utilisé. Récemment encore, pour établir des liens de parenté entre les créatures, les biologistes utilisaient des caractères courants, telles la présence ou l'absence des yeux ou des mâchoires. Aussi les myxines et les lamproies étaient-elles réunies dans le groupe des agnathes (littéralement «sans mâchoire»), encore nommés cyclostomes («bouche ronde»), car lamproies et myxines sont dépourvues de mâchoires, de nageoires paires, de squelette osseux et d'écailles. Comme les myxines sont difficiles à obtenir, les biologistes ont plus étudié les lamproies, qui passent une partie de leur vie dans les eaux douces des torrents et des rivières, où on les capture.

Ces dernières années, les études cladistiques (qui classent les animaux selon des caractères communs) ont conduit à la rénovation des anciennes méthodes de philogénie. Les biologistes reconnaissent aujourd'hui qu'il est impossible de dire si l'ancêtre d'un

organisme n'a jamais eu un caractère particulier, ou bien s'il l'a eu et si ses descendants l'ont ensuite perdu. Par exemple, ni les myxines ni les serpents n'ont de pattes, mais cela ne signifie pas qu'ils sont apparentés. Les myxines n'ont jamais eu de nageoires paires (et encore moins de membres), mais les ancêtres des serpents avaient des membres antérieurs et postérieurs.

Selon les analyses cladistiques, les lamproies et les myxines sont des groupes distincts à l'intérieur des cordés (voir la figure 4). À un moment de leur vie, tous les cordés présentent les caractères suivants : un tube nerveux dorsal creux, une corde placée juste sous le tube nerveux ; des fentes branchiales et une queue musculuse, segmentée, qui se prolonge en arrière de l'anus. Les myxines sont considérées comme les craniates actuels les plus primitifs. Les lamproies ont un crâne, mais elles ont aussi des segments cartilagineux qui protègent leur tube nerveux. Ces éléments cartilagineux sont les premières ébauches évolutives de la colonne vertébrale. Les lamproies sont, de ce fait, considérées comme les vertébrés actuels les plus primitifs.

En comparant les fossiles et les animaux actuels, les biologistes établissent des diagrammes (nommés cladogrammes) qui montrent les relations de parenté entre les organismes. Un cladogramme des cordés indique

que les myxines se sont individualisées par rapport à la lignée évolutive des vertébrés il y a 530 millions d'années environ. Il révèle aussi que les ancêtres des myxines n'ont jamais eu de squelette osseux, tandis que ceux de la lamproie en possédaient un. De plus, tous les craniates primitifs avaient un appareil buccal protactile comparable à celui des myxines. Les vertébrés primitifs, comprenant les lointains ancêtres de l'espèce humaine, partageaient probablement de nombreux autres caractères anatomiques et physiologiques avec les myxines actuelles. Ultérieurement les myxines se sont adaptées à leur milieu : leurs yeux et leurs lignes latérales ont régressé, leurs glandes à mucus se sont développées.

Myxine et écologie

Alors que les myxines retrouvaient une position assainie dans l'arbre de la vie, on a découvert leur rôle dans les écosystèmes complexes des fonds océaniques. On sait aujourd'hui que ces animaux sont plus abondants qu'on ne le pensait. À partir des rapports de captures dressés entre 1987 et 1992, nous estimons que la densité de population de *Myxinikela glutinosa* atteint 600 000 par kilomètre carré dans le golfe du Maine. Au large des côtes californiennes, elle serait analogue, aux profondeurs comprises entre 600 et 800 mètres.

ACTINOPTÉRYGIENS (POISSONS)

Spécialisations :

• Écailles caractéristiques, nageoire dorsale rayonnée
s'articulant sur des éléments squelettiques du corps



rygiens "modernes"
(téléostéens)
10 millions d'années

OSTÉICHTHYENS

Gnathostomes avec :

- Squelette interne osseux
- Poumon ou vessie natatoire relié au tube digestif
- Musculature spécifique pour les mâchoires de la région branchiale

aux
œufs

poissons cartilagineux et les poissons à nageoires rayonnées (les fossiles sont indiqués en italiques).

Nous connaissons aussi mieux les proies des myxines : bien que chaque myxine consomme peu d'énergie, on calcule que les animaux qui occupent un kilomètre carré de fond océanique consomment chaque année l'équivalent calorique de 18 tonnes de crevettes, de 12 tonnes de vers marins ou de 10 tonnes de poissons. Une telle quantité sert seulement à garder les animaux en vie ; quand ils nagent ou creusent leur terrier, leurs dépenses énergétiques sont quadruplées, voire quintuplées. En mangeant les déchets rejetés par les

chalutiers, les myxines recyclent les cadavres des vertébrés marins, y compris les baleines.

À Hawaii, Craig Smith a observé que les myxines récupèrent environ 90 pour cent de l'énergie contenue dans les petits paquets d'appâts déposés sur le fond à 1 200 mètres de profondeur. Prédateurs ou nécrophages, les myxines sont aussi les proies d'un nombre surprenant d'animaux marins : on les a retrouvées dans le système digestif de morues, de roussettes, de pieuvres, de cormorans, de maquignons, de phoques, d'éléphants de mer et de certains dauphins.

Le commerce des myxines

En de nombreux endroits du monde, les myxines font aujourd'hui l'objet d'une pêche florissante, et le marché des articles en cuir provenant de peaux de myxines tannées se développe. Ces produits, fabriqués principalement en Corée du Sud, sont vendus sous l'appellation « cuir d'anguille ».

Liste et grasse au toucher, la peau de myxine est composée d'une couche épidermique superficielle, au-dessus d'un derme structuré par des couches denses de collagène. Au cours de la préparation du cuir, l'épiderme est éliminé et le derme est utilisé dans la production de sacs à main, de chaussures, de portefeuilles, de porte-monnaie, de porte-documents... La peau se décolle facilement des animaux, car elle n'est attachée aux muscles sous-jacents que le long d'une ligne

Myxines et molécules

Si l'état rudimentaire de certains organes des myxines (yeux, lignes sensorielles) peut être dû à une régression secondaire, la plupart de leurs caractères anatomiques et physiologiques montrent clairement un état plus primitif que leurs homologues chez les lamproies et les vertébrés à mâchoires. Cette observation étaye fortement la théorie selon laquelle les myxines ont divergé d'un ancêtre commun de ces derniers.

Avec le perfectionnement des phylogénies moléculaires, fondées sur la comparaison des séquences de divers gènes, les résultats ont été plus

mitigés : certaines études confirment les résultats de l'anatomie et de la physiologie, d'autres replacent les myxines dans la position systématique où les avaient mises les naturalistes du XIX^e siècle, comme proches parentes des lamproies, formant ainsi le groupe des cyclostomes. Aujourd'hui, on ne s'explique pas la raison de ces résultats contradictoires. Ils pourraient être dus à la très grande diversité génétique de ces deux groupes, qui complique les alignements des séquences génétiques.

Philippe JANVIER
Laboratoire de paléontologie,
M.N.H.N., Paris

Cl. Combes et Ch. Guittou

L'homme et l'animal

De Lascaux à la vache folle

L'homme et l'animal

Claude Combes
Christophe Guittou

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

Philippe Dorchies
professeur de parasitologie,
La Dépêche vétérinaire

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

Eurêka

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

Midi Libre

Code P012 • 95 F
160 pages

voir bon de commande
page 90



Jason Grow, SABA

Jason Grow, SABA

Jason Grow, SABA

John B. Heiser, Cornell University

5. MYXINES de l'Aquarium de San Francisco (à gauche et en haut à droite). Le plaque dentaire est disséquée au milieu à droite. En bas à droite, on voit le gel produit par une myxine qui vient d'être pêchée.

médiane dorsale et le long de la surface ventrale, au niveau des glandes à mucus. Ainsi, chaque myxine fournit une longue bande présentant une zone plissée, le long de la ligne médiane, marquant l'emplacement des insertions musculaires.

La demande de peaux de myxines a fait fleurir des entreprises sur toutes les côtes de l'Amérique du Nord. La bande de peau doit avoir une largeur minimale (environ cinq centimètres), mais elle ne doit pas être trop épaisse. Toutes les espèces ne conviennent donc pas : certaines sont trop petites ou trop minces, d'autres trop larges, et d'autres encore ont la peau trop épaisse.

La pêche est simple : on appâte des nasses reliées à une ligne de fond, avec à peu près n'importe quoi, du hareng endommagé aux déchets de cuisine. Lâssées en place pendant une nuit, ces nasses peuvent être de gros seaux munis d'un couvercle ou des fûts percés de petits trous sur les côtés. Une fois à l'intérieur, la plupart des myxines sont piégées dans l'appât et dans leur propre mucus. Dans des zones non exploitées, on a compté plus de 100 myxines prises au cours de la première heure de pose de la nasse sur le fond.

Toutefois les myxines ont été excessivement pêchées ; certaines espèces se sont raréfiées, et les pêcheurs ont dû capturer des espèces qu'ils négligeaient jusqu'alors. En Nouvelle-Angleterre, les pêches annuelles de myxines, nulles en 1991, ont atteint 1950 tonnes en 1996. Pendant ces cinq années, près de 50 millions de myxines ont été traitées et envoyées à l'étranger. Les pêcheurs rejettent les myxines de moins de 500 millimètres de long (la longueur minimale convenant pour le cuir) qui meurent quand elles sont rejetées dans les eaux plus chaudes de la surface. Aussi, l'véritable impact de la pêche sur les populations de myxines est bien supérieur à celui indiqué uniquement par les captures. Depuis 1996, la pêche de la myxine a décliné, leur taille moyenne a diminué, ainsi que le nombre moyen par nasse.

La rarefaction des myxines ne cessera pas, car, sur la plupart des côtes, les myxines sont considérées comme des « espèces sous exploitées » et leur exploitation est en général autorisée sans restriction. Ainsi, en Nouvelle-Angleterre, la pêche à la myxine était considérée comme une industrie en pleine expansion quand les autres pêches s'effondraient.

Bien que les myxines soient plus abondantes qu'on ne le pensait naguère, ces espèces sont trop mal connues pour qu'on en propose une exploitation durable. En attendant, les États devaient imposer des mesures simples (les nasses devraient avoir des trous qui laisseraient s'échapper les jeunes espèces). L'impact des pêches sur les populations. En réduisant considérablement le nombre de n'importe quelle espèce, même les plus modestes myxines, nous accomplissons une expérience à grande échelle sur l'écosystème. Quelles en seront les conséquences ?

Frederic MARTINI travaille à l'Université de Manoa, à Hawaï.

The Biology of Myxine, sous la direction d'Alf Brødal et Ragnar Fänge, Universitetsforlaget, Oslo, 1963.

David JENNIFER, *The Hagfish in Scientific American*, vol. 214, n° 2, pp. 82-90, février 1966.

Aubrey GOBMAN et al., *The Hagfishery of Japan*, in *Fisheries*, vol. 15, n° 4, pp. 12-18, juillet 1990.

The Biology of Hagfishes, sous la direction de J.M. Jørgensen, J.P. Lomholt, R.E. Weber et H. Malte, Chapman & Hall, 1998.

L'hydrogène métallique

WILLIAM M. NELLIS

En recréant les conditions qui règnent dans le noyau de Jupiter, on obtient l'hydrogène sous la forme d'un métal.

Le canon à gaz du Laboratoire Lawrence Livermore, en Californie, mesure une vingtaine de mètres de longueur et il contient assez d'hydrogène pour exploser aussi violemment que dix bâtons de dynamite. Les projectiles qu'il tire ont une vitesse maximale de sept kilomètres par seconde, soit plus de 20 fois la vitesse du son et environ 15 fois celle d'une balle de fusil. Cet engin n'est pourtant pas une arme, mais un instrument de recherche. Il ne prend pour cible que quelques gouttes de liquide.

Ce liquide est fait de l'élément le plus commun de l'Univers : l'hydrogène. Malgré une structure très simple (l'atome est composé d'un proton et d'un électron), l'hydrogène a un comportement beaucoup plus complexe qu'on ne l'imaginait. Aux températures et pressions ambiantes, l'hydrogène est un gaz constitué de molécules à deux atomes, mais il devient liquide aux températures inférieures à 20 kelvins (-253°C) et solide au-dessous de 14 kelvins. Dans ces divers états, l'hydrogène est un isolant électrique. Cependant, à la fin du XIX^e siècle, des physiciens calculèrent que l'hydrogène fortement comprimé se dissocierait et deviendrait métallique. Il se trouve d'ailleurs dans la première colonne de la Classification périodique des éléments : celle des métaux alcalins.

Dès 1898, le physicien écossais James Dewar liquéfia de l'hydrogène ; il le solidifia un an plus tard, mais, à la surprise générale, les phases condensées se révélèrent isolantes : l'hydrogène restait sous la forme de molécules diatomiques et se comportait comme les halogènes de la septième colonne de la Classification périodique (le fluor,

le chlore...). Avec la mécanique quantique, de nouvelles théories du comportement de l'hydrogène apparurent. En 1935, à l'Université Princeton, Eugene Wigner utilisa cette théorie pour confirmer que le solide moléculaire diatomique isolant devait se transformer en un solide monoatomique métallique à une pression suffisamment élevée. Plus tard, on estima que cette pression serait comprise entre 25 à 2000 gigapascals, soit d'environ 250 000 à 20 millions de fois la pression atmosphérique au niveau de la mer. Selon les calculs plus récents, l'hydrogène moléculaire solide deviendrait métallique à partir de 400 gigapascals, soit environ quatre millions d'atmosphères, tandis que, d'après des mesures par diffraction des rayons X, la pression de transition serait de 620 gigapascals environ.

On obtient de telles pressions, voisines de celles qui règnent au centre de la Terre en comprimant des échantillons entre deux surfaces extrêmement dures. Ainsi, dans les cellules à enclumes de diamant, la pression atteint 600 gigapascals (voir *La cellule à haute pression à enclumes de diamant*, par A. Jayaraman, *Pour la Science*, juin 1984). En utilisant de telles cellules, Russell Hemley et Ho-kwang Mao, de l'Institution Carnegie de Washington, Isaac Silvera, de l'Uni-

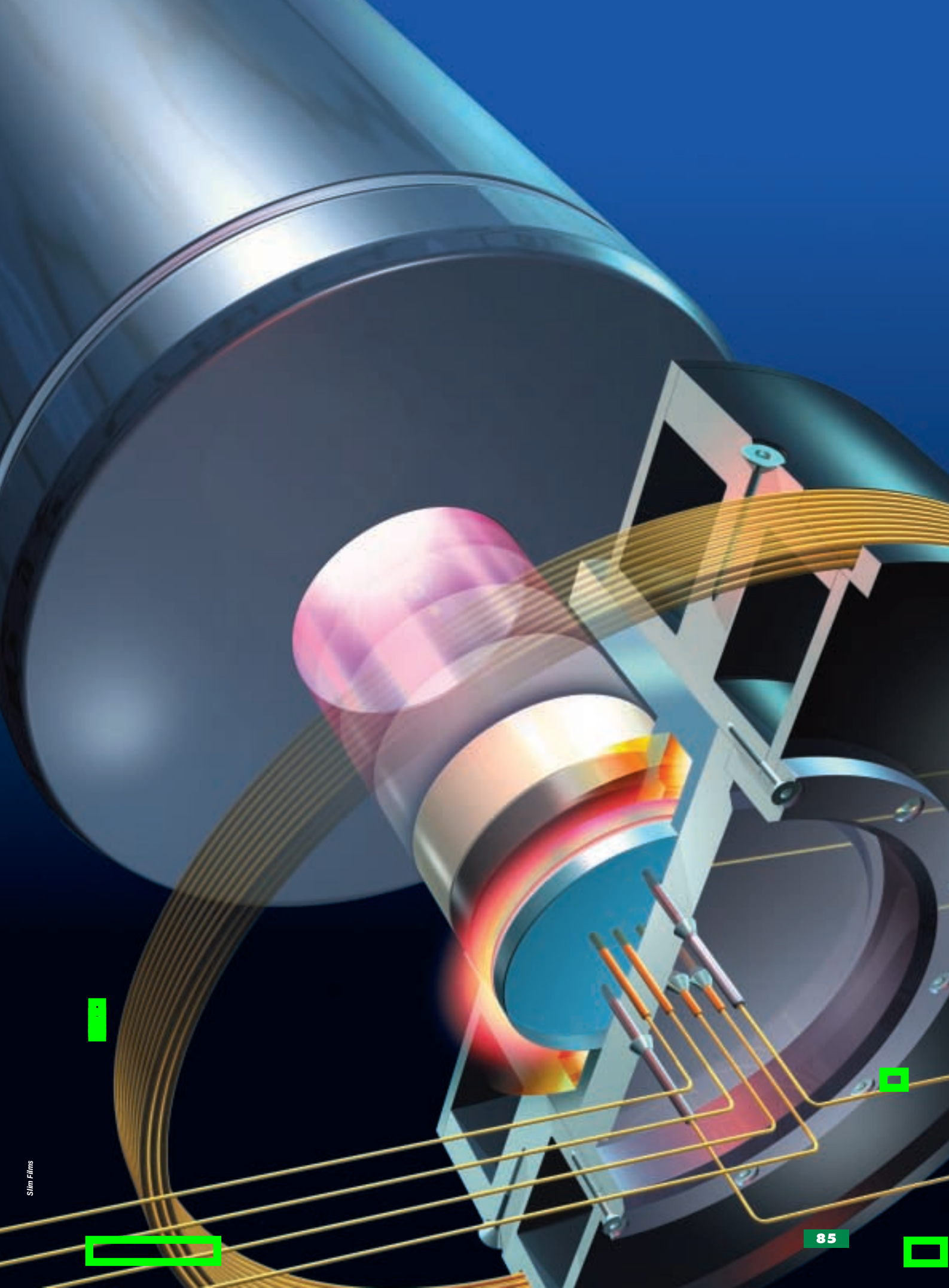
versité Harvard, et Arthur Ruoff, de l'Université Cornell, ont tenté de rendre l'hydrogène métallique en le soumettant à une pression de 340 gigapascals. Bien que l'hydrogène se soit solidifié, les physiciens n'ont pas mesuré sa conductivité électrique, car les instruments se sont brisés sous l'effet de la pression. En outre, ils n'ont pas rendu l'hydrogène liquide métallique, car celui-ci diffuse rapidement à travers les parois de la cellule.

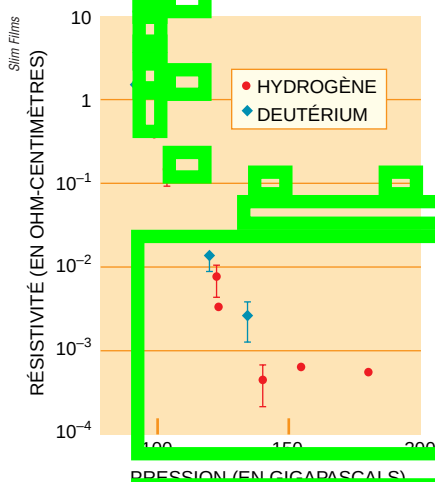
En utilisant le canon à gaz de Livermore, mes collègues et moi-même sommes parvenus à comprimer de l'hydrogène liquide à tel point qu'il se transforme en métal liquide. Il reste dans cet état au moins d'un millionième de seconde, mais c'est assez pour mesurer sa conductivité. Bien que nous n'ayons pas encore créé d'hydrogène métallique solide, nos résultats donnent un aperçu du comportement de l'hydrogène à des pressions et à des températures extrêmes.

Feu sur l'hydrogène !

Nous avons commencé nos expériences avec le canon à gaz il y a environ dix ans. Cet appareil, mis au point par la Société General Motors pour des recherches en balistique, date des années 1960.

1. UN IMPACT VIOLENT engendre une onde de choc qui comprime un échantillon d'hydrogène liquide jusqu'à ce qu'il devienne métallique. Un canon à gaz (en haut) accélère un projectile (un petit disque métallique sur un support en plastique) jusqu'à une vitesse de sept kilomètres par seconde. Lorsque le projectile frappe le porte-échantillon (représenté en coupe, en bas), il crée une onde de choc dans la couche d'hydrogène liquide (en jaune). Cette onde se réverbère entre deux plaques de saphir (seule l'une d'elles est visible, en bleu), comprimant l'hydrogène à des pressions qui atteignent 180 gigapascals. Les sondes de déclenchement violettes activent le dispositif d'enregistrement, et les électrodes (en orange) mesurent la conductivité de l'hydrogène pour déterminer le moment où il devient métallique.





2. LA RÉSISTIVITÉ DE L'HYDROGÈNE LIQUIDE diminue quand la pression augmente. À des pressions comprises entre 93 et 120 gigapascals, l'hydrogène liquide est semi-conducteur, mais, à partir de 140 gigapascals, il devient métallique (sa résistivité diminue jusqu'à 0,0005 ohm-centimètre). Le deutérium, un isotope de l'hydrogène, se comporte de la même façon.

Une version plus grande du canon a accéléré des modèles réduits de missiles, afin de tester les effets de la rentrée dans l'atmosphère à haute vitesse. Le Laboratoire Lawrence Livermore a finalement acquis le petit canon, car il permet de soumettre les matériaux à des conditions extrêmes et, notamment, d'étudier la conductivité de l'hydrogène fluide.

Lorsque la pression de l'hydrogène augmente, sa température de fusion s'élève, dépassant 1 500 kelvins sous une pression de 100 gigapascals : on doit le chauffer pour éviter qu'il ne se solidifie. Afin de comprimer et de chauffer l'hydrogène en même temps, on utilise une onde de choc, telle celle que crée un avion lorsqu'il franchit le mur du son : une onde de choc est une variation soudaine de pression qui comprime les molécules très rapidement, augmentant ainsi leur température. En 1991, nous avons commencé à utiliser le canon à gaz pour produire une onde de choc qui se réverbérerait dans l'hydrogène liquide.

Au premier étage du canon, une culasse remplie de poudre à canon (jusqu'à 3,3 kilogrammes) met en mouvement un piston dans un tube de dix mètres de long et de neuf centimètres de diamètre (voir la figure 3). Ce tube contient 60 grammes d'hydrogène gazeux (ce n'est pas celui que l'on cherche à rendre métallique). Le piston, qui pèse 6,8 kilogrammes, comprime l'hydrogène jusqu'à 0,1 gigapascal,

avant que la pression ne déclenche l'ouverture d'une valve. L'hydrogène pénètre alors dans le second étage du canon, constitué d'un cylindre de neuf mètres de long et de 2,8 centimètres de diamètre. Comme il est plus étroit que le tube précédent, la différence de vitesse accélère le gaz.

Après avoir franchi la valve, le gaz pousse un projectile (l'hydrogène est le meilleur accélérateur de projectile qui soit, car sa masse molaire est plus faible que celle des autres gaz). Cette petite plaque métallique, qui pèse 20 grammes, atteint sept kilomètres par seconde, soit plus de 25 000 kilomètres par heure. À l'extrémité du cylindre, elle frappe un porte-échantillon en aluminium contenant une couche d'hydrogène liquide entre deux plaques de saphir. Avant l'impact, on refroidit l'hydrogène à 20 kelvins, pour augmenter sa densité.

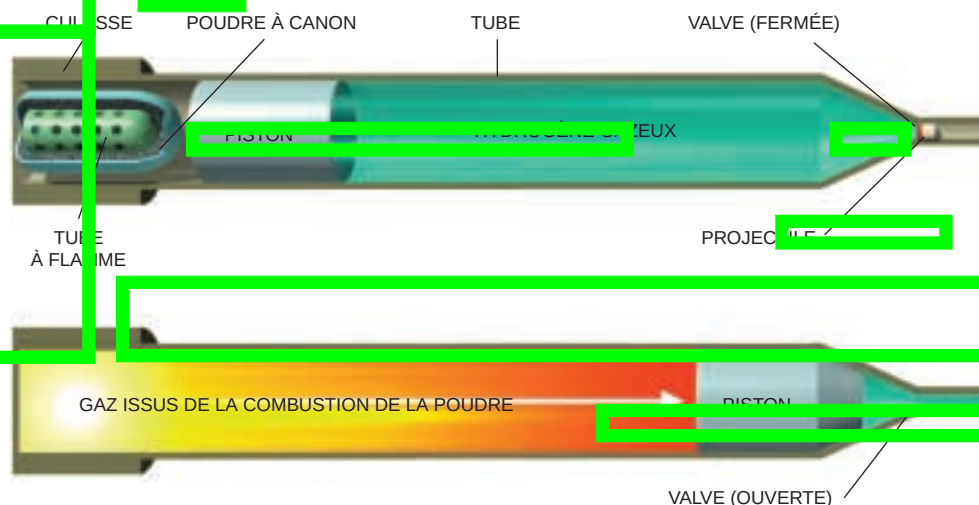
L'impact engendre une onde de choc puissante qui traverse le porte-échantillon et l'hydrogène liquide. Les plaques de saphir se refléchissent, de sorte qu'elle se réverbère plus de dix fois sur l'hydrogène, créant des pressions de 180 gigapascals et des températures de 3 000 kelvins. La réverbération de l'onde de choc et la pression qu'elle crée dans l'hydrogène sont les clés du succès de l'expérience. L'onde soumettant l'hydrogène à une seule onde de choc, il chaufferait beaucoup trop.

Dans le porte-échantillon, une sonde de déclenchement active le dispositif d'enregistrement dès qu'elle détecte que la première onde de choc a pénétré dans l'hydrogène. Bien que l'échantillon ne

soit soumis à la pression maximale que pendant environ 100 nanosecondes (soit un dixième de milliardième de seconde), l'hydrogène a le temps d'atteindre l'équilibre thermique. En revanche, il n'a pas le temps de diffuser hors du porte-échantillon ou de réagir chimiquement avec ce dernier.

Cette expérience n'est pas sans danger. Nous nous sommes assurés que l'hydrogène gazeux du canon ne se mélangerait pas avec l'oxygène de la chambre cible, car s'ils réagissaient ensemble, ils libéreraient la même énergie que l'explosion de deux kilogrammes de TNT. Notamment, nous avons vérifié que la chambre cible était assez solide pour supporter l'impact. Nous avons aussi conçu notre expérience de sorte que, si de l'air s'infiltrait, il ne suffirait pas à déclencher une explosion. Nous coupons le courant dans les appareils de mesure de la chambre cible juste après la mise à feu du canon, pour qu'aucune étincelle ne puisse enflammer l'hydrogène. En outre, après chaque tir, nous introduisons de l'azote dans la chambre cible afin de diluer l'hydrogène restant dans un gaz inerte.

Avec cette expérience, nous pensions observer de l'hydrogène fluide dans un état proche de l'état métallique, mais nous n'imaginions pas atteindre le dernier stade. Pour déterminer la conductivité électrique de l'hydrogène liquide, nous avons envoyé un faible courant dans les électrodes du porte-échantillon. Ainsi, nous avons mesuré une résistivité (la résistance d'un fil métallique à un courant électrique est égale à sa résistivité multipliée



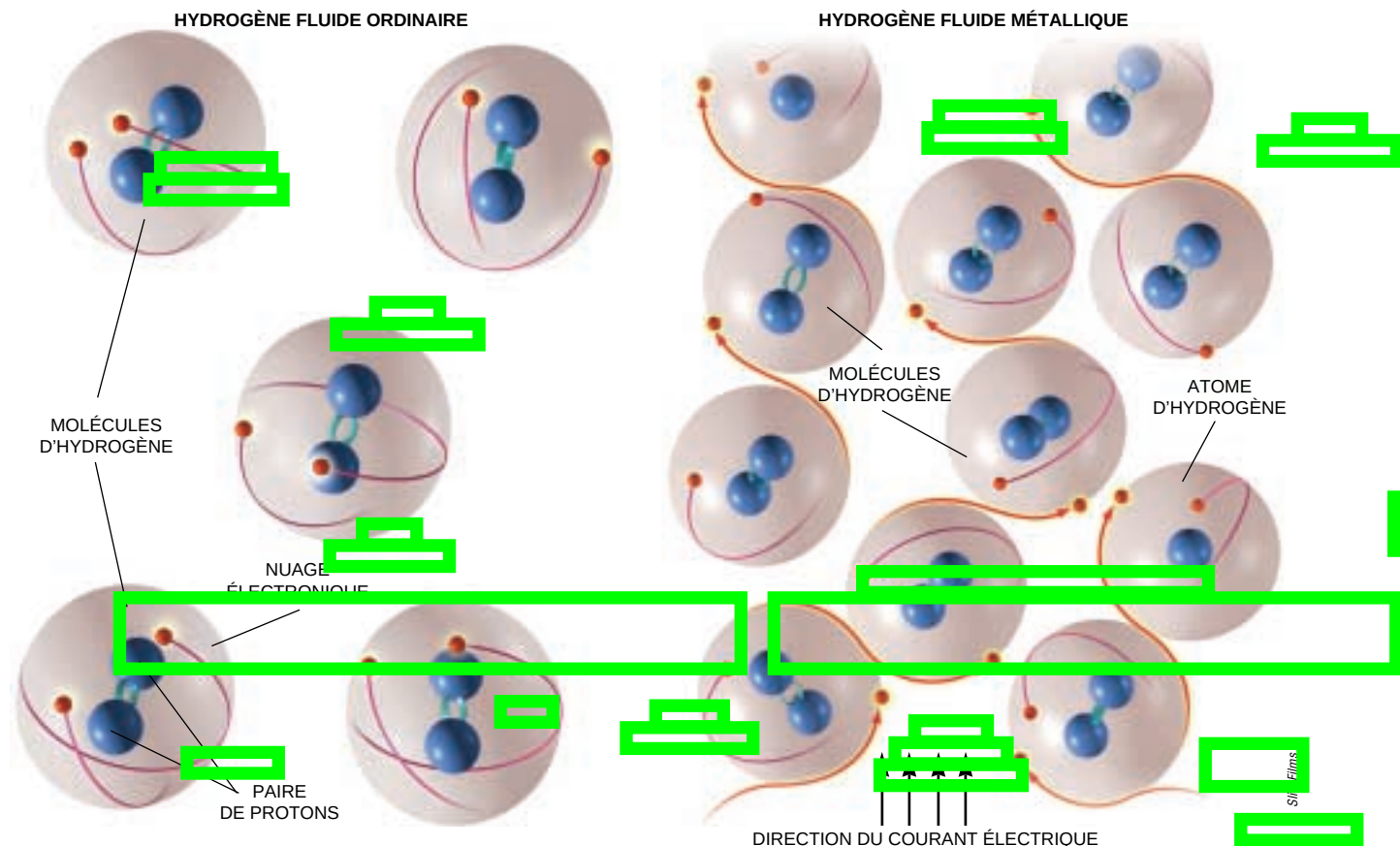
3. LE CANON À GAZ est constitué d'une culasse et d'un tube qui se prolonge par un cylindre plus étroit. Avant la mise à feu, la culasse contient 3,3 kilogrammes de poudre à canon (en haut). Quand la poudre s'enflamme, les gaz brûlants issus de l'explosion poussent un pis-

longueur et divisée par l'aire de sa section transversale), à 93 gigapascals, d'environ un ohm-centimètre et, à 120 gigapascals, d'environ 0,005 ohm-centimètre. Ces valeurs, inférieures à celles des isolants, mais supérieures à

celles des métaux, correspondent aux matériaux semi-conducteurs. Lorsque nous avons augmenté la pression jusqu'à 140 gigapascals, la résistivité de l'hydrogène liquide a diminué jusqu'à 0,0005 ohm-centimètre, ce qui indi-

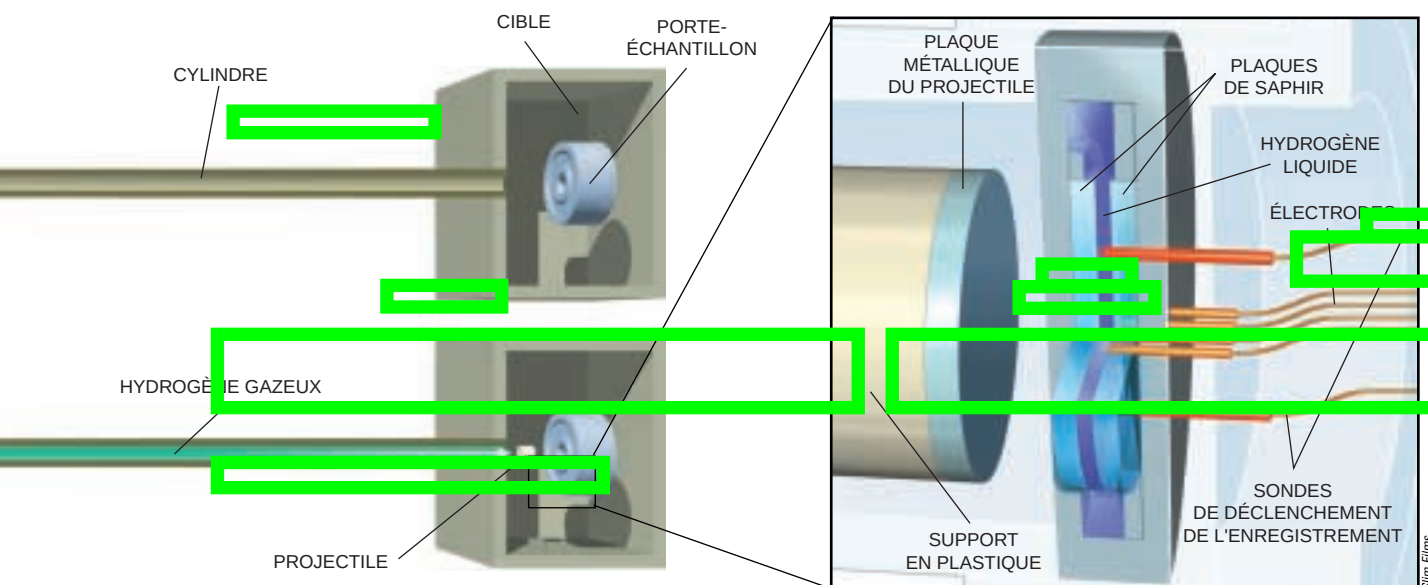
quait qu'il était devenu métallique. Au-delà (jusqu'à 180 gigapascals), elle n'a plus baissé.

Ces résultats nous ont tant surpris que nous avons retardé leur publication. Évidemment, nous avons refait



4. DANS LES MOLECULES D'HYDROGENE LIQUIDE ORDINAIRE (à gauche), les électrons (en rouge) forment un nuage négativement chargé (en gris) autour des paires de protons. À très haute pression (à droite), les

molécules se rapprochent, de sorte que les électrons passent de l'une à l'autre, créant un courant électrique quand on applique une tension au liquide. La pression dissocie également les molécules.



ton le long du tube (en bas). Le piston comprime l'hydrogène gazeux, qui déclenche l'ouverture d'une valve et jaillit dans le cylindre étroit, propulsant un projectile vers la cible. Ce projectile, une plaque

métallique sur un support en plastique, frappe le porte-échantillon en aluminium contenant l'hydrogène liquide, qui devient métallique quand la pression est suffisante.

les expériences en les modifiant, mais nous avons aussi cherché à comprendre pourquoi la résistivité était constante aux très fortes pressions. Aux basses pressions, les atomes d'hydrogène ont une forte tendance à l'appariement, de sorte que l'hydrogène liquide est entièrement moléculaire. Chaque molécule, composée de deux atomes, contient ainsi une paire de protons (positivement chargés) entourée d'un nuage électronique négativement chargé. Comme il faut une quantité d'énergie notable (35 électronvolts) pour arracher un électron à une molécule d'hydrogène, l'hydrogène moléculaire fluide ne transporte pas le courant : il est isolant. En revanche, quand les molécules d'hydrogène sont poussées les unes contre les autres par la pression et chauffées par l'onde de choc, l'énergie nécessaire pour faire passer un électron d'une molécule à une autre diminue. La chaleur de l'onde de choc fournit cette énergie, de sorte que l'hydrogène fluide devient semi-conducteur. Sa conductivité augmente régulièrement (tandis que sa résistivité baisse) avec la pression et la tempéra-

ture. Enfin, lors du passage à l'état métallique, certains électrons se délocalisent : ils quittent leur molécule initiale et se répartissent dans tout l'échantillon (voir la figure 4).

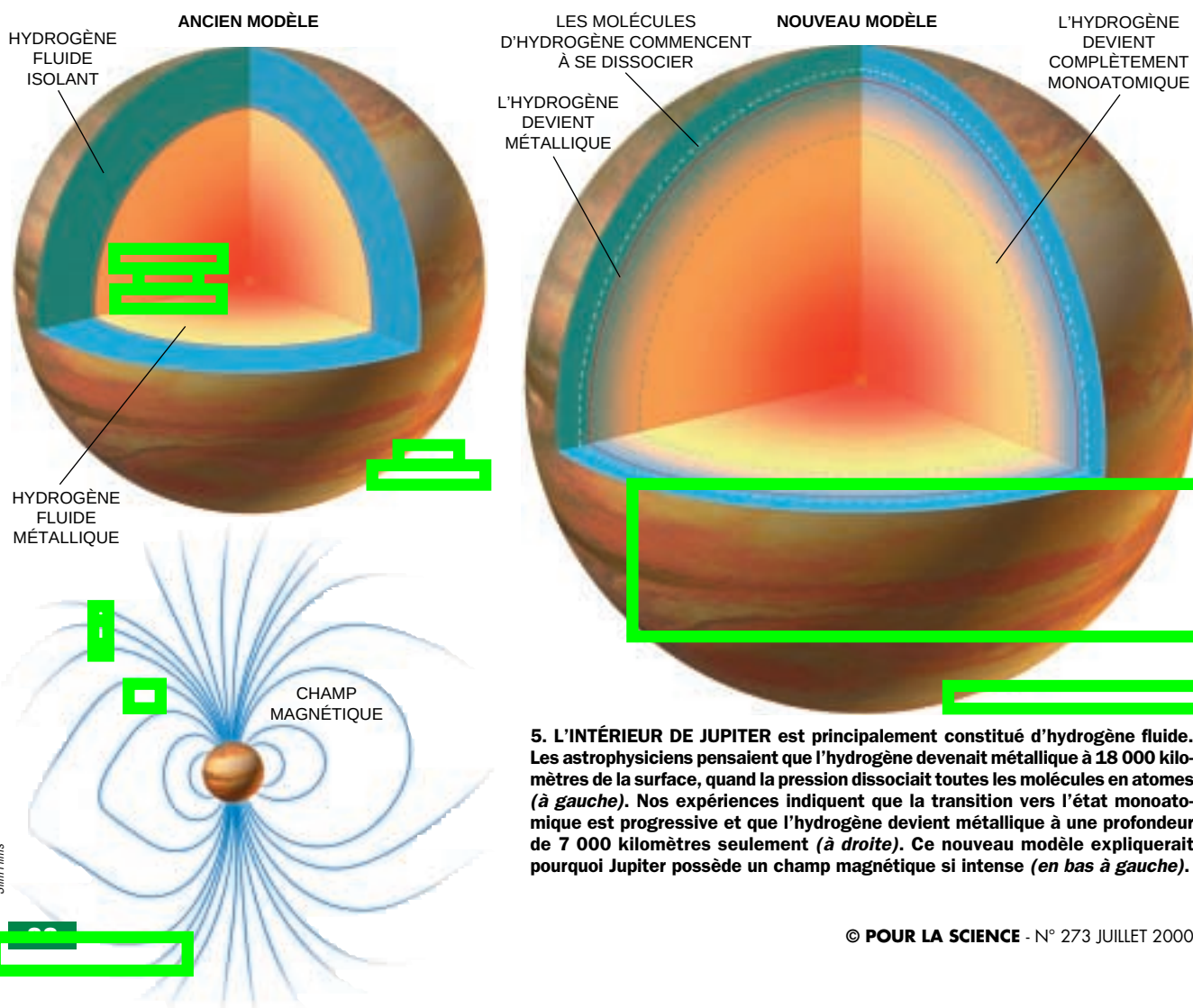
À une pression de 140 gigapascals, la masse volumique de l'hydrogène liquide est de 0,32 mole par centimètre cube, et la température est de 2 600 kelvins. L'énergie nécessaire pour faire sauter un électron d'une molécule d'hydrogène à une autre tombe à 0,22 électronvolt. Les molécules sont si proches que leurs nuages électroniques se recouvrent : les électrons passent librement de l'une à l'autre. Une augmentation supplémentaire de densité ne change rien, ce qui explique pourquoi la résistivité de l'hydrogène ne diminue plus quand on augmente encore la pression. En outre, environ dix pour cent de l'hydrogène se dissocie en atomes. L'hydrogène est sous la forme d'un mélange de molécules, d'atomes et probablement d'agrégats de plus de deux protons. Les collisions entre les molécules brisent constamment ces dernières en atomes, qui se recombinent pour former de nou-

velles molécules. En raison de ce désordre, les électrons sont dispersés, et le matériau présente la «conductivité minimale» d'un métal désordonné.

Jupiter dans une bouteille

Pourquoi la pression qui conduit à la métallisation de l'hydrogène fluide est-elle inférieure à celle qui conduit à la métallisation de l'hydrogène solide? Sans doute parce que les atomes du solide se figent aux nœuds du cristal, ce qui gêne leur ionisation. Nos expériences et leurs interprétations contribuent ainsi à comprendre ce qui se passe à l'intérieur de Jupiter et de Saturne. Ces deux géantes gazeuses ont ensemble une masse 400 fois supérieure à celle de la Terre. La plus grande partie de leur hydrogène est métallique. Elles possèdent de puissants champs magnétiques, comme ceux de ces planètes.

Avant nos expériences, les astrophysiciens pensaient que Jupiter, sous son épaisse couche nuageuse, possédait un manteau d'hydrogène électriquement isolant, épais d'environ 18 000 kilomètres (soit un quart du



5. L'INTÉRIEUR DE JUPITER est principalement constitué d'hydrogène fluide. Les astrophysiciens pensaient que l'hydrogène devenait métallique à 18 000 kilomètres de la surface, quand la pression dissociait toutes les molécules en atomes (à gauche). Nos expériences indiquent que la transition vers l'état monoatomique est progressive et que l'hydrogène devient métallique à une profondeur de 7 000 kilomètres seulement (à droite). Ce nouveau modèle expliquerait pourquoi Jupiter possède un champ magnétique si intense (en bas à gauche).

rayon de la planète) et un noyau d'hydrogène métallique liquide. Ils supposaient ainsi l'existence d'une frontière nette entre le manteau et le noyau, à une profondeur où la pression (environ 300 gigapascals) transforme l'hydrogène fluide, isolant, en hydrogène métallique, conducteur. Cependant, nos résultats indiquent que la transition entre l'hydrogène moléculaire et l'hydrogène monoatomique est progressive : l'hydrogène moléculaire commence à se dissocier à une pression de 40 gigapascals et devient complètement monoatomique à 300 gigapascals environ. La conductivité atteint celle d'un métal à 1 400 gigapascals et 4 000 kelvins : une telle pression devrait apparaître à une profondeur d'environ 7 000 kilomètres seulement.

Ainsi, l'hydrogène métallique à l'origine du champ magnétique de Jupiter est plus abondant qu'on ne le pensait, ce qui expliquerait pourquoi le champ de surface de la planète (environ dix gauss) est relativement fort. En comparaison, le noyau ferreux à l'origine du champ magnétique terrestre est plus profondément enfoui, car son rayon est deux fois inférieur à celui de la planète, de sorte que le champ de surface n'est que de 0,5 gauss environ.

L'étude de la métallisation de l'hydrogène devrait favoriser la mise au point de la fusion nucléaire par confinement inertiel. Dans ce type de fusion, on place une « pastille » de combustible, composée de deutérium et de tritium (les isotopes de l'hydrogène), dans une cavité qu'on irradie avec des impulsions laser très intenses. La première impulsion comprime le combustible à un choc d'environ 100 gigapascals, et les impulsions suivantes agissent comme les réverbérations de l'onde de choc dans notre expérience. Connaissant le comportement de l'hydrogène à ces pressions élevées, on améliorera l'efficacité des impulsions laser.

Nous ne sommes pas au bout des découvertes. Ainsi, si nous arrivions à fabriquer de l'hydrogène métallique solide qui, une fois produit, reste stable à pression et à température ambiantes (tout comme le carbone reste sous forme de diamant), celui-ci aurait d'innombrables applications, notamment parce qu'il serait supraconducteur. Toutefois, dans l'hydrogène, les forces de Van der Waals et, notamment, les forces de répulsion, sont importantes : les molécules ont tendance à s'éloigner, les unes des autres, dès que la pression diminue. Des additifs qui se lieraient aux molécules et aux atomes d'hydrogène et les maintiendraient ensemble sans modifier leurs propriétés seraient-ils la clef de la fabrication d'hydrogène métallique solide ?

Nous spéculons déjà sur ce que nous ferions avec un tel matériau : les lignes à haute tension ne subiraient aucune perte d'énergie, les ordinateurs seraient plus rapides, les trains léviteraient sur des chemins magnétiques... Aujourd'hui, les supraconducteurs fonctionnent à des températures inférieures à 150 kelvins, de sorte qu'on doit les refroidir avec de l'azote liquide, ce qui limite leurs usages. L'hydrogène métallique solide aurait une densité proche de celle de l'eau, trois fois plus légère que l'aluminium. Il servirait à fabriquer des structures ultra-légères, telles des voitures qui consommeraient beaucoup moins de carburant qu'aujourd'hui. Il emmagasinerait de grandes quantités d'énergie, qu'il libérerait en se vaporisant sans aucun danger pour l'environnement, remplaçant avantageusement soit l'essence, soit le mélange d'hydrogène et d'oxygène utilisé pour lancer les fusées. Il rendrait la fusion nucléaire viable... Désormais, l'hydrogène fait l'objet d'un paradoxe fascinant : son comportement semble extrêmement complexe, alors qu'il a la structure la plus simple de tous les atomes.

LA TERRE

50 expériences pour découvrir notre planète

André Prost

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

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

Code 2401-100 F-128 pages

Voir bon de commande page 90

BELIN • POUR LA SCIENCE

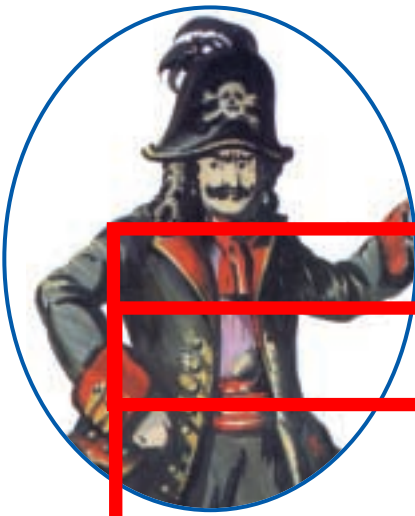
William N. LILLIS est physicien au Laboratoire Lawrence Livermore, à Livermore, en Californie.

N. ASHCROFT, *Dense Hydrogen : The Reluctant Alkali*, in *Physics World*, vol. 8, n° 7, pp. 43-48, juillet 1995.

S.T. WEIR, A.C. MITCHELL et W.J. NELSON, *Metallization of Fluid Molecular Hydrogen at 140 GPa (1.4 Mbar)*, in *Physical Review Letters*, vol. 76, n° 11, pp. 1860-1863, 11 mars 1996.

P. LOUËYER, R. LE TOULLEC, D. HAUSERMAN, M. HAUFLAND et HEINLEY, H.K. MAO et W. FINGER, *X-Ray Diffraction and Equation of State of Hydrogen at Megabar Pressures*, in *Nature*, vol. 383, n° 6612, 1996.

Chandrabhas NARAYANA, Huan LOU, Jon ORLOFF et Arthur L. RUOFF, *Solid Hydrogen at 342 GPa : No Evidence for an Alkali Metal*, in *Nature*, vol. 393, pp. 46-49, 7 mai 1998.



La logique des pirates féroces

IAN STEWART

Un problème de partage que l'intuition seule ne résout pas.

La logique conduit parfois à des conclusions étranges. Pourtant, si un raisonnement est sans faille, ses conclusions doivent être justes, même quand elles contredisent l'intuition. Stephen Omohundro m'a envoyé de Californie un problème connu depuis une dizaine d'années, mais qu'il a modifié, de sorte que seule la logique – et non l'intuition – guide la recherche de la solution. Voyons d'abord la version finale du

problème. Dix pirates ont mis la main sur un trésor de 100 pièces d'or et veulent se le partager. Démocrates à leur manière, les pirates font le partage de la façon suivante : le plus féroce propose une répartition et tous votent, lui inclus. Si au moins 50 pour cent des avis sont favorables, la proposition passe ; sinon, son auteur est jeté par-dessus bord et la procédure se répète avec le plus féroce des pirates restants.

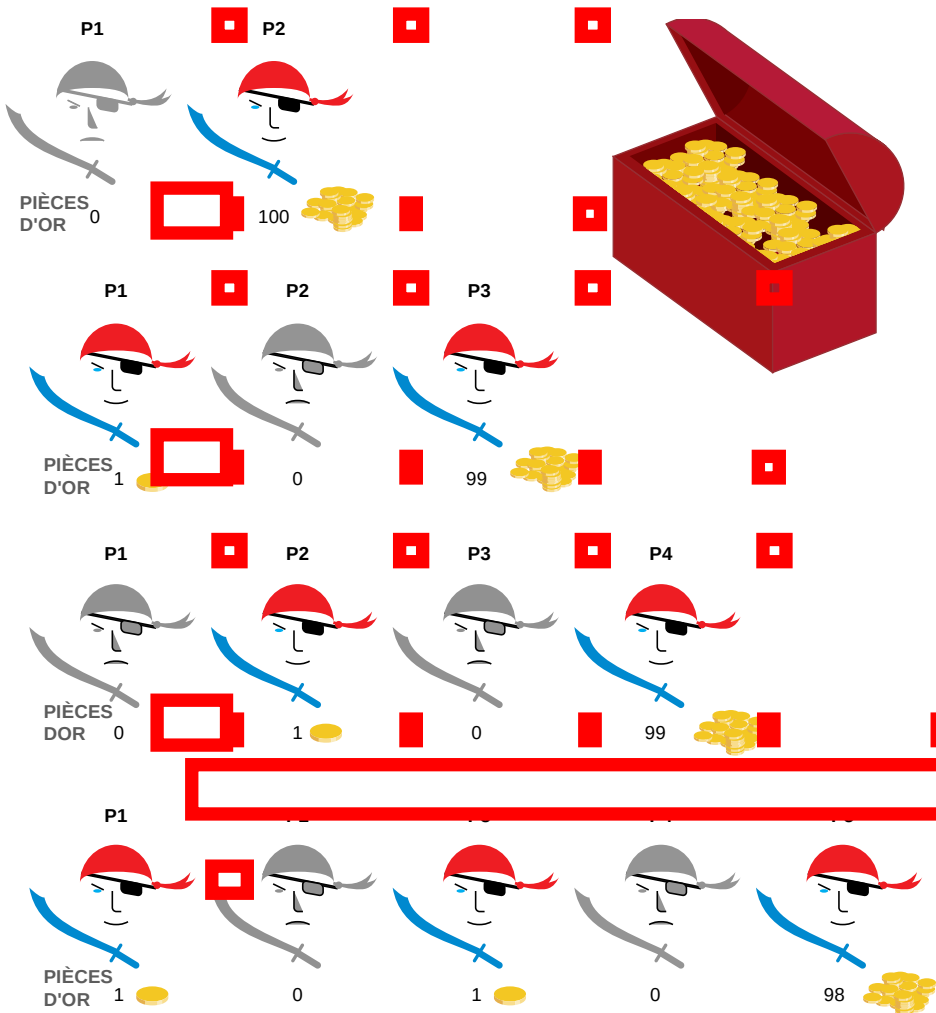
Tous les pirates aiment jeter leurs compagnons par-dessus bord, mais, s'ils ont le choix, ils préfèrent les espèces sonnantes et rébuchantes. Ils détestent évidemment être jetés par-dessus bord eux-mêmes. Tous sont rationnels et savent que les autres le sont aussi. De plus, les férociétés des divers pirates ne sont jamais égales, de sorte qu'il existe une hiérarchie de férociété connue de tous. Les pièces d'or sont indivisibles et les arrangements sous-main sont impossibles, car aucun pirate n'a confiance en ses compagnons : chacun pour soi.

Quelle proposition le plus féroce des pirates doit-il faire pour récupérer le plus d'or possible ? Commençons par numéroter les pirates par ordre de férociété croissante : le moins féroce est le numéro un, et le plus féroce, le numéro dix.

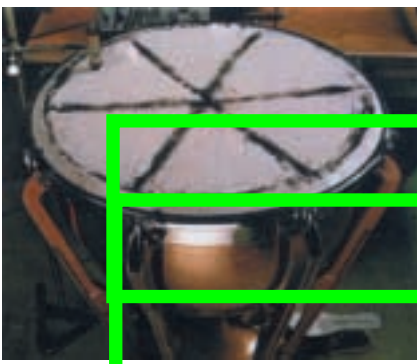
Dans la solution, on partant de la fin et en remontant vers l'origine du problème. Tout d'abord, on se demande si la proposition est bonne ou mauvaise ; on peut donc appliquer ce savoir à l'avant-dernière décision et ainsi de suite. Au contraire, une recherche en sens direct ne mène pas loin, car elle bute toujours sur la question : « Que fera le suivant si je fais ceci ? »

Conformément à cette idée, commençons par examiner la situation où deux pirates P1 et P2 restent seuls à bord, tous les autres ayant été jetés par-dessus bord. Le plus féroce est P2, et la proposition la plus avantageuse qu'il puisse faire est la suivante : il propose 100 pièces d'or pour lui-même et aucune pour P1. Comme il a au moins 50 pour cent des voix, sa proposition passe.

Ajoutons le pirate P3. P1 sait qu'il sait – que, si la proposition de P3 est rejetée, le jeu continuera avec P2 seulement et que ce dernier fera une proposition de 100 pièces pour lui tout seul. Aussi P3 sait que P1 acceptera toute proposition qui rapportera quelque chose à P1. P3 cède le moins possible d'or : il propose 99 pièces pour lui, rien pour P2 et une pièce pour P1 (voir la figure 1).



1. Les pirates les plus féroces se taillent la part du lion quand le butin est partagé entre trois, quatre ou cinq pirates.



La musique en images

CHRISTOPH PÖPPE

Comment former des images à partir des sons.

Comment transformer les sons en images ? La recherche d'une telle opération est utile : un coup d'œil suffirait pour savoir si une émission sonore est intentionnelle ou aléatoire. Gordon Monro, à l'Université de Sydney, et Jeff Pressing, à l'Institut de psychologie de Melbourne, explorent ce type de visualisations.

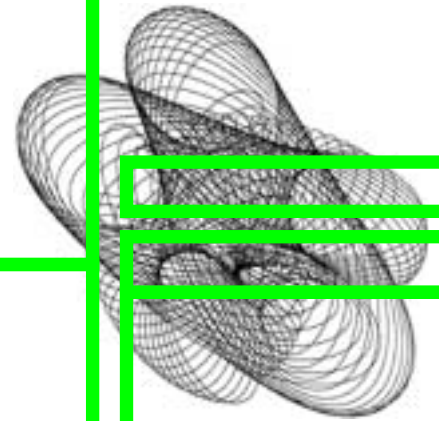
Ils ont notamment utilisé les données fournies par les systèmes d'enregistrement de disques compacts : environ 44 000 fois par seconde, la tension électrique formée à partir du son, dans le microphone, est mémorisée ; on transforme ainsi un signal continu en une suite de valeurs qui sont stockées sous forme codée sur les disques compacts.

Désignons ces valeurs par $s_1, s_2, s_3, \dots$ et portons dans un plan muni d'un repère les points (s_i, s_{i+1}) . Normalement, on utilise les repères cartésiens pour représenter les fonctions. Aux variables x de l'axe des abscisses, les fonctions associent des valeurs y repérées sur l'axe des ordonnées. Dans l'étude du son, on ne cherche pas à définir une fonction f associant chaque valeur x à la précédente ($s_i = f(s_i)$) mais on construit un graphe en portant des points d'abscisse s_i et d'ordonnée s_{i+1} dans un plan comme si une telle fonction existait. Ce mode de représentation

fait ainsi apparaître d'éventuelles relations (des « corrélations ») entre une valeur et celle qui la précède immédiatement, autrement dit entre la suite des valeurs et une version d'elle-même décalée dans le temps, ce qu'on appelle « diagramme d'autocorrélation » pour l'image que forment les innombrables points qui décrivent un signal sonore.

Quelle image obtient-on par ce procédé ? Sans précautions particulières, l'image est véritablement insignifiante, car, avec une fréquence d'échantillonnage de 44 000 par seconde, deux valeurs successives sont si proches que rien n'apparaît : les valeurs s_i et s_{i+1} sont quasi identiques, et la représentation graphique correspondante est très proche de la droite $x = y$, la bissectrice du premier quadrant.

L'image devient plus intéressante quand on utilise un écart supérieur entre les valeurs représentées, tout en conservant tous les points de l'échantillonnage : on porte par exemple les points (s_i, s_{i+10}) au lieu des points (s_i, s_{i+1}) . D'ailleurs, au lieu de 10, on peut choisir n'importe quel écart de temps k afin d'obtenir une image aussi instructive que possible. Avec un pas k égal à 10 et un son de fréquence égale à 1 000 hertz (ce qui correspond à une note aiguë de soprano), les deux valeurs à représenter



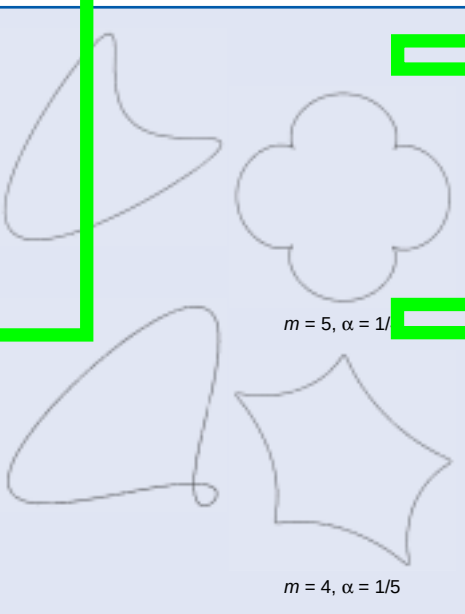
1. Image d'un accord de trois sons purs : do, sol et mi.

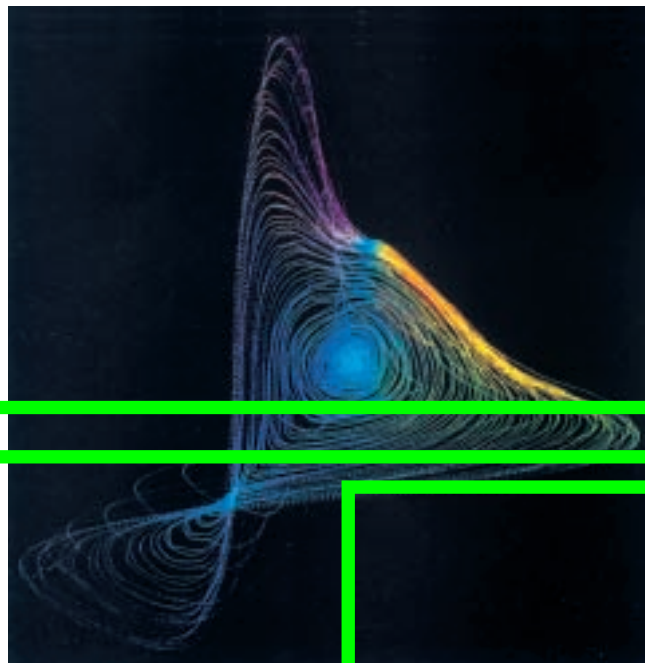
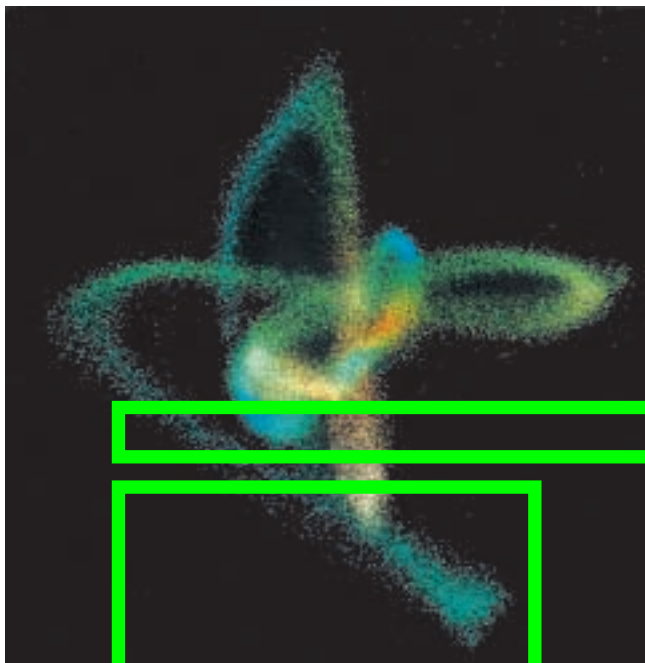
sont espacées d'un quart de période environ, ce qui est optimal.

Pour une oscillation sinusoïdale, l'image ainsi obtenue est une ellipse (lorsque l'écart de temps est exactement d'un quart de période, c'est même un cercle). D'autre part, tout signal périodique peut être décrit comme une somme de sinusoïdes de fréquences multiples de la fréquence minimale, dite fondamentale. Lorsque la première oscillation harmonique (une octave au-dessus du son fondamental, c'est-à-dire à une fréquence double de celle du fondamental) s'ajoute au fondamental avec une intensité inférieure, l'ellipse se déforme jusqu'à former des nœuds (voir l'encadré ci-contre). Sur l'image, un déphasage entre les deux oscillations apparaît alors qu'il est inaudible. Des harmoniques supérieures engendrent de remarquables motifs en forme de fleurs, lorsque l'on choisit un écart de temps approprié, et un accord à trois notes donne une courbe compliquée (voir la figure 1). Un son de flûte aigu et très fort donne un champ gris avec une structure à peine reconnaissable (voir la figure 3).

Dans quelles conditions les points forment-ils des courbes reconnaissables ? Supposons qu'il existe réellement une fonction f qui corresponde à la relation $s_{i+1} = f(s_i)$. Si seule la première valeur s_1 de la suite est fixée, toutes les autres valeurs seraient déterminées par la fonction f : $s_2 = f(s_1)$, $s_3 = f(s_2)$, $s_4 = f(s_3)$, etc. La fonction f est ce que l'on nomme une fonction d'itération, et le système dyna-

Images d'autocorrélation obtenues pour des superpositions d'oscillations sinusoïdales pures. À gauche, les images sont celles que l'on obtient pour une note sinusoïdale pure à laquelle on a ajouté la note à l'octave supérieure, deux fois moins intense ; les deux courbes ne diffèrent que par le déphasage des deux notes. À droite, l'image correspond à une note sinusoïdale avec plusieurs harmoniques (le nombre m indique le rapport entre les fréquences de l'oscillation harmonique et de l'oscillation de base). Les écarts de temps (α indique l'écart en fraction de période) sont choisis de façon à obtenir une image la plus symétrique possible.



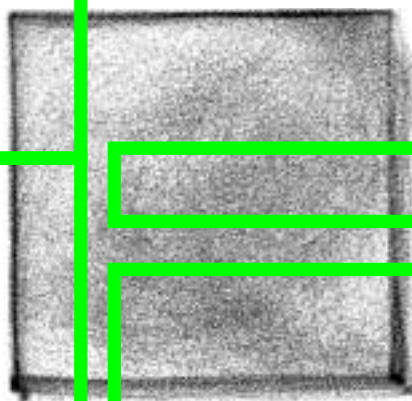


2. Images d'autocorrélation tridimensionnelle d'une note de flûte (à gauche) et d'un court morceau de trompette (à droite). La troisième dimension est représentée par la couleur.

mique auquel elle est associée est discontinu, car le temps s'écoule par pas successifs, comme s'il était compté par une montre dont les aiguilles avancent par sauts. Quand on porte les couples de valeurs (s_j, s_{j+1}) d'un tel système dynamique dans un système de coordonnées, on obtient une courbe ayant une forme bien définie. Quand on choisit un écart entre les indices, lors de la représentations des points, on obtient encore une courbe, généralement un peu plus compliquée : les points (s_j, s_{j+k}) appartiennent à la courbe de la fonction g , qui est la répétition k fois de la fonction f .

Si un son engendre une courbe, une courbe peut-elle engendrer un son ? En principe non, parce que les sons sont continus, et non discrets. Toutefois les images d'autocorrélation confirment que des suites numériques, telle celle des valeurs d'un son sinusoïdal, se comportent comme si elles étaient issues d'une simple fonction d'itération ; elles aident également à distinguer le hasard pur du chaos déterministe. Dans le premier cas, on obtient un champ gris plus ou moins sans structure ; dans le second, on obtient la courbe associée à une fonction d'itération ou quelque chose d'un peu plus compliqué.

La situation de chaque valeur ne dépend que de celle qui la précède immédiatement, ce qui est le cas le plus simple d'un système dynamique discret. Dans d'autres cas, la valeur de la fonction dépend des deux dernières valeurs, et l'itération prend la forme $s_{j+1} = f(s_j, s_{j-1})$. Plus généralement, chaque valeur peut dépendre des trois, quatre, cinq... dernières valeurs. On dit alors que le système est de dimen-



3. Image d'une note de flûte très forte avec un écart de temps d'environ un quart de période du son fondamental.

sion 2, 3, 4, 5, etc. La dimension désigne ici, comme dans le langage mathématique courant, le nombre de nombres nécessaires pour décrire intégralement l'état du système considéré. Pour un système bidimensionnel, la définition complète du système impose en outre de disposer la donnée des deux premières valeurs initiales.

ENTRE HASARD ET CHAOS

Pour des fonctions d'itération de dimension élevée, la représentation des fonctions d'itération est plus difficile qu'à une dimension : une fonction à deux variables nécessite déjà, pour sa représentation graphique, trois coordonnées (et se présente alors comme un paysage vallonné au-dessus d'une surface plane). Pour ne négliger aucune des trois coor-

données, on doit porter les points (s_j, s_{j+1}, s_{j+2}) ou (s_j, s_{j+k}, s_{j+2k}) dans une représentation tridimensionnelle. Les deux dimensions d'une feuille de papier étant un peu justes, G. Monro et J. Pressing représentent la troisième dimension par des couleurs (voir la figure 2).

On obtient ainsi un résultat surprenant. Même en négligeant la couleur (soit en portant à la troisième dimension), l'image n'est pas une surface entière : elle est réduite à une courbe un peu floue ou à un ensemble de courbes séparées par des espaces : la dimension de cet objet semble être supérieure à un, mais inférieure à deux.

Cette première impression s'exprime mathématiquement par un concept de dimension généralisée. À l'Université de Groningen, Floris Takens a montré que l'analyse d'attracteurs est applicable à des systèmes dynamiques de toutes sortes. Même quand on ignore combien il faut de variables pour décrire entièrement l'état d'un système, on peut déterminer, par le calcul, la dimension d'un processus quand elle est finie (le chaos est autorisé, mais pas le hasard pur) ; on obtient un nombre qui n'est généralement pas entier et que l'on nomme la « dimension fractale ».

Enfin, en théorie du chaos, les théorèmes abstraits sont complexes, mais les phénomènes fondamentaux deviennent visibles dès que l'on représente une série de mesures d'une façon habile.

Christoph PÖPPE est mathématicien et journaliste à la revue *Spektrum der Wissenschaft*.

Promenade en voiture

ROLAND LEHOUCQ

La physique aide à devenir un meilleur conducteur : nous comprenons mieux les conseils de la sécurité routière, ce qui nous incite à les appliquer.

Durant les vacances d'été, la sécurité routière incite les conducteurs à la prudence et leur prodigue ses habituels conseils de conduite. Parmi ceux-ci, nous en retiendrons trois : rouler en conducteur en ayant correctement équilibré le chargement de son véhicule et en tenant compte de l'état de la route. Ces excellents conseils sont compris avec la loupe du physicien.

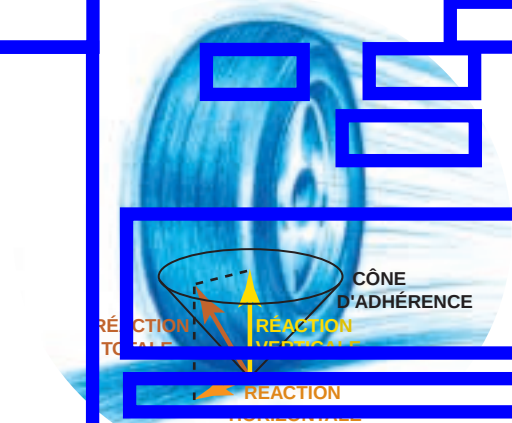
À l'arrêt, la résultante des forces qui s'applique à une voiture est nulle, car celle-ci est en équilibre. Ces forces sont le poids, dirigé vers le sol et appliqué au centre de gravité du véhicule, et la réaction de la route, dirigée vers le haut et appliquée aux points de contacts entre les pneus et le sol. Lorsque le poids est uniformément réparti, la réaction exercée par le train avant, égale à celle qui est subie par le train arrière, est la moitié du poids total du véhicule. Les voitures de tourisme ne sont pas équilibrées de manière symétrique : la position du moteur fait que le train avant supporte 60 pour cent de la masse du véhicule. Cette asymétrie influence la tenue de route du véhicule en mouvement.

Démarrons. La réaction de la route sur les roues va-t-elle rester verticale ? Non, car les roues en rotation exercent une force horizontale sur la route qui, en vertu du principe de l'action et de la réaction, doit se traduire par une réaction horizontale du sol sur les roues. Cette réaction horizontale est bien sûr dirigée vers l'avant quand la voiture avance. La

réaction horizontale est toujours inférieure au poids de la réaction verticale, qui compense le poids du véhicule, par un coefficient d'adhérence, qui quantifie la qualité du contact entre les roues et le sol. Si l'égalité est vérifiée, le véhicule glisse sur la route. Autrement dit, pour éviter le glissement, la direction de la réaction totale doit rester à l'intérieur d'un cône d'adhérence (voir la figure ci-contre).

Pour estimer ce coefficient d'adhérence, imaginons une voiture dont les roues sont bloquées. Tant que la poussée est insuffisante, il ne se passe rien ; puis, au-delà d'un seuil de poussée, la voiture commence à glisser. Ce glissement s'amorce dès que les forces de contact horizontales entre les pneus et le sol ne compensent plus la poussée. Le quotient entre la force nécessaire à l'amorçage du glissement et le poids de la voiture est le coefficient d'adhérence des pneus sur le sol. Sur sol sec, il vaut environ 0,8 pour des pneus courants et dépend de nombreux paramètres comme la composition et l'usure du pneu, la qualité du sol, la température, l'état des suspensions ou la pression de gonflage.

Ainsi, il faut exercer une poussée horizontale supérieure à 810 kilogrammes pour faire glisser sur un sol sec une voiture de 900 kilogrammes (que nous prendrons comme référence dans la suite). Sur un revêtement très glissant, comme la glace, le coefficient d'adhérence est inférieur et la force minimale à exercer est plus faible, presque nulle. Quand on

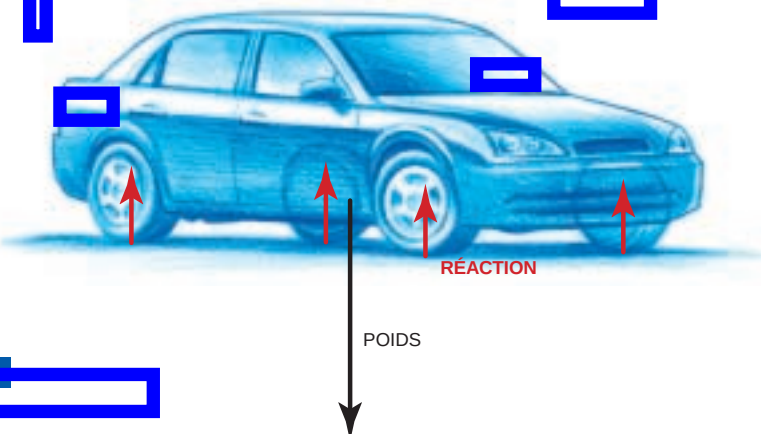


pousse une voiture libre de rouler (freins desserrés et désembrayée), la poussée nécessaire pour la mouvoir est plus faible, car il n'est plus nécessaire d'atteindre un seuil de glissement.

DÉMARAGE EN DOUCEUR

Le conducteur engage la première vitesse et, en embrayant, transmet la rotation du moteur aux roues. Comme celles-ci ne tournent pas à la même fréquence que le moteur, laquelle est de quelques milliers de tours par minute en vitesse de croisière, on interpose entre l'arbre moteur et l'axe des roues un système de pignons réducteurs (boîte de vitesses, dispositif de transmission, etc.). En première, la réduction totale varie entre 0,06 et 0,08 pour une voiture courante. Ainsi, les roues effectuent de 60 à 80 tours par minute quand le régime du moteur est de 1 000 tours par minute. Pour des roues de 60 centimètres de diamètre, cela représente une vitesse, en première, comprise entre 6,8 et 9 kilomètres par heure.

La puissance fournie par le moteur est essentiellement utilisée pour propulser le véhicule, mais une fraction est dissipée par les frottements mécaniques et aérodynamiques. Le moteur exerce un couple de rotation proportionnel au quotient de la puissance fournie et du régime du moteur (sa



fréquence. La fréquence de rotation des roues étant toujours inférieure à celle du moteur (même en cinquième), le couple exercé sur l'axe des roues à puissance donnée est supérieur au couple produit par le moteur. Dans les systèmes de transmission, on multiplie le couple du moteur, et le couple exercé sur l'axe des roues motrices se calcule en le multipliant (entre 80 et 200 newtons mètre selon les voitures) par le démultiplicateur (le « rapport de boîte »). Par exemple, le couple exercé sur l'axe des roues vaut environ 1 100 newtons mètre pour une petite voiture roulant en première.

Au démarrage, pour des roues de 60 centimètres de diamètre, la réaction horizontale exercée par la route sur les roues du train avant est équivalente à 370 kilogrammes. Si la force de réaction exercée sur le pneu est supérieure au seuil de glissement imposée par les frottements, la voiture patine. Pour éviter ce patinage qui engendrerait peu de mouvement et beaucoup de chaleur, il est judicieux de choisir un rapport de boîte tel que la force exercée sur les roues motrices soit juste inférieure au seuil de glissement. Cela correspond à une accélération maximale de 0,5 fois l'accélération de la pesanteur, indépendante de la masse du véhicule. Conseil : n'accélérez pas trop vite au démarrage.

ACCÉLÉRATION ET FREINAGE

Lors de l'accélération, les passagers du véhicule sont plaqués sur leur siège. Les roues motrices subissent alors de la part du sol une réaction horizontale dirigée vers l'avant. Cette force a tendance à faire tourner la voiture autour de son centre de gravité, l'avant se soulevant. Il se passe la même chose quand on démarasse un table en tirant sur la nappe : les objets posés à sa surface se renversent d'autant plus facilement qu'ils sont hauts et que l'on tire fort.

Ainsi, l'accélération crée un couple de rotation qui est contrebalancée par une augmentation de la réaction verticale du sol sur le train arrière du véhicule. Comme la résultante des réactions

verticales doit toujours être égale au poids du véhicule, la réaction qui s'exerce sur le train avant diminue. Tout se passe comme si la voiture se relevait subitement plus lourde à l'arrière et plus légère à l'avant. Pour une accélération de 0,5 fois l'accélération de la pesanteur, ce phénomène de transfert de charge peut dépasser 100 kilogrammes.

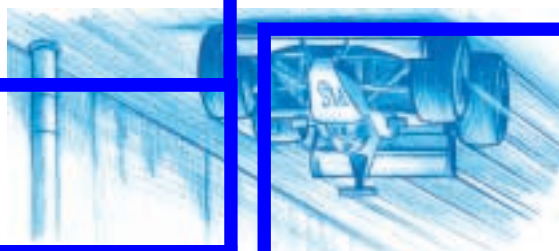
Lors du freinage, le transfert de charge est inversé : c'est l'avant qui est surchargé par rapport à l'arrière. De même, une voiture qui freine subit une force centrifuge dont le couple surcharge les roues extérieures et allège les roues intérieures.

Au final, en démarrant, une voiture allège son train avant et surcharge son train arrière. Si les roues arrière sont motrices, cette surcharge augmente leur seuil de glissement ce qui permet de leur faire subir un couple élevé et de poursuivre l'accélération. Si, à l'inverse, les roues avant sont motrices, l'allègement des roues avant empêche que l'on puisse accélérer sans les faire glisser. On comprend ainsi le danger d'une mauvaise répartition de la charge d'une voiture. Un coffre trop plein charge excessivement le train arrière au détriment du train avant, d'où un plus grand risque de glissement du train avant.

LES APPUIS AÉRODYNAMIQUES

Comment améliorer la tenue de route ? En utilisant les mêmes principes physiques que ceux qui régissent le vol des avions. Dans un fluide qui s'écoule autour d'un objet, la pression est d'autant plus grande que la vitesse est faible. L'objet subit donc une force qui le pousse vers les zones de fluide rapide. Une aile d'avion est dessinée de sorte que l'air circule plus rapidement au-dessus qu'en dessous, d'où une force, la portance, dirigée vers le haut et qui maintient l'avion en l'air.

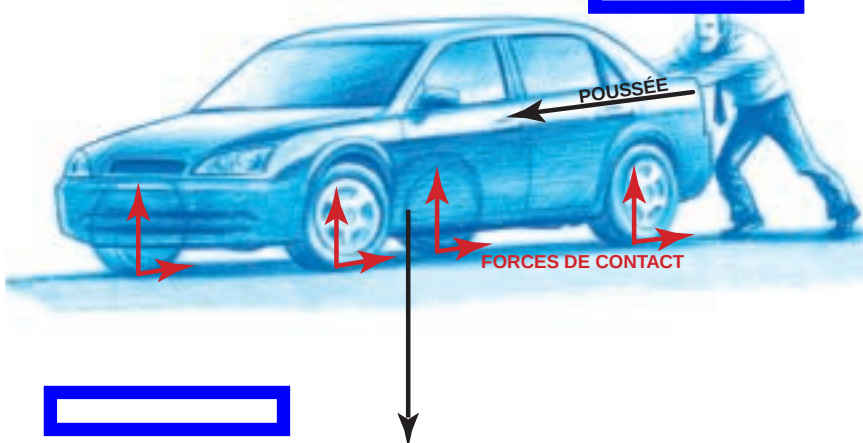
Pour une voiture de course, la géométrie inverse cette caractéristique : l'air qui circule sous la voiture est le plus rapide. La force engendrée, proportionnelle au



carré de la vitesse, plaque la voiture au sol et augmente ainsi la force de réaction verticale du sol sur les pneus. La tenue de route est meilleure, car le seuil de glissement est plus élevé. L'ajout d'ailerons améliore encore les performances du dispositif : elle autorise des accélérations et des freinages inconcevables avec des voitures de tourisme. Pour une *Formule 1*, cette force est supérieure au poids de la voiture dès que sa vitesse dépasse 200 kilomètres par heure : une telle voiture pourrait rouler à l'envers sur le plafond d'un tunnel !

Toutefois, afin de maintenir sa vitesse, il faut vaincre les frottements aérodynamiques, ou force de traînée, qui ralentissent le véhicule. Or, cette force est elle aussi proportionnelle au carré de la vitesse. Les pilotes ont donc besoin pour maintenir une vitesse constante, égale au produit de la force de traînée par la vitesse, une force proportionnelle au cube de la vitesse. Il est donc très coûteux en énergie de rouler rapidement, ce qui explique la puissante motorisation des *F1* : huit fois plus puissantes que les voitures de tourisme, elles ne vont que deux fois plus vite.

La force de traînée est aussi proportionnelle à un coefficient, le C_x , qui dépend de la géométrie du véhicule. Les voitures de tourisme ont un C_x qui varie de 0,3 à 0,5, alors que les *F1* ont un C_x « de cathédrale », voisin de 1, notamment par la présence des ailerons. Ainsi, le simple fait de lâcher l'accélérateur sur une *F1* donne une décélération aérodynamique de 0,7 fois l'accélération de la pesanteur, aussi brusque qu'un freinage d'urgence sur une voiture de tourisme. C'est mieux l'inconvénient d'un chargement sur le toit de son véhicule : il augmente considérablement les frottements aérodynamiques et, par suite, la consommation d'essence du véhicule.



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

Merci à David FIGLARSKI, moniteur à l'école *Sécurité Conduire Juste J.-P. Beltoise* et à l'école *Pilotage Passion*.

B. BECKMAN, *The physics of racing*, <http://members.home.net/rck/phor/>

Physique

Hydrodynamique physique. Problèmes résolus avec rappels de cours

Marc Fermigier. Éditions Dunod, 1999 (224 pages, 165 francs).

Recueil de problèmes d'hydrodynamique, avec solutions, le livre de Marc Fermigier s'adresse à des étudiants de maîtrise de physique ou de mécanique, aux élèves-ingénieurs, et aux étudiants qui préparent les concours de l'Éducation nationale. Fruit de l'expérience d'une équipe enseignante de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de Paris (ESPCI), où enseigne l'auteur, ce document vient compléter avec bonheur le cours d'Étienne Guyon, Jean-Pierre Hulin et Luc Petit (*Hydrodynamique physique*, EDP Sciences), devenu un classique.

Chacun des sept chapitres est dédié à un thème particulier ; il commence par un bref rappel de cours, propose ensuite une série de problèmes (dont le niveau de difficulté est précisé) et donne une solution commentée ; une bibliographie vient en général compléter l'étude : articles de *Pour la Science* ou d'autres revues de vulgarisation, ou manuels de référence.

Le livre est original tant par le choix des problèmes retenus que par la pédagogie mise en œuvre. Les thèmes choisis renouvellent notablement l'éventail des problèmes, classiquement tournés vers l'hydraulique ou vers l'aéronautique. Ces thèmes convaincront les étudiants de la richesse de comportement des «écoulements lents», où les effets visqueux dominent l'inertie du fluide, et des «fluides complexes» que sont les solutions de polymères, les polymères fondus ou les suspensions concentrées de particules solides (boues, pâtes). Les interfaces sont également très présentes, à travers des problèmes sur les bulles, les films de savon, l'étalement d'une nappe d'huile ou le drainage des mousses. Signalons encore, parmi d'autres, les problèmes sur les fluides électro- et magnéto-rhéologiques, les grains de sable dans le vent ou les instabilités.

De nombreux problèmes sont accompagnés de graphes qui, comparant théorie et données expérimentales, stimulent la réflexion et l'imagination. Les phénomènes discutés, dont beaucoup demeurent aujourd'hui mal compris, correspondent à des domaines de recherche très actifs. Ils sont riches

d'applications dans le domaine des procédés physico-chimiques, par exemple dans les industries pharmaceutiques, agro-alimentaires, ou de dépollution et de traitement des eaux.

Inspiré des expérimentations pédagogiques menées à l'ESPCI, cet ouvrage accorde une large place à la réflexion et à l'initiative des étudiants à travers des exercices moins «calibrés» que les habituels travaux dirigés. On y insiste sur la discussion des ordres de grandeur des phénomènes, qui permet de simplifier des équations trop difficiles à résoudre, même avec l'aide des ordinateurs ; on y explique l'importance de la notion de comportement limite, asymptotique, ainsi que l'utilité de la recherche de lois d'échelle (elles permettent de répondre, entre autres, à des questions du type : y a-t-il une taille maximale pour un animal volant ? Ou, y a-t-il un nombre optimal de rameurs dans un bateau ?). Enfin, une rubrique «Faites-le vous-même» vient enrichir de nombreux problèmes, proposant des expériences simples à réaliser, propres à éveiller la curiosité et à stimuler un questionnement.

On doit féliciter M. Fermigier pour ce recueil de problèmes, utile pour le savoir-faire solide que le lecteur y trouvera, et enrichissant par ses perspectives stimulantes qu'il y découvrira. Tant il est vrai qu'on ne comprend les idées et les concepts qu'en les appropriant à travers une réflexion personnelle ; et que cette réflexion passe, au moins pour le présent sujet, par la résolution de problèmes sur lesquels il ne faut pas craindre de «sécher» un moment avant d'en trouver la solution.

François CHARRU

Histoire des sciences

Marcelin Berthelot, un savant engagé

Daniel Langlois-Berthelot.
Éditions Jean-Claude Lattès, 2000
(374 pages, 129 francs).

Le nom du chimiste Marcelin Berthelot (1827-1907) reste surtout connu du grand public pour des raisons postales et toponymiques : peu d'agglomérations n'ont pas de voie publique portant son nom. Chimiste important, Berthelot fut également un homme

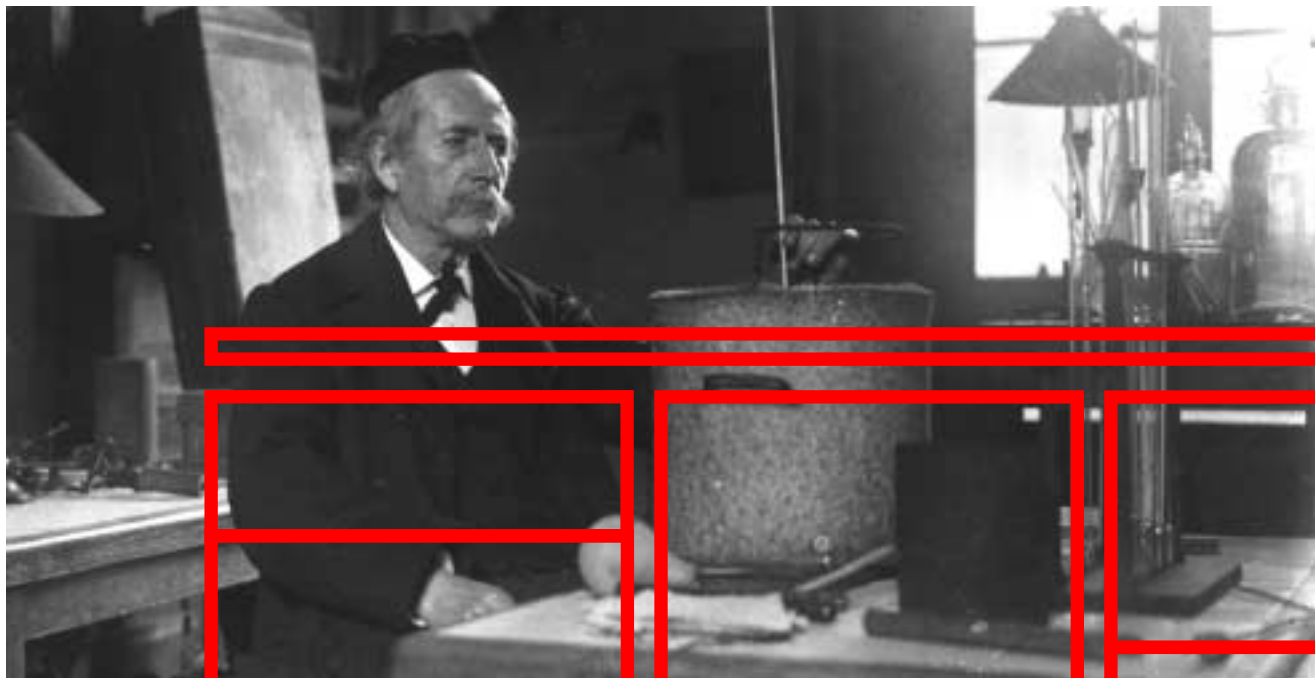
politique influent. Entre autres fonctions, il fut professeur de chimie organique à l'École de pharmacie, au Collège de France, membre de l'Académie française et de l'Académie de médecine, sénateur inamovible, ministre de l'Instruction publique, puis des Affaires étrangères... Il publia plus de 260 articles et ouvrages sur divers aspects de la chimie et sur des points importants d'histoire de cette discipline. On lui doit également des ouvrages de réflexions morales et philosophiques. Devenu par ses activités scientifiques et publiques le chimiste, sinon le savant «officiel» de la III^e République, il eut droit à des obèques nationales. Huit jours après son décès, son corps et celui de sa femme - décédée quelques minutes avant lui - furent transférés au Panthéon.

Son arrière-petit-fils Daniel Langlois-Berthelot consacre à son aïeul une biographie très documentée sur sa vie privée et publique ; ce livre est aussi une touchante saga familiale, écrite avec beaucoup de passion, à partir de documents souvent inédits. De ce point de vue, il complète utilement l'abondante bibliographie concernant Berthelot.

C'est à propos du rôle de Berthelot dans le développement de la chimie française que le caractère hagiographique de l'ouvrage pose problème. Au XIX^e siècle, une polémique opposa les partisans de la théorie atomique et ceux de la théorie, plus ancienne, des «équivalents». Le système des équivalents était un mode de représentation des composés où seules les masses des éléments qui réagissaient étaient prises en compte : considérant qu'on ne peut pas déterminer, donc qu'on ne peut pas représenter la structure réelle des molécules, les «équivalentistes» écrivaient l'eau HO ; les «atomistes» écrivaient H₂O, symbolisant mieux que ceux qui les «hydrogène se combinent à un atome d'oxygène pour former une molécule d'eau».

L'auteur conteste que son arrière-grand-père, par sa hostilité à la théorie atomique, ait été le principal responsable du déclin de la chimie française à partir des années 1870. Il attribue ce déclin à l'état déplorable des installations scientifiques françaises de l'époque. Il s'oppose notamment aux intéressantes thèses développées par Jean Jacques dans *Berthelot, autopsie d'un mythe* (éditions Belin, 1987) ; je regrette que, sans les avoir discutées, il les «exécute» dans la bibliographie.

Avant de renvoyer les lecteurs intéressés à la lecture «comparée» des ouvrages de D. Langlois-Berthelot et de J. Jacques, donnons quelques faits et témoignages, en nous limitant aux propos de chimistes contemporains de Ber-



Marcelin Berthelot (1827-1907) utilisa notamment la calorimétrie pour déterminer l'énergie des réactions chimiques.

thelot et en omettant les jugements portés à l'occasion de cérémonies officielles ou du décès de Berthelot : bien avant Georges Brassens, on savait que «les morts sont tous de braves types»...

L'hostilité de Berthelot à la théorie atomique fut grave, parce que le personnage fut influent : inspecteur général de l'Enseignement supérieur et membre du Conseil supérieur de l'Instruction publique, il pesa sur les programmes scolaires. Aussi comprend-on qu'il ait été mis en cause dans l'introduction tardive de la théorie atomique dans les programmes d'enseignement, en France : c'est seulement en 1902 que les définitions de l'atome et de la molécule figureront dans le programme du baccalauréat, alors que ces notions étaient enseignées bien plus tôt en Allemagne et en Angleterre.

Ce retard dans l'enseignement de la théorie atomique a-t-il réellement nui au développement de la chimie française, tout particulièrement de la chimie organique ? C'était en tout cas l'opinion qu'Emilio Noelting (1851-1922), spécialiste reconnu de la chimie des colorants, exprima du vivant de Berthelot : «Si le développement de la chimie organique en France a été moins rapide qu'en Allemagne, cela est dû, certainement en grande partie, à l'opposition acharnée qu'ont faite, à l'introduction des théories nouvelles dans l'enseignement, certains savants influents.»

Albin Haller (1849-1925), autre très bon chimiste de l'époque, a rédigé les rapports officiels concernant la chimie lors des Expositions universelles de Chi-

cago en 1893 et de Paris en 1900 ; il y met l'accent sur «la liberté dont nous avons été sevrés si longtemps en France et qui est un des plus beaux apanages des universités allemandes». Il dénonce l'«ostracisme» dont a été victime en France la théorie atomique et estime qu'elle est indispensable au développement de la chimie organique et à une formation efficace des chimistes de haut niveau. Il déplore que «tel grand nom en arrive à régenter la chimie» : il évoque évidemment Berthelot. Haller précise les conséquences de cette situation sur le développement des industries chimiques en France et en Allemagne : «Il semblera peut-être excessif d'attribuer à une question de pure doctrine une influence aussi prépondérante sur l'évolution de l'industrie. La partie de la science chimique qui, en France, s'est trouvée entravée dans son développement, alors qu'en Allemagne elle marchait à pas de géants, c'est la chimie organique.»

Alfred Werner (1866-1919), chimiste suisse d'origine alsacienne, prix Nobel en 1913, qui avait passé six mois en «stage postdoctoral» dans le laboratoire de Berthelot, commenta ultérieurement l'attitude de ce dernier : «Un tel sectarisme fut plus désastreux pour la France que le traité de Francfort» (qui conclut la paix entre la France et l'Allemagne en 1871). De même, le chimiste allemand Richard Willstätter (1872-1942), prix Nobel en 1915 pour ses travaux sur les pigments végétaux, écrit dans ses *Mémoires* que «la grande influence de Berthelot a retardé pendant longtemps le développement de la chimie organique

en France». Un troisième lauréat du prix Nobel (en 1912) Victor Grignard (1871-1935) disait aussi, en évoquant ses études : «Nous étions en effet en 1894, et pas encore hors de la période où l'influence de Berthelot, s'exerçant despotiquement sur l'enseignement secondaire, empêchait la théorie atomique de remplacer celle des «équivalents»...»

Marc Tiffeneau (1873-1945), chimiste et pharmacologue important, est peut-être encore plus critique : «C'était aux environs de 1880. Les grands noms de la chimie française n'étaient plus. Seul Berthelot survivait, dernier survivant de la grande période romantique de la chimie. Par une contradiction des plus décorrélantes, ce descendant des encyclopédistes [...] était réactionnaire dans sa propre science. Soit par aveuglement, soit par un entêtement inconcevable, Berthelot s'opposait obstinément à l'adoption de la notion d'atome [...]. Conséquence plus inouïe encore, il s'interdisait et voulait interdire autour de lui l'emploi de la notation atomique, alors même que cette merveilleuse notation était seule capable de donner à la synthèse organique dont il était l'illustre protagoniste son développement le plus sûr et son épanouissement le plus complet.»

À la bibliographie de langue française très complète donnée par l'auteur, il faut ajouter le livre de R. Virtanen *Marcelin Berthelot. A study of a scientific public role* (Université du Nebraska, 1965), indispensable pour comprendre l'activité d'homme public de Berthelot.

Georges BRAM

Botanique

Larousse des arbres et des arbustes

Jacques Brosse. Éditions Larousse, 2000 (576 pages, 315 francs).

La visite de tout parc ou jardin aux riches floraisons savamment disposées est un enchantement qu'entache souvent le dépit : vient toujours le moment où l'on s'arrête devant une plante inconnue qui, naturellement, apparaît alors comme la plus spectaculaire ou la plus singulière... Où est donc son panneau informatif ? Évidemment, il manque. L'information désirée, toutefois, sera trouvée dans ce bel ouvrage, illustré d'aquarelles de qualité, où sont décrites plus de 1 600 espèces ligneuses, décoratives, tolérant les conditions climatiques de l'Europe occidentale. Son poids interdit malheureusement son utilisation sur le terrain, mais il suffit de l'ouvrir au hasard pour être certain que l'on s'arrachera difficilement à sa lecture.

Les données botaniques, phytogéographiques et écologiques que l'on recherche (sans toujours les obtenir) dans ce genre d'ouvrage apparaissent ici avec précision, en un style agréable, dépouillé de tout jargon spécialisé, notamment pour l'exacte et méthodique description de chaque genre ou espèce. Le lecteur sera éventuellement aidé par l'important glossaire botanique, enrichi de nombreux termes relatifs à l'écologie, à la foresterie... annexé à l'ouvrage.

À propos de chaque espèce, l'auteur a su adjoindre aux données botaniques nombre d'informations sur les relations pratiques ou mythiques entre les plantes citées et l'homme, sur l'his-

toire des botanistes-explorateurs et les circonstances de leurs découvertes en de lointaines contrées, sur leur contribution (datée) à l'enrichissement de nos parcs et jardins, où chaque plante nécessite des précautions pour la pleine réussite de sa culture comme pour sa précaution décorative. On le comprend pour les lointaines exotiques, mais on lira avec surprise la stratégie complexe nécessaire à la floraison au jardin du daphné caméléon, arbrisseau au parfum délicat, abondant dans nos Alpes méridionales.

Les informations sur chaque espèce peuvent être trouvées à l'aide du nom français ou scientifique (latin), ce dernier servant de base à l'ordre alphabétique. À propos de l'étymologie du binôme latin, une brève notice bibliographique concerne le botaniste créateur du nom de genre ou d'espèce, éventuellement la personne qui a eu l'honneur d'une dédicace et que l'ouvrage sort souvent de l'oubli. Par exemple le genre *Abelia* (premier nom cité), dédié vers 1825 à Clarke Abel (1780-1826), médecin de l'ambassade britannique à Pékin, par l'illustre Robert Brown (1773-1858), est apparu dans les jardins européens dès 1844.

Des données aussi fouillées concernent tous nos arbres d'ornement, même les plus familiers, tels les platanes ou les marronniers (dont six espèces croissent chez nous). La multitude et la diversité des informations offertes par cet ouvrage sont naturellement liées à la personnalité de son auteur : s'il n'est pas un botaniste de stricte obéissance, il est un spécialiste incontesté de la mythologie des arbres, historien, ethnologue, bref, un naturaliste complet ; il connaît admirablement ses plantes et sait les présenter dans un style plein de charme.

Que J. Brosse nous permette quelques remarques, et d'abord concernant les espèces retenues : en principe, les arbres et arbustes (non les arbrisseaux), indi-



Les fleurs parfumées du daphné caméléon (*Daphne genkwa*).

gènes ou acclimatés, présents «des îles britanniques aux Carpathes». Si le choix a dû être difficile, j'ai lu à plusieurs reprises le lecteur sur sa faim : alors que sont cités des arbrisseaux nains comme le daphné caméléon, dont la hauteur est inférieure à 30 centimètres, pourquoi exclure l'ajonc de Le Gall, arbuste superbe et beaucoup plus grand (c'est l'«ajonc d'or», parure de l'Armorique et des autres péninsules occidentales d'Europe moyenne) ? Parmi les grands végétaux ligneux bien acclimatés dans les jardins de la Côte d'Azur, pourquoi citer la tomate en arbre et omettre ces faux palmiers que sont les cycas, fossiles survivants des temps secondaires, qui ont résisté mieux que les dinosaures aux catastrophes géologiques majeures ? On est aussi un peu déçu de voir l'auteur prôner les «belles haies» obtenues avec le séneçon en arbre, peste végétale qui envahit les côtes atlantiques, il est vrai que le mal est fait depuis longtemps, mais son extension sur le littoral encore préservé ne doit pas être encouragée. Notons enfin la persistance «stolonifère» (elle se propage insidieusement, d'un ouvrage à l'autre) de quelques données inexacts ou douteuses : ainsi le bouleau nain est inconnu dans les Ardennes, et le rôle d'une météorite radioactive dans la genèse des remarquables hêtres tortillards («faux de Verzy») en Monnaie de Reims est pour le moins mythique.

Ces critiques mineures ne sont que la preuve du très grand intérêt que j'ai pris à consulter cette riche et passionnante source d'informations, superbement réalisée, dont le succès mérite d'égaler celui des autres dictionnaires qui ont fait, depuis plus d'un siècle, la réputation des éditions Larousse.

Marcel BOURNÉRIAS



Détail de la ramure d'un hêtre tortueux, ou «faux» de Verzy (Marne).

Sociologie

Pour la campagne

Bernard Farinelli. Editions Sang de la Terre, 2000 (160 pages, 89 francs).

Peut-on réduire la France rurale à une caricature ? On évoque la force tranquille, une «France moisie» selon la formule de l'écrivain Philippe Sollers, un vote réactionnaire ou à l'opposé des révoltes paysannes violentes, sur fond d'endettement, de quotas européens et de mondialisation. Les paysans sont-ils des victimes d'un système qui les dépasse ou sont-ils des pollueurs préoccupés de leurs rendements plus que d'écologie ? Nos campagnes sont-elles en voie de désertification, nos terres vouées à l'enfrichement, à l'abandon et dans un état d'épuisement dû aux excès du siècle passé ? Face aux interrogations alarmistes, Bernard Farinelli propose une synthèse «pour justifier et encourager!... pour vivre aujourd'hui et aider à vivre!».

La réalité est surprenante : en 1990, les agriculteurs ne sont plus que 5 pour cent de la population active, contre 20 pour cent en 1961. Donc la terre donne peu d'emplois directement. Évidemment, les statistiques sont à interpréter : on doit distinguer un rural producteur, très mécanisé, celui des grandes plaines céréalières et qui fonctionne avec peu de bras, et un rural profond et marginalisé, que la Communauté européenne classe en catégorie «5b» (espaces ruraux fragiles et déserts) — c'est ciblé et dévalorisant —, avec la perspective de le faire passer en catégorie 2, laquelle «recouvre la problématique des régions en reconversion industrielle», ce qui est plus global et désigne toutes les régions à problèmes, rurales ou non.

Toutefois, entre la commune et l'Europe, que d'échelons administratifs et de cadres législatifs complexes ! On découvre notamment que la moitié des aides européennes aux zones rurales reste inutilisée. Face à cette Europe faite pour promouvoir un développement rural durable, beaucoup d'innovations doivent trouver leur place ; elles passent peut-être par la compréhension des marches à suivre pour monter les dossiers, un soutien aux initiatives qui marchent et la diminution du saupoudrage des subventions et de l'assistanat permanent aux canards boiteux.

Autre constatation imprévue : l'exode rural vers les villes se ralentit, le flux migratoire s'inverse et les «néoruraux» veulent tout : habiter «à la campagne proche de la ville» et travailler «en ville proche de la campagne».

L'auteur, qui n'est pas très motivé, volontariste, optimiste, argumente : la campagne peut être créative, et les solutions ne manquent pas pour aller plus loin ; le vieux slogan socialiste-huitard «travailler au pays» n'est pas périmé. Le succès viendra des modalités suivantes : environnement, patrimoine et traditions culturelles (en éliminant le pire, pour B. Farinelli, le fardeau du parti Chasse, Nature, Pêche et Traditions). Entre les projets associatifs locaux et les programmes intercommunaux plus lourds, beaucoup d'emplois sont à la clé : il faut des femmes et des hommes pour mettre en œuvre les contrats de rivières, les brigades vertes, les brigades patrimoniales qui restaurent les petits monuments, le tri sélectif, etc. La délocalisation publique est un projet plus ambitieux, mais également intéressant : pourquoi ne pas mettre à la campagne les hôpitaux, maisons de consommation et de retraite ou des établissements d'enseignement supérieur ?

Ce texte qui propose des solutions réalistes est d'un enthousiasme contagieux. Toutefois, avant d'adhérer à la formule plagiée «à la campagne, ça nous gagne», encore faut-il que le postulat néo-rural teste sa motivation profonde et se renseigne sur les deuils des reconversions. L'auteur y fait que des allusions discrètes : c'est le point faible de cet essai brillant, documenté, qui démontre magistralement que le développement rural existe et peut mieux faire.

Les éditions Le Pommier ont eu une bonne idée : construire leur collection «Quatre à quatre» pour permettre au lecteur de suivre un parcours sur quatre ans, à raison de quatre ouvrages par an. Ainsi, les ouvrages se suivent et permettent de se construire une connaissance générale, bien qu'approfondie, de la discipline concernée.

La première année est consacrée aux sciences du vivant, et le premier

Biologie

Qu'est-ce que la vie ?

C. Auffray et L. M. Houdebine. Editions Le Pommier, 1999 (160 pages, 85 francs).

Les éditions Le Pommier ont eu une bonne idée : construire leur collection «Quatre à quatre» pour permettre au lecteur de suivre un parcours sur quatre ans, à raison de quatre ouvrages par an. Ainsi, les ouvrages se suivent et permettent de se construire une connaissance générale, bien qu'approfondie, de la discipline concernée.

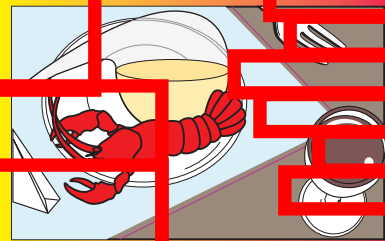
La première année est consacrée aux sciences du vivant, et le premier

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent
à écouter la chronique
de Marie-Océile Monclécourt :

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 26 juillet 2000.



POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55 42 84 00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé Tissot (Rédacteur en chef), Françoise Cinotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulennec (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphanie Montouchet, assistée de Séverine Merviel et Christophe Vitiello. Direction financière : Jean Gusdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Rémier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Leïla Bellon, Claude Chappert, Laurence Cristofoli, Paul Decaix, Évelyne Host-Patret, Philippe Janvier, Paul Loubeyre, Valérie Martin-Rolland, Abdelaziz M'Zoughi, Claude Olivier, Jean-Marc Petit, Christophe Pichon, Michel Spiro, Daniel Tacquenot, Bernard Thierry, Daniel Vignaud.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Mark Alpert, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus : John Hanley. Chairman : Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer : Gretchen Teichgraber. Vice-President : Chuck McCullagh et Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin, jf.guillotin@pourlascience.com
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) 754-0262

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 : 03, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Ben : 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» 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.

ouvrage de la série est *Qu'est-ce que la vie?* La composition du livre est assez classique : une première partie est centrée sur l'étude de la cellule, avec une bonne part d'analyse de ses constituants ; la seconde partie traite des organismes, dans leur dimension dynamique : reproduction, développement et grandes fonctions.

L'introduction de cet ouvrage constitue une belle synthèse, qu'il convient de relire après avoir lu l'ensemble et sur laquelle il sera utile de se pencher parfois. Elle montre d'abord combien il est difficile de donner une définition précise de la vie, c'est souvent par ses caractéristiques qu'on peut l'approcher. Parmi celles-ci, signalons le délicat équilibre entre unité, qui rend le vivant homogène, et diversité, qui permet l'évolution, la variété et la survie lorsque certains facteurs de l'environnement changent. D'autre part, cette introduction montre comment la vie fut étudiée : les méthodes d'étude du vivant, à partir de la description, se sont orientées soit vers le cassement, soit vers l'analyse de la filiation et la recherche des origines. Sont ensuite apparues la génétique, puis la biologie cellulaire, enfin la biologie moléculaire.

La première partie est consacrée à la cellule vivante : sa structure, puis son fonctionnement interne, son métabolisme. L'ouvrage détaille les molécules qui composent cette cellule : protides, glucides, lipides et acides nucléiques. Une fois les acteurs présentés, on les voit en action, au cours des mécanismes génétiques dont la présentation conduit à examiner les enjeux considérables de la génomique, science moderne de la description du génome.

La seconde partie est consacrée aux organismes, ces ensembles de cellules qui se sont spécialisées pour donner des tissus, puis des organes qui concourent aux grandes fonctions de l'organisme. La dynamique du vivant permet aux organismes de se reproduire, de se développer et de se diversifier. La reproduction connaît deux grandes options : la reproduction asexuée et la reproduction sexuée, qui exige que des cellules spéciales, les gamètes, soient produites. L'organisme se caractérise ensuite par la différenciation des organes et des divers systèmes de communication ou de défense : le système endocrinien, et aussi celui des facteurs de croissance, le système nerveux et le système immunitaire.

Le dernier chapitre est plus original dans un tel ouvrage : il porte sur l'exploitation du vivant avec, d'une part, le génie génétique et la génomique et, d'autre part, les biotechnologies. Inutile

de préciser que ce type de chapitre contribue à faire de ce livre un document à la pointe de l'actualité scientifique et technique.

Enfin, la conclusion situe le vivant dans une perspective historique : quelles en sont les origines et où va-t-il ? Deux questions sur lesquelles la science ne donne pas encore de réponses sûres et précises. L'ouvrage se termine par des annexes et un glossaire assez développé, qui confirme la dimension pédagogique et le caractère de référence et de synthèse du livre et de la collection.

Les principales qualités de cet ouvrage sont la clarté de l'exposé et la prise en compte de ce que les dernières découvertes ont apporté dans la compréhension des mécanismes fondamentaux de la vie. Ainsi, tout en constituant un ouvrage de référence qui s'inscrit dans une collection elle-même de référence, on y trouve des éléments nouveaux, par exemple sur la régulation du fonctionnement des gènes, sur les phénomènes épigénétiques, sur les séquences d'ADN «égoïstes» ou bien encore sur les transposons, des séquences dont le rôle est mal connu, à l'instar des introns, qui ont pourtant été identifiés il y a longtemps. Les maladies génétiques sont également évoquées, mais l'auteur note que les connaissances actuelles n'ont pas permis d'en dire beaucoup sur un sujet pourtant d'un considérable intérêt sur le plan fondamental et médical.

Qui lira ce livre ? Parfois, des schémas plus nombreux auraient facilité la compréhension de sujets que des explications rédigées rendent un peu complexes. Certains détails, notamment en chimie, sont approfondis, mais ces passages peuvent ne pas être lus, et la clarté de l'exposé compense en grande partie cette difficulté.

Au total, l'ouvrage intéressera les étudiants comme les non-spécialistes qui veulent comprendre ce sujet très important qu'est la biologie moderne ; il conviendra aussi à ceux qui ont eu une formation en biologie, mais qui n'ont pas suivi l'évolution des connaissances dans ce domaine. Si les trois ouvrages suivants sont de cette qualité, nous aurons là un outil de référence pour tous ceux qui s'intéressent au vivant et aux questions de l'avancement des connaissances appliquées à l'ensemble de la société.

Jean-Marie SANI

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>